

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

Институт Физико-технический институт
Направление подготовки Техническая физика
Кафедра Экспериментальной физики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы	
Зависимость свойств плёнок аморфного углерода от материала катода	
УДК 539.216.2:661.666:544.23.022	

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Д31	Лазарев Алексей Вячеславович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лабораторией ЭФ ФТИ НИ ТПУ	Юрьев Юрий Николаевич	к. т. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Верховская М. В.	к. эк. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ПФ	Гоголева Т. С.	к. ф.-м. н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭФ ФТИ	Кривобоков В. П.	д. ф.-м. н., профессор		

Томск – 2017 г.

Форма задания на выполнение выпускной квалификационной работы

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Физико-технический институт
Направление подготовки (специальность) Техническая физика
Кафедра Экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОДЗ1	Лазареву Алексею Вячеславовичу

Тема работы:

Зависимость свойств плёнок аморфного углерода от материала катода	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объектом исследования являются углеродные покрытия, полученные с помощью магнетронной распылительной системы с использованием графитовых мишеней различных марок, отличающихся по составу. В качестве подслоя использован Ti толщиной не более 50-70 нм для улучшения адгезии основного покрытия.
--	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Обзор литературы по разделам: углеродные покрытия, их виды, свойства и структура; способы получения углеродных покрытий (CVD и PVD); виды графитовых мишеней и их свойства; методы исследования свойств покрытий: твёрдость, модуль упругости, коэффициент трения, шероховатость, структура. Описание экспериментального оборудования, с помощью которого были получены и исследованы покрытия. Главной задачей считать получение углеродных покрытий при помощи магнетронной распылительной системы с различными графитовыми мишенями, сравнивая при этом свойства полученных образцов: твёрдость, модуль упругости, коэффициент трения, шероховатость, структура. В результате должны быть: получены углеродные покрытия и описана методика их получения; описаны свойства полученных покрытий в зависимости от выбора мишени магнетрона.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	- титульный лист; - актуальность работы; - цель работы и решаемые задачи; - классификация углеродных покрытий; - виды графитовых мишеней и их свойства; - методика нанесения покрытия; - твердость и модуль упругости; - коэффициент трения и шероховатость; - шероховатость поверхности; - структура покрытий; - заключение;
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская М. В.
Социальная ответственность	Гоголева Т. С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лабораторией ЭФ ФТИ НИ ТПУ	Юрьев Юрий Николаевич	к. т. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДЗ1	Лазарев Алексей Вячеславович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОДЗ1	Лазареву Алексею Вячеславовичу

Институт	ФТИ	Кафедра	ЭФ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	16.03.01 Техническая физика/Пучковые и плазменные технологии

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Использование информации, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах и изданиях, нормативно-правовых документах, а именно: 1.«Налоговый кодекс Российской Федерации (часть первая)» от 31.07.1998 № 146-ФЗ (ред. От 30.11.2016) (с изм. и доп., вступ. В силу с 01.01.2017) 2.«Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая)» от 05.08.2000 № 147-ФЗ. 3.ГОСТ 14.322-83 Нормирование расхода материалов. Основные положения 4.ГОСТ Р 51750-2001 Энергосбережение. Методика определения энергоёмкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах. Общие положения 5.ГОСТ Р 54097-2010 Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	1. Потенциальные потребители результатов исследования 2. Анализ конкурентных технических решений 3. SWOT-анализ.
2. <i>Определение возможных альтернатив проведения научных исследований</i>	
3. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски.</i>	Формирование бюджета на научное исследование производится из энергетических затрат, затрат на сырье, зарплат работников лаборатории, затрат на исследование полученных образцов, различные социальные нужды, отчисления и непредвиденные обстоятельства.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.</i>	Определение ресурсоэффективности производится в сравнении с конкурентами в данной области. Определение эффективности происходит на основании расчета интегрального показателя эффективности научного исследования, что связано с определением финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):
1. <i>Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)</i> 2. <i>Матрица SWOT</i> 3. <i>Оценка готовности проекта к коммерциализации</i> 4. <i>Календарный план-графики бюджет НТИ</i> 5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i> 6. <i>Сравнительная эффективность разработки</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Верховская Марина Витальевна	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОД31	Лазарев Алексей Вячеславович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДЗ1	Лазареву Алексею Вячеславовичу

Институт	ФТИ	Кафедра	ЭФ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	16.03.01 Техническая физика/Пучковые и плазменные технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	– вредных факторов производственной среды: микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения; – опасных факторов производственной среды: вероятность поражения электрическим током, вероятность возникновения пожара и взрыва.
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	– электробезопасность; – пожаровзрывоопасность; – требования безопасности при обращении с газовыми баллонами; – требования охраны труда при работе на ПЭВМ – требования безопасности при работе на вакуумной установке.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные защитные средства)
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДЗ1	Лазарев Алексей Вячеславович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 81 страниц, 26 рисунков, 18 таблиц, 39 источников.

Ключевые слова: планарный магнетрон, дуальный магнетрон, графитовые мишени, углерод, тонкие пленки, твёрдость, модуль упругости, коэффициент трения, спектроскопия Рамановского рассеяния.

Объектом исследования являются свойства тонких плёнок аморфного углерода.

Цель работы – исследование зависимости свойств полученных покрытий аморфного углерода от материала катода.

В процессе исследования проводились: получение покрытий на дуальной МРС, исследование свойств полученных покрытий: твердость, модуль упругости, коэффициент трения, шероховатость, определение структуры покрытий методом Рамановского рассеяния, описание полученных результатов.

В результате исследования изучены методики осаждения углеродных покрытий при помощи дуальной конструкции магнетрона, получены покрытия аморфного углерода, сравнение которых производилось в зависимости от рабочих параметров эксперимента и от типа распыляемой мишени.

Область применения: увеличение срока службы изделия, уменьшение коэффициента трения рабочей поверхности.

Экономическая эффективность/значимость работы: позволит внедрить недорогую, конкурентноспособную технологию на рынок.

Оглавление

Введение.....	11
1. Углеродные покрытия, способы их получения, графитовые мишени	13
1.1. Свойства и структура углеродных покрытий	13
1.2. Методы получения углеродных покрытий	17
1.3. Виды графитовых мишеней и их свойства	24
2. Описание экспериментального оборудования и методик исследования свойств покрытий	27
2.1. Экспериментальное оборудование и методики нанесения покрытия	27
2.2. Исследование толщины покрытия	29
2.3. Исследование твёрдости и модуля упругости покрытия	30
2.4. Исследование коэффициента трения	31
2.5. Исследование шероховатости покрытия	32
2.6. Исследование структуры покрытия	33
3. Исследование свойств полученных покрытий	35
3.1. Твёрдость и модуль упругости покрытий	35
3.2. Коэффициент трения и шероховатости	36
3.3. Состав плёнок	39
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	44
4.1. Предпроектный анализ	44
4.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	45
4.3. SWOT-анализ	47
4.4. План проекта	50
4.5. Бюджет научного исследования	51
4.6. Оценка сравнительной эффективности исследования	56
Вывод по главе 4	59
5. Социальная ответственность	60
5.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов	60
5.2. Требования безопасности при работе на ПЭВМ и вакуумной установке..	61

5.3. Условия безопасной работы на вакуумной установке и ПЭВМ	66
5.4. Электробезопасность.....	69
5.5. Пожарная и взрывная безопасность	72
Вывод по главе 5	74
Заключение	75
Список публикаций.....	77
Список литературы	78

Введение

Повышение ресурса работы изделий нелёгкая задача, которая имеет ряд факторов, усложняющих её выполнение. Для получения материалов с заданными свойствами необходимы дорогостоящие исследования. Менее дорогостоящим способом является модификация поверхности, которая также позволяет повысить ресурс работы изделия.

Основным способом модификации поверхности является осаждение тонкоплёночных покрытий. Методы их получения довольно глубоко изучены и имеют достаточно широкий спектр свойств.

Одним из типов покрытий, широко используемых в задачах повышения ресурса работы изделий, являются плёнки на основе углерода. Они обладают широким набором характеристик, позволяющих использовать для большого круга задач: от увеличения срока службы режущего инструмента (твёрдые алмазоподобные покрытия) до пар трения-качения (относительно мягкие антифрикционные плёнки).

Графитовые плёнки, полученные при помощи магнетронной распылительной системы (МРС) имеют малый коэффициент трения и достаточно высокую твердость. Также МРС обладают высокой скоростью осаждения покрытий, равномерностью и отсутствием капельной фракции. Свойства плёнок, осажденных с помощью МРС, зависят от режима осаждения, конфигурации магнитного поля, электрического питания и множества других факторов. Ранее другими исследователями была произведена оценка влияния параметров МРС, таких как конфигурации магнитного поля, типы источника питания, рабочие давления, на свойства плёнок углерода.

Кроме того, на качество углеродных покрытий также может оказывать влияние марка графита, из которого выполнен катод магнетронной распылительной системы. Однако, достоверных данных по этому вопросу, нами найдено не было.

В связи с этим **целью** работы является исследование зависимости свойств покрытий аморфного углерода (а-С) от материала катода.

В соответствии с темой работы были поставлены следующие задачи:

1. Нанести покрытия аморфного углерода на подложку методом магнетронного распыления при различных давлениях.
2. Экспериментально определить свойства полученных покрытий: толщину, твёрдость, модуль упругости, трибологические свойства, шероховатость, состав.
3. Дать оценку влиянию материала катода на свойства полученных покрытий.

1. Углеродные покрытия, способы их получения, графитовые мишени

1.1. Свойства и структура углеродных покрытий

Углеродные покрытия состоят из комбинаций алмазных (sp^3) и графитоподобных (sp^2) связей. Обычно эта структура аморфная, это говорит о наличии ближнего порядка и отсутствии дальнего атомарного порядка.

Углерод обладает множеством аллотропных форм из-за его валентности и имеет три гибридизации: sp^3 , sp^2 и sp^1 , как показано на рисунке 1.

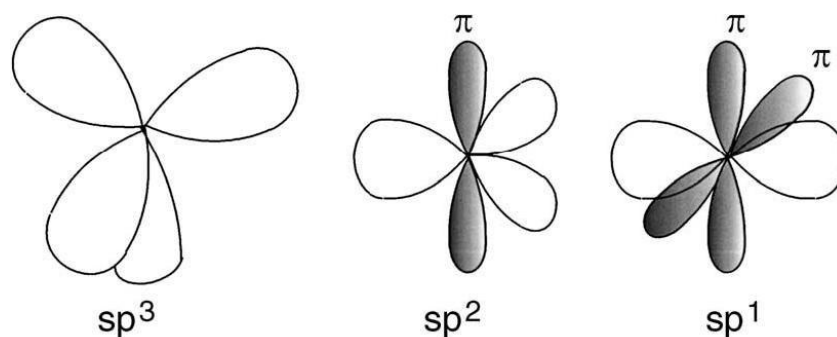


Рисунок 1. sp^3 , sp^2 и sp^1 гибридизации углерода [1].

На рисунке 2 изображены известные аллотропные формы углерода: алмаз, графит и аморфный углерод [2-4]. Алмаз обладает кубической кристаллической структурой с sp^3 связями (рис. 2а). У графита же гексагональная решетка с sp^2 связями, которые соединены слабыми силами (рис. 2б). Аморфный углерод обладает любой комбинацией sp^3 , sp^2 и даже sp^1 связей в структуре (рис. 2в), с возможным наличием до 60% атомов водорода [5].

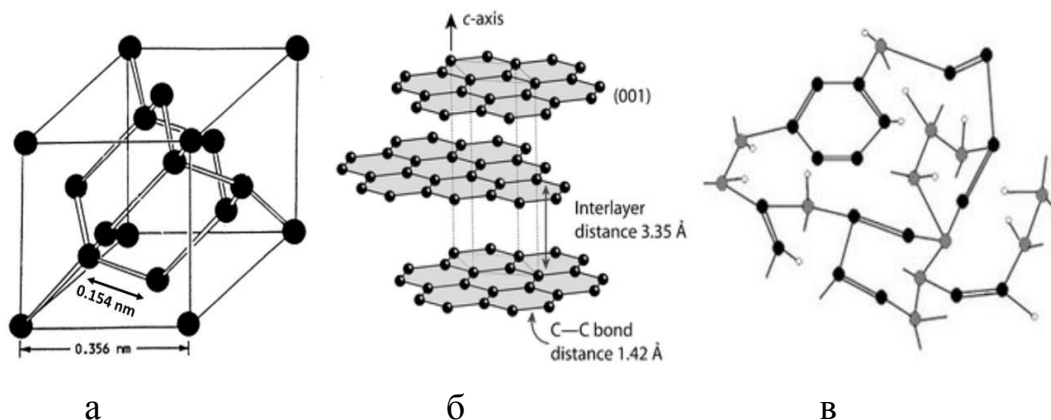


Рисунок 2. Структура углерода в алмазе (а), графите (б) и аморфном углероде (в). [2-4].

В зависимости от наличия водорода в структуре, пленки делят на две большие группы [6]:

1. Полученные при помощи графитовых мишеней и содержащие в основном углерод в своей структуре, называемые аморфным углеродом (a-C) или аморфным алмазом (ta-C).
2. Полученные в результате реакции водорода и углерода, называемые гидрогенизированным аморфным углеродом (a-C:H).

На рисунке 3 изображена фазовая диаграмма в зависимости от содержания sp^2 , sp^3 и H (водорода) в плёнке.

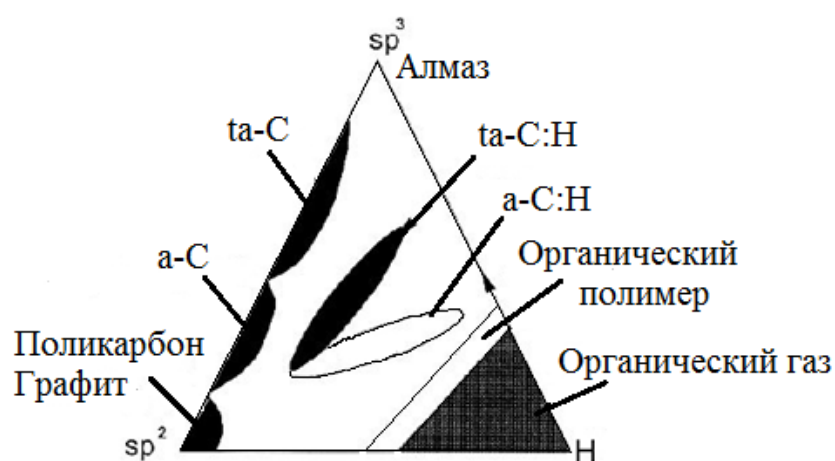


Рисунок 3. Фазовая диаграмма [7].

При преобладании sp^3 фазы, пленки - алмазоподобные, тогда как с преобладанием sp^2 фазы, пленки похожи на графит (рис. 3).

Разные по своим свойствам углеродные покрытия возможно получить при использовании различных методик и режимов работы оборудования. Структура может быть промежуточной в зависимости от различных пропорций углерода sp^3 , sp^2 и водорода. Сравнение свойств форм углерода можно увидеть в таблице 1 [6, 8-11].

Таблица 1. Сравнение основных свойств различных аморфных и кристаллических форм углерода.

Структура	a-C, ta-C	a-C:H	Алмаз	Графит
Свойства				
sp^3 , %	40-70	50	100	0
Кристаллическая решетка	Аморфная	Аморфная	Кубическая	Гексагональная
Плотность, г·см ⁻³	3,1	1,2 – 2,3	3,52	2,3
Удельное сопротивление, Ом·см	$3 \cdot 10^{11}$	< 1	1016	10.фев
Зона оптической видимости, эВ	2,5	1,1 – 1,7	55	0
Модуль упругости, ГПа	100 – 800		1000 – 1200	686, ($\parallel$ a); очень мал при ($\perp$ a).
Твердость, ГПа	10 – 80	2 – 10	100	-
Термостойкость, °C	> 700	> 200	> 700	> 700

Из таблицы 1 видно, что концентрация sp^3 фазы влияет на свойства углеродных покрытий. Например, механические свойства, такие как высокая твердость, высокий модуль упругости, низкий коэффициент трения и низкий износ. Аморфная структура позволяет углеродным покрытиям быть очень гладким материалом. Также углеродные покрытия химически инертны, био- и хемо- совместимы [12,13].

Наличие всех этих свойств делает углеродные покрытия привлекательными для многих направлений и дает широкий спектр применений в разных областях промышленности, как показано в таблице 2 [6,14].

Таблица 2. Применение углеродных покрытий в зависимости от их свойств.

Свойства	Способы использования	Приложения
Прозрачность в видимом свете и инфракрасный диапазон. Оптический диапазон: 1–4 эВ.	Оптические покрытия	Противобликовые, отражающие и износостойкие покрытия для инфракрасной оптики.
Химическая инертность по отношению к кислотам, щелочам и органическим растворителям.	Химически инертные покрытия, покрытия имплантантов	Защита от коррозии магнитных носителей информации, биомедицинская совместимость и безопасность.
Высокая твердость, $H = 5 - 80$ ГПа, низкий коэффициент трения: $<0,01-0,7$	Износостойкие покрытия, покрытия имплантантов, смазочные покрытия.	Магнитные жесткие диски, магнитные ленты, бритвенные лезвия (подшипник, шестерни).
Гладкость в наноразмерах, низкая шероховатость.	Очень тонкие покрытия < 5 нм	Напыления на магнитные носители.
Широкий спектр электрических сопротивлений $10^2 - 10^{16}$ Ом/см	Изоляционные покрытия, диэлектрические.	Изоляционное напыление.
Низкая диэлектрическая константа < 4	Покрытия с малой эмиссией	—

1.2. Методы получения углеродных покрытий

Существует две основных группы методов нанесения покрытий аморфного углерода (a-C и a-C:H) на подложку: физические (PVD – physical vapour deposition) [16] и химические (CVD - chemical vapour deposition) [15,16, 17].

К первой группе, позволяющей получать как алмазоподобные плёнки (ta-C), так и плёнки аморфного углерода (a-C), относятся метод ионного распыления и метод магнетронного осаждения. Ко второй, позволяющей получать углеродные покрытия в соединении с водородом (a-C:H), как правило, относят метод химического осаждения из газовой фазы.

- **Метод химического газофазного осаждения (газовое осаждение с нагретой нитью)**

Рабочая смесь (CH_4 , H_2) подается в реактор, где вблизи нагретой нити происходит разложение молекулярного водорода (H_2) в атомарный (2H). Разложение метана (CH_4) происходит при взаимодействии атомарного водорода также вблизи нити, как показано на рисунке 4.

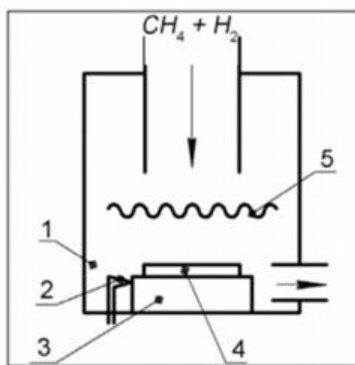


Рисунок 4. Схема установки термического газофазного осаждения

1 – газо-вакуумная камера; 2 – датчик температуры (термопара); 3 – держатель подложки; 4 – подложка; 5 – нагретая нить [18].

На подложке растет пленка из углеродосодержащих радикалов (sp^3 - – алмаз, sp^2 - – графит, аморфный углерод). Рост алмазной фазы подбирается параметрами осаждения: температура подложки, концентрация углеводородов).

Основные параметры: температура подложки 700-1000°C, давление в камере 12-50 мм. рт. ст., относительное содержание метана в смеси 0.5—2.5%, расход газа 100- 500 см³/мин, температура спирали 2000-2200°C.

Наличие проволочного нагревателя, материал которого может попадать на поверхность изделия. Отсутствие возможности получать покрытия в кислородосодержащей атмосфере является причиной того, что полученная структура менее ориентирована, чем в других методах [19]. Постоянный контроль реакций в рабочей камере и дорогие реагенты ($TiCl_4$, NH_3) являются недостатками данного метода [8].

- **Методы физического осаждения (PVD)**

При физическом осаждении материал покрытия переходит в газовую фазу из твёрдого состояния в результате испарения под воздействием тепловой энергии или в результате распыления за счет кинетической энергии столкновения частиц материала. Все процессы PVD происходят в вакууме или в атмосфере рабочего газа при достаточно низком давлении (около 1 Па). Так как физические методы безотходны, дешевле и безопаснее чем химические, поэтому далее они будут рассмотрены более подробно.

Метод ионного распыления мишени

На рисунке 5 показан процесс физического распыления графитовой мишени ионами рабочего газа, который заключается в выбивании атомов и молекул с ее поверхности; переносом элементов, образовавшихся в результате распыления мишени, к поверхности растущей плёнки.

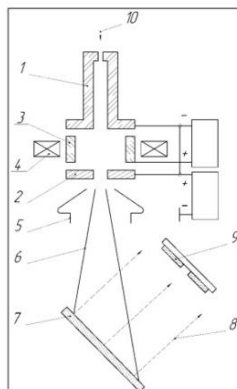


Рисунок 5. Конструктивная схема устройства распыления ионным пучком

1 – полый катод; 2 – эмиттерный катод; 3 – циклический анод; 4 – постоянный магнит; 5 – электрод; 6 – ионный пучок; 7 – мишень; 8 – поток распыленных частиц; 9 – подложка; 10 – газ.

Факторы, влияющие на осаждение углеродной плёнки и определяющие её структуру: температура поверхности, коэффициент конденсации и кристаллографическая ориентация подложки, геометрия рабочего участка (взаимное расположение мишени и подложки), плотность потока падающих частиц, напряжение смещения на подложке.

Ионы инертного газа подаются к распыляемому материалу (мишени) из отдельно расположенного независимого ионного источника в виде концентрированного потока с энергией 1-10 кэВ [20,21,22] (рис. 5). Процессы протекают при рабочем давлении $10^{-3} \dots 10^{-2}$ Па.

Возможно распыление как металлических, так и диэлектрических материалов, поскольку образование ионного луча не связано с распыляемым материалом. При приложении дополнительного потенциала смещения к подложке, распыляемый ионами материал мишени может ионизироваться и

ускоряться. Избежать сильного разогрева материала подложки позволяет концентрация плазмы разряда внутри источника ионов.

Сложность точного соблюдения химического состава покрытия является недостатком данного метода. Так как при столкновении ионов с поверхностью мишени протекает целый ряд сложных процессов (в том числе перемешивание, диффузия, адсорбция), которые могут изменить состав верхнего слоя мишени и напыляемого материала [20, 21].

Метод магнетронного распыления

Распыление материала происходит путём бомбардировки мишени ионами рабочего газа в плазме аномально тлеющего разряда. Для удержания и ускорения электронов используется скрещенное электромагнитное поле. При возникновении потенциала между мишенью (катод) и анодом появляется электрическое поле и зажигается аномальный тлеющий разряд. Замкнутое магнитное поле, расположенное у поверхности мишени локализует плазму разряда вблизи мишени. В результате чего, большая часть энергии электрона, используется для ионизации и возбуждения атомов рабочего газа.

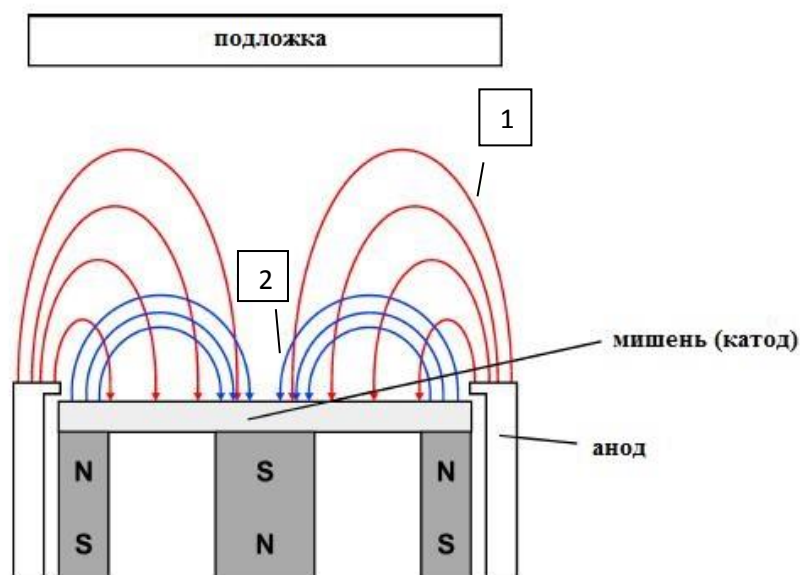


Рисунок 6. Принципиальная схема МРС

Красным цветом (1) обозначены силовые линии электрического поля, синим цветом (2) – силовые линии магнитного поля.

К основным рабочим характеристикам магнетронных распылительных систем относятся: величина индукции магнитного поля, давление рабочего газа, напряжение на катоде и плотность тока на мишени.

Мишень распыляется при давлении от 0,05 до 1 Па. В качестве рабочих газов выбирают Ar, N₂, O₂, CH₄. Виды получаемых покрытий: металлические, керамические, наноккомпозиты, углеродные покрытия.

Достоинствами магнетронного распыления являются: высокая плотность пленок (низкая пористость); высокая адгезия пленок; низкая температура подложки.

После обычной магнетронной распылительной системы (МРС) была изобретена дуальная магнетронная распылительная система (ДМРС). ДМРС (рис. 7) представляет собой два электрически изолированных магнетрона, установленных в общем корпусе [23].

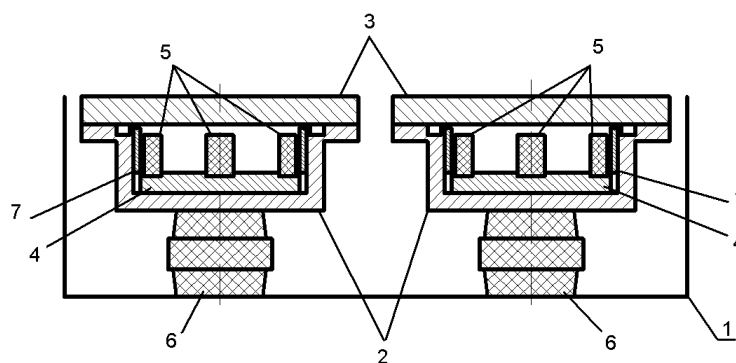


Рисунок 7. Схема дуальной магнетронной распылительной системы [23]: 1 – общий корпус; 2 – планарные магнетроны; 3 – мишень; 4 – магнитопровод; 5 – магниты; 6 – изоляторы; 7 – шунт.

- Дуальная магнетронная система позволила решить недостатки и проблемы МРС [24]. Преимущества дуальной МРС перед МРС приведены ниже:
 - высокая скорость напыления пленок;
 - система наиболее энергетически эффективная по отношению к МРС;
 - отсутствие опасности загрязнения продуктами распыления стенок камеры и покрытий;
 - отсутствие опасности возникновения пробоев.

Дуальное магнетронное распыление осуществляется благодаря сдвоенным магнетронам, питающимся среднечастотными импульсами. Питание на магнетроны подается в противофазе с среднечастотным импульсным биполярным напряжением синусоидальной формы.

Сначала один магнетрон работает как катод, а другой анод. Затем, во второй полупериод – наоборот. В один полупериод вторичные электроны, выбитые из первого магнетрона мишени-катода, ускоряются ко второму, мишень которого является анодом [25].

Изменение полярностей любого из магнетронов является особенностью дуальной магнетронной распылительной системы, что приводит к изменению конфигурации магнитного поля (рис. 8) [23].

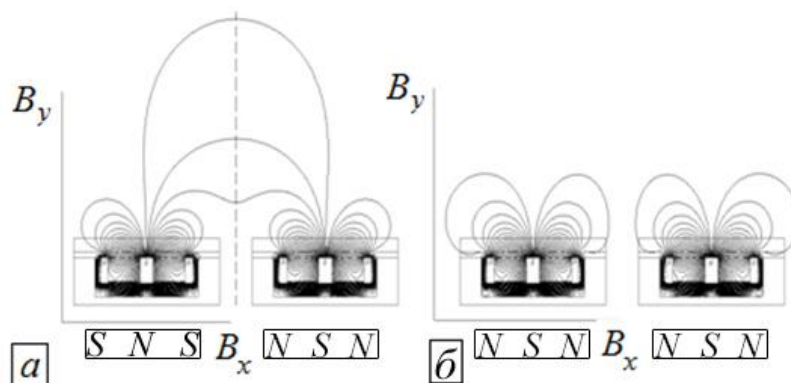


Рисунок 8. Конфигурация магнитного поля.

В том случае, когда полярность магнетронов одинакова, данную конфигурацию системы называют «зеркальной» (рис. 8 б), происходит отталкивание магнитных полей из-за одинаковой полярности магнетронов. Вследствие этого ионы начинают двигаться в направлении магнитных полей, и расположение плазмы принимает зеркальный характер. Если изменить полярность одного из магнетронов так, как показано на рисунке 8 а, происходит стягивание магнитных полей к центральной оси, образуется дополнительная магнитная ловушка. Расположение плазмы в данном случае принимает «замкнутый» характер. Когда подложка находится на достаточном расстоянии от МРС, это приводит к повышенному воздействию ионов на подложку.

Как показано в работах [26] использование разных систем и режимов работы МРС при получении образцов, приводит к изменению структуры покрытия и его свойств. Для того чтобы учесть иные факторы, что влияют на свойства плёнок, в данной работе будут рассматриваться зависимости свойств плёнок от мишеней с различным составом. Далее приведены марки мишеней, которые использовались в данной работе.

1.3. Виды графитовых мишеней и их свойства

Так как целью данной работы является исследование зависимости свойств покрытий аморфного углерода от материала катода, то будет производиться выбор различных видов графитовых мишеней.

Графит бывает естественным (природным) и искусственным.

Его применение основывается на нескольких уникальных свойствах:

- Высокая электропроводность (близкая к металлам);
- Устойчивость к агрессивным средам (химическая инертность);
- Устойчивость к высоким температурам (огнеупорность, термостойкость - температура плавления 3800 - 3900°C);
- Высокая теплопроводность (выше, чем у меди и алюминия).

В зависимости от того какие свойства необходимы больше, производят различные марки графита, основные характеристики которых показаны в таблице 3.

Таблица 3. Свойства марок графита.

Свойства	Марка графита			
	МПГ-6	МГ-1	АГ-1500	ЗОПГ
Плотность, г/см ³ , мин	1,65	1,65	1,76	1,74
Пористость, %, макс	24	18	24	20
Предел прочности при сжатии, МПа	34,3	73,6	36,2	68,6
Удельное электросопротивление Ом·мм ² /м	13	15	11	12
Модуль упругости, н/мм ²	6800	10000	8900	-
КТР, 10-6 1/°К	4,5	5,3	3,7	5
Коэффициент теплопроводности, Вт/м°К	85	95	190	58,1
Содержание золы, %	0,03	0,02	0,02	0,02
Содержание примесей, %				
Алюминий	1·10 ⁻³	3·10 ⁻⁵	не регламентируется	1·10 ⁻⁴

Марганец	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Бор	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Железо	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Медь	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Магний	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$

Графит марки МГ-1 – конструкционный, мелкозернистый, высокой механической прочности, полученный на основе прокаленного пекового кокса, природного графита и каменноугольного пека.

Низкая зольность, стабильно достигаемая эффективным газотермическим рафинированием на стадии высокотемпературной обработки (графитации), позволяет использовать эти марки графита в ответственных производствах при получении чистых материалов. Мелкозернистая структура графита позволяет изготавливать фасонные изделия сложной формы, нарезать мелкую резьбу с шагом 0,5-1,0 мм.

Графит марки МПГ-6 – графит конструкционный, мелкозернистый, высокопрочный, термически стойкий.

Применяется для изготовления технической оснастки и контейнеров при получении полупроводниковых материалов, кристаллизаторов при разливке цветных металлов, электродов-инструментов, применяемых при электроимпульсной обработке штампов пресс-форм из различных сталей, тиглей, пластин, дисков, нагревателей вакуумных, высокочастотных и других электропечей и в других областях техники при высоких температурах.

Графит марки АГ-1500 - конструкционный, антифрикционный графит.

Антифрикционный графит изготавливают из не прокалённого нефтяного кокса, каменноугольного пека с добавкой природного графита, сажи. Для получения плотного непроницаемого антифрикционного материала применяют пропитку его металлами: баббитом, оловом и свинцом.

Применяется для деталей узлов трения, работающих в условиях сухого, полусухого и жидкостного трения при спокойной или плавно меняющейся нагрузке (уплотнительные кольца компрессоров, вкладыши, подшипники скольжения насосов и др.).

Графит марки ЗОПГ – конструкционный, плотный, улучшенной структуры.

Применяется для изготовления труб, экранов, подставок для экранов, тиглей, нагревателей. Нагреватели применяют взамен вольфрамовых и молибденовых для плавки редких и полупроводниковых металлов в вакуумных и других закрытых электропечах при температуре до 2000°C. Из графита данной марки изготавливают защитные блоки и чехлы для термопар и термометров, работающих в нейтральных средах до 2300°C и окислительной среде до 400-450°C; плитки и блоки для футеровки химической аппаратуры, чугунных и шлаковых желобов.

2. Описание экспериментального оборудования и методик исследования свойств покрытий

2.1. Экспериментальное оборудование и методики нанесения покрытия

Работа осуществлялась на вакуумной установке, которая схематично представлена на рисунке 9.

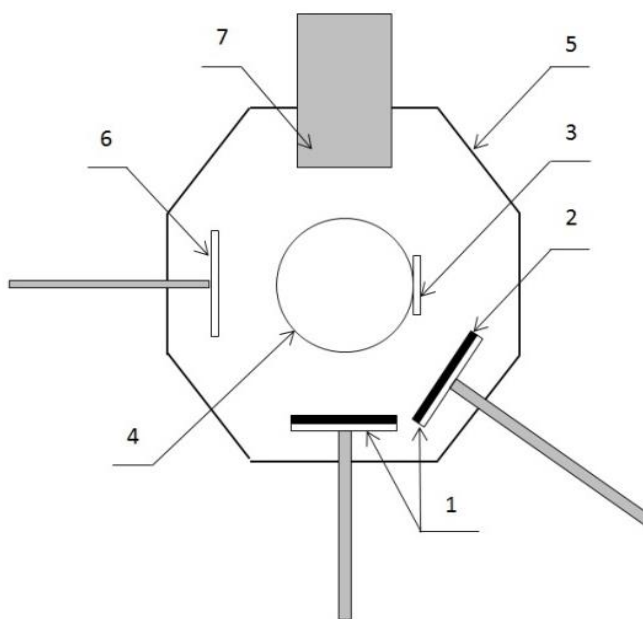


Рисунок 9. Схема вакуумной установки: 1 – дуальная магнетронная распылительная система с плоскими катодами; 2 – мишени магнетрона; 3 – исследуемый образец; 4 – держатель образцов; 5 – вакуумная камера; 6 – ионный источник; 7 – турбомолекулярный насос.

Для осаждения углеродных плёнок был использован дуальный магнетрон с дисковыми мишенями диаметром 90 мм. Мишени толщиной 8 мм были выполнены из графита марок МПГ-6, МГ-1, АГ-1500, ЗОПГ. Остаточный вакуум составлял не менее чем $8 \cdot 10^{-3}$ Па. Затем производилась чистка подложки из стали 12х08н10т ионами Ag с помощью ионного источника (для удаления окисла и загрязнений с поверхности) в течение 30 минут. Во время ионной очистки поддерживался ток равный 30 мА при рабочем напряжении 2500 В. Далее наносился подслой Ti толщиной 50-70 нм с помощью планарного

магнетрона. При нанесении подслоя из титана было использован высокоточный импульсный источник питания, мощность которого стабилизировалась на уровне 1,5 кВт. Рабочее давление изменялось в диапазоне $1-1,2 \cdot 10^{-1}$ Па. Время напыления покрытий составляло 30 минут. Питание дуального магнетрона производилось от источника напряжения переменного тока с частотой смены полярности импульсов 66 кГц и стабилизации мощности на уровне 5 кВт.

Параметры осаждения покрытий представлены в таблице 4.

Таблица 4. Получение а-С покрытий при распылении различных марок мишеней.

Марка	№	t (ИИ), мин	t (подслой Ti), мин	t (Маг), мин	P _{раб} , Па	Ar	I, А	U, В	W, кВт
МПП-6	1,1	30	4,5	30	0,1	0,6	4,4	1196	4,7
	1,2				0,12	0,82	5,4	1050	5
МГ-1	2,1	30	4,5	30	0,1	0,64	4,3	1196	4,8
	2,2				0,12	0,8	5,22	1095	5
АГ-1500	3,1	30	4,5	30	0,1	0,7	4,6	1198	4,8
	3,2				0,12	0,75	4,8	1163	5
ЗОПГ	4,1	30	4,5	30	0,1	0,66	4,7	1198	5
	4,2				0,12	0,7	4,9	1160	5

Физические характеристики покрытий: твёрдость и коэффициент трения были исследованы на приборах: нанотвердомере НаноСкан-3D, высокотемпературном трибометре PC-Operated High Temperature Tribometer ТНТ-S-AX0000.

2.2. Исследование толщины покрытия

Для измерения толщины покрытий использовался прибор «Calotest», схема которого показана на рисунке 10. Данный метод позволяет анализировать покрытия с толщиной от 0,1 до 50 мкм. Метод быстр и точен для определения толщины покрытий [27].

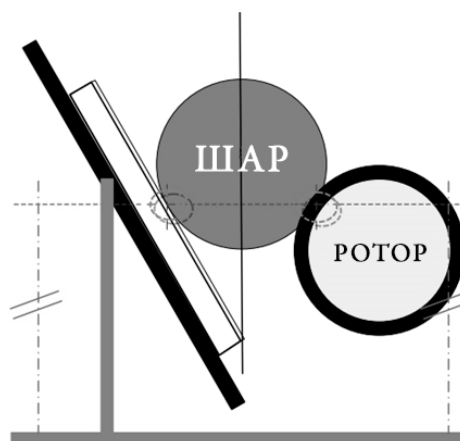


Рисунок 10. Прибор для определения толщины покрытий «Calotest» [28].

Шар с известным диаметром под нагрузкой опускается на поверхность образца. Ротор, вращая шар, с нанесенным на него абразивным веществом, образует на подложке шлиф (рис. 11).

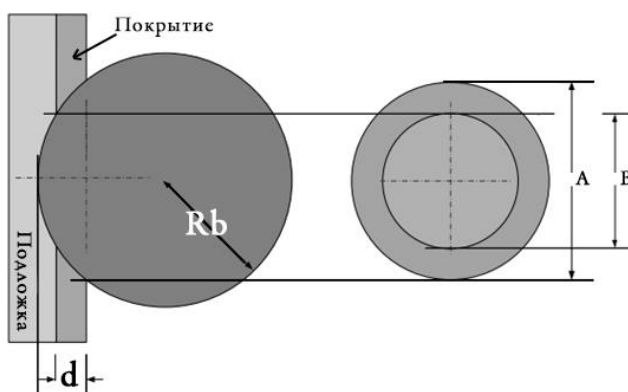


Рисунок 11. Расчет толщины покрытия при помощи шлифа [28].

С помощью оптического анализа проекции на плоскость шлифа можно определить толщину покрытия по формуле [28]:

$$d = \frac{1}{2} \left(\sqrt{4Rb^2 - B^2} - \sqrt{4Rb^2 - A^2} \right) \quad (1)$$

2.3. Исследование твёрдости и модуля упругости покрытия

Для измерения твёрдости использовался нанотвердомер НаноСкан-3D, который предназначен исследовать рельеф и структуру поверхности и измерять механические свойства (твёрдость и модуль упругости) материалов и тонких плёнок в нанометровом масштабе. Прибор НаноСкан-3D основан на принципе сканирующей силовой микроскопии [29].

Позволяет измерять твёрдость – 80 ГПа и модуль упругости – 1000 ГПа. Возможно сканирование по осям X и Y – 100 мкм и по оси Z – 10 мкм. Пьезокантилевер с индентором в виде алмазной пирамидой типа Берковича.

Измеряя и анализируя зависимость нагрузки от глубины, на которую внедряется индентор в материал, можно определить твёрдость покрытия [29].

График экспериментальной кривой в виде зависимости нагрузки от глубины вдавливания, и изображения отпечатка отпечатка представлены на рисунке 12. Кривая состоит из двух частей, характеризующих нагружение и разгрузку [29].



Рисунок 12. Кривая зависимости нагрузки от глубины внедрения.

Твёрдость образца находится из уравнения:

$$H = \frac{P_{max}}{A_c} \quad (2)$$

где A_c – площадь проекции отпечатка при максимально приложенной нагрузке P_{max} .

Значение модуля упругости находится следующим образом:

$$E = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{S}{\sqrt{A_c}} \quad (3)$$

где β – константа, зависящая от формы индентора, S – жёсткость контакта, которая соответствует значению угла наклона касательной к кривой разгрузки в точке P_{max} .

2.4. Исследование коэффициента трения

Для того, чтобы определить коэффициент трения, использовался трибометр [30] – прибор, основанный по принципу трения индентора о поверхность – «pin on disk» (рис. 13). На инденторе установлен тензодатчик, преобразующий нагрузку в электрический ток. Вся информация передаётся на компьютер, который выводит данные на монитор с помощью специальной программы.



Рисунок 13. Процесс нанесения трека [30].

Высокотемпературный трибометр состоит из держателя индентора, защитного кожуха, нагревателя, вращающегося стола, ручки, перемещающей держатель, фиксатора, тензодатчика и груза [30].

Рисунок 13 изображает процесс исследующий износостойкость. На образец, который закреплён на вращающемся столе, устанавливается груз и

после запуска прибора образец вращается. По мере нанесения трека производятся измерения.

2.5. Исследование шероховатости покрытия

Для измерения шероховатости поверхности использовался трехмерный бесконтактный профилометр Micro Measure 3D Station, который производит бесконтактное измерение глубин, используя оптические датчики [31].



Рисунок 14. Внешний вид установки Micro Measure 3D Station [31].

Автоматизированный прибор обладает программным обеспечением, которое позволяет управлять процессом сканирования образца, записывать данные и проводить их математическую и графическую обработку.

Прибор позволяет анализировать морфологию поверхности, определять структурные и фазовые составляющих веществ, проводить измерения толщины нанометровых слоёв образца.

Для измерений применяется технология, которая вычитает два разных отражения из оптически прозрачной плёнки, либо используется интерферометрический метод, предназначен для исследования очень тонких плёнок. Для непрозрачных плёнок применяется метод, который основывается на измерении высоты шага, чтобы рассчитать толщину покрытия.

2.6. Исследование структуры покрытия

Так как метод рентгенофазового анализа не чувствителен к аморфной структуре [32], а другие виды спектроскопии (инфракрасная – ИК) используют поглощение света образцом (Рамановское метод использует рассеянный на образце свет), для чего необходимо специально подготавливать образец, вследствие чего для исследования углеродных покрытий была выбрана Рамановская спектроскопия. Данный метод не требователен к подготовке образца и не чувствителен к полосам поглощения (в отличии от ИК-спектроскопии), а также позволяет определять наличия графитовых sp^2 и алмазных sp^3 фаз в углеродных покрытиях.

В процессе исследования образец облучается пучком монохроматического света, который рассеивается на нем. Основная часть (99,999 %) рассеянного излучения на образце имеет такую же частоту, что и у исходного излучения (Рэлеевское рассеяние). Остальная часть рассеянного излучения (Рамановская) имеет частоту, смещенную относительно частоты возбуждающего излучения лазера (0.0001 %). Лучи, которые получаются рассеянием, собираются линзой и пропускаются через светофильтр, он отделяет Релеевское излучение от Рамановского. Отделенные Рамановские лучи, попадающие на детектор передаются в виде данных на компьютер.

Измерение Рамановских спектров производилось на комплексе Centaur U HR (рис. 15).

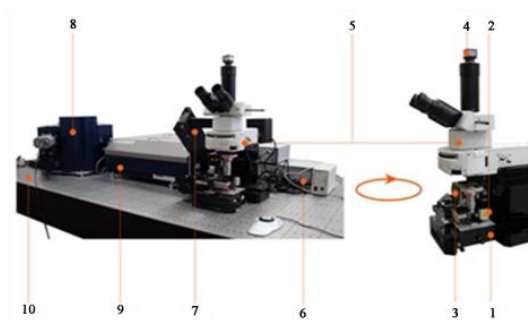


Рисунок 15. [33] Внешний вид установки Centaur U HR

1 – сканирующее основание Ratis; 2 – сканирующая головка Certus; 3 – z-подвижка для объектива Vectus; 4 – видеокамера; 5 – оптический микроскоп; 6 – контроллер; 7 – оптико-механический модуль; 8 – спектрометр; 9 – перископическая система сопряжения с микроскопом; 10 – оптический стол.

Отличительная особенность Centaur – возможность измерять Рамановские спектры возле линии возбуждения ($\approx 20 \text{ см}^{-1}$), и высокое спектральное разрешение 0,01 нм[33].

3. Исследование свойств полученных покрытий

3.1. Твёрдость и модуль упругости покрытий

Твёрдость и модуль упругости покрытий, полученных при распылении различных марок графитовых мишеней, представлены на рисунках 16 и 17.

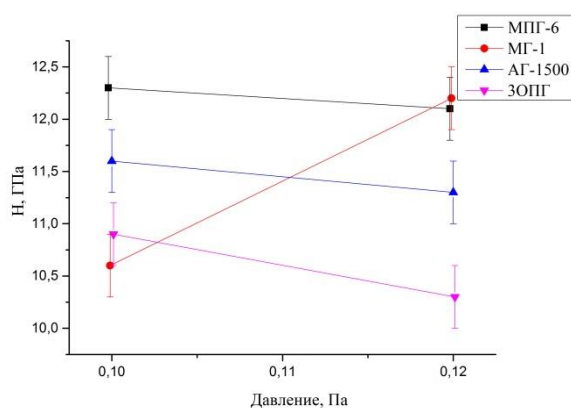


Рисунок 16. Твёрдость полученных покрытий.

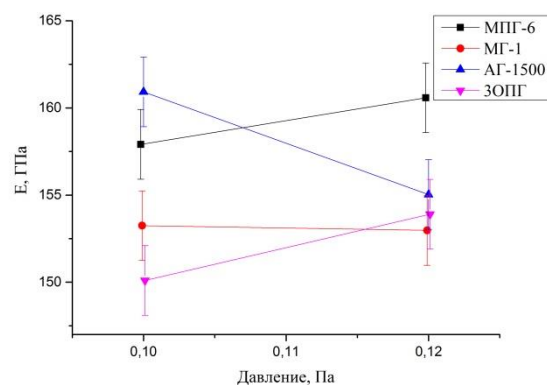


Рисунок 17. Модуль упругости полученных покрытий.

Из графиков видно, что наибольшей твёрдостью обладают плёнки, полученные при распылении графитовой мишени марки МПГ-6 ($H=12,2$ ГПа), они на 7% твёрже покрытий марок МГ-1 ($H=11,4$ ГПа) и АГ-1500 ($H=11,45$ ГПа) и на 15% твёрже, чем покрытия марки ЗОПГ ($H=10,6$ ГПа). Следующими по твёрдости идут плёнки марки АГ-1500, МГ-1, ЗОПГ, соответственно. Это может быть связано с механическими свойствами соответствующих мишеней (табл. 1). Графит марки МПГ-6 обладает большим пределом прочности и модулем упругости, чем остальные марки, за ним следуют графиты марок АГ-1500, МГ-1, ЗОПГ, по мере уменьшения своих механических свойств.

3.2. Коэффициент трения и шероховатости

На рисунке 18 представлена зависимость коэффициентов трения плёнок, полученных при распылении различных марок мишеней от рабочего давления в вакуумной камере. На рисунке 19 представлены площади следа индентора, полученные после испытания образцов на трибометре. Шероховатость полученных образцов изображена на рисунке 20. На рисунках 21, 22 представлены поверхности образцов с отпечатком от индентора.

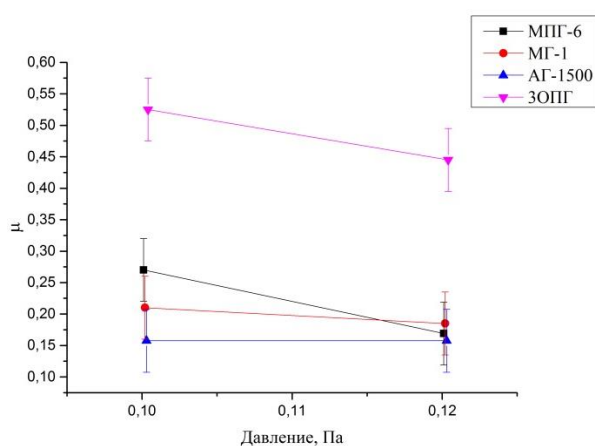


Рисунок 18. Коэффициент трения полученных покрытий.

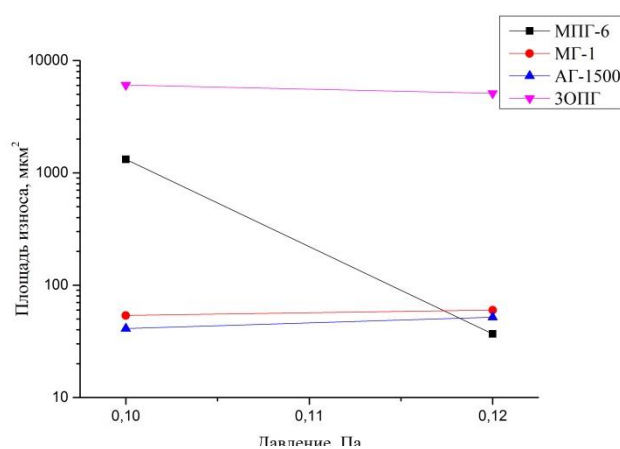


Рисунок 19. Площадь износа полученных образцов.

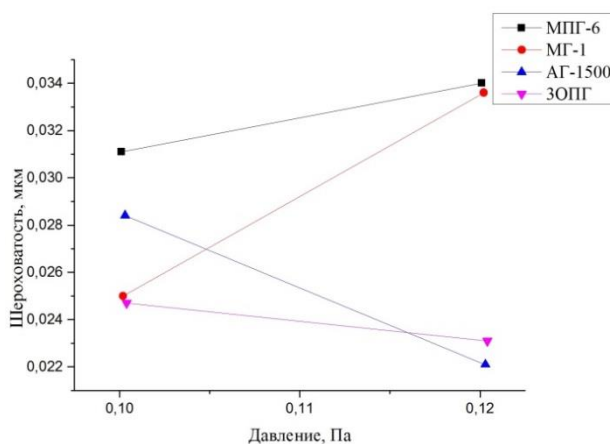


Рисунок 20. Шероховатость полученных образцов.

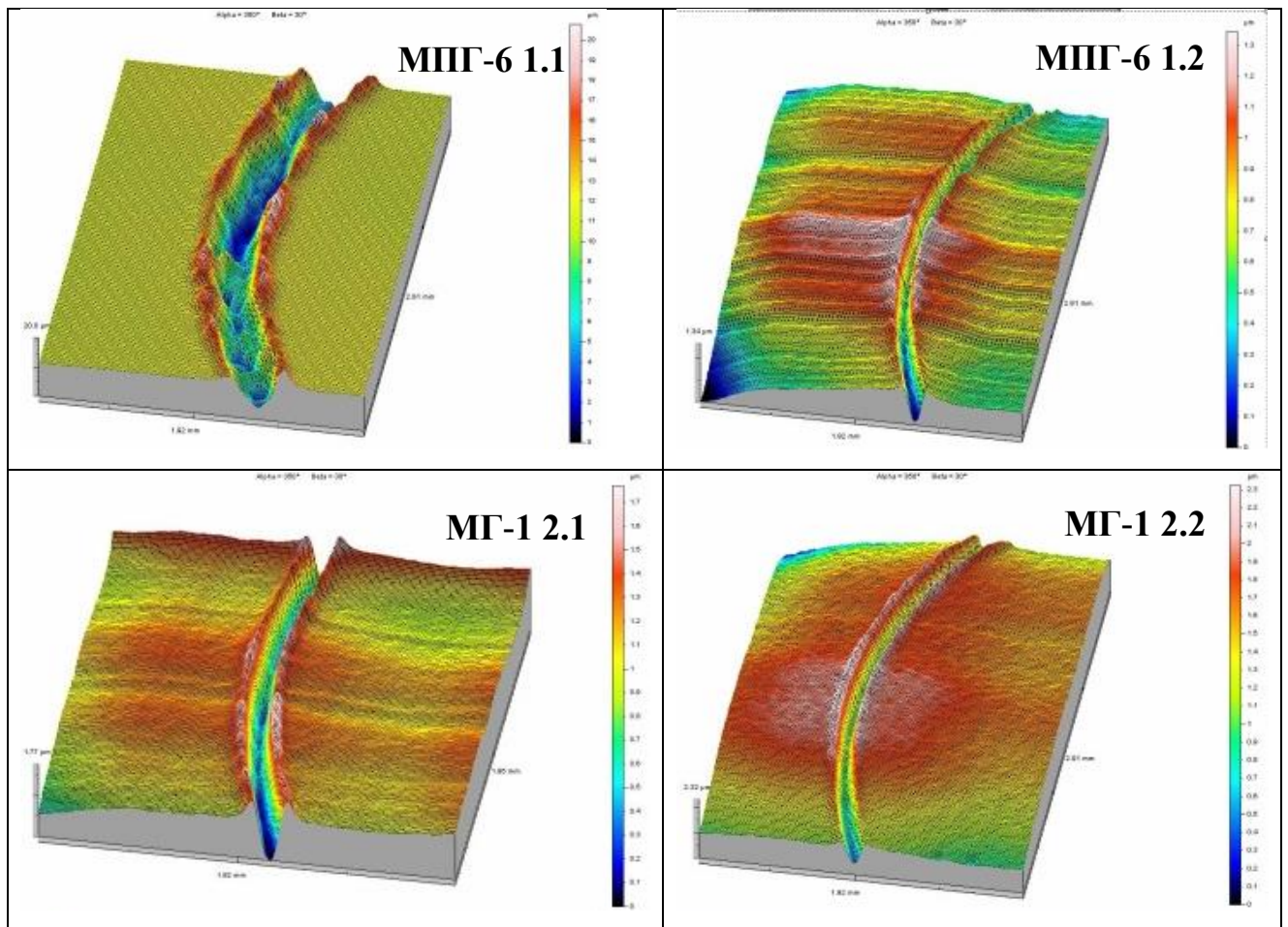
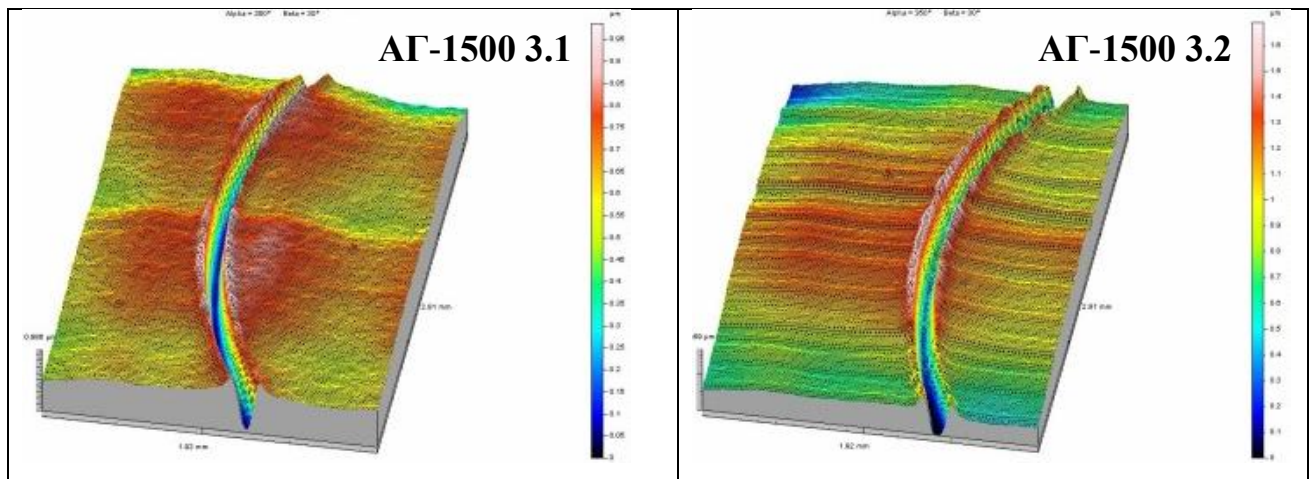


Рисунок 21. Поверхность образцов со следом индентора.



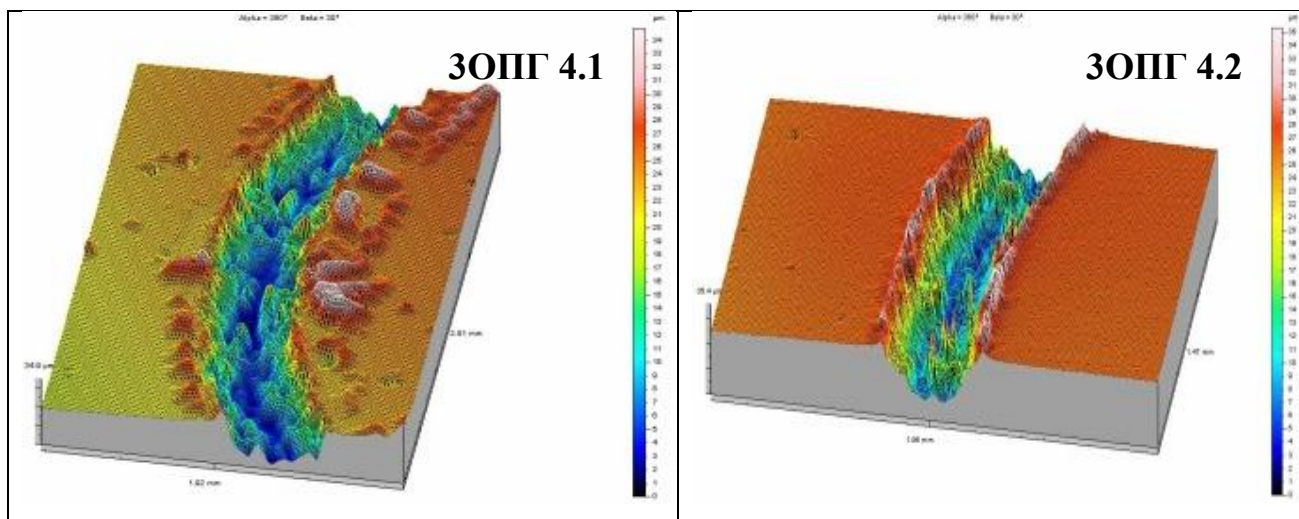


Рисунок 22. Поверхность образцов со следом индентора.

Из рисунка 18 видно, что увеличение рабочего давления снижает коэффициент трения для всех покрытий. Плёнки, полученные при распылении графита марки АГ-1500, обладают наименьшим коэффициентом трения ($\mu=0,15$), он на 25% меньше, чем у покрытий марки МГ-1 ($\mu=0,2$), на 39% меньше, чем покрытия марки МПГ-6 ($\mu=0,22$) и на 208% меньше, чем покрытия марки ЗОПГ ($\mu=0,49$). Данный эффект можно объяснить различной ориентацией атомов углерода в покрытии. Это согласуется с результатами измерения износа плёнки, показанными на рис. 19, 21, 22.

Наибольшим коэффициентом трения, а также максимальным износом обладают плёнки, полученные при распылении мишени марки ЗОПГ. Коэффициенты трения и износ плёнок, полученных из мишеней марок МПГ-6 и МГ-1, имеют схожие значения.

3.3. Состав плёнок

Спектры Рамановского рассеивания образцов представлены на рисунках 23, 24.

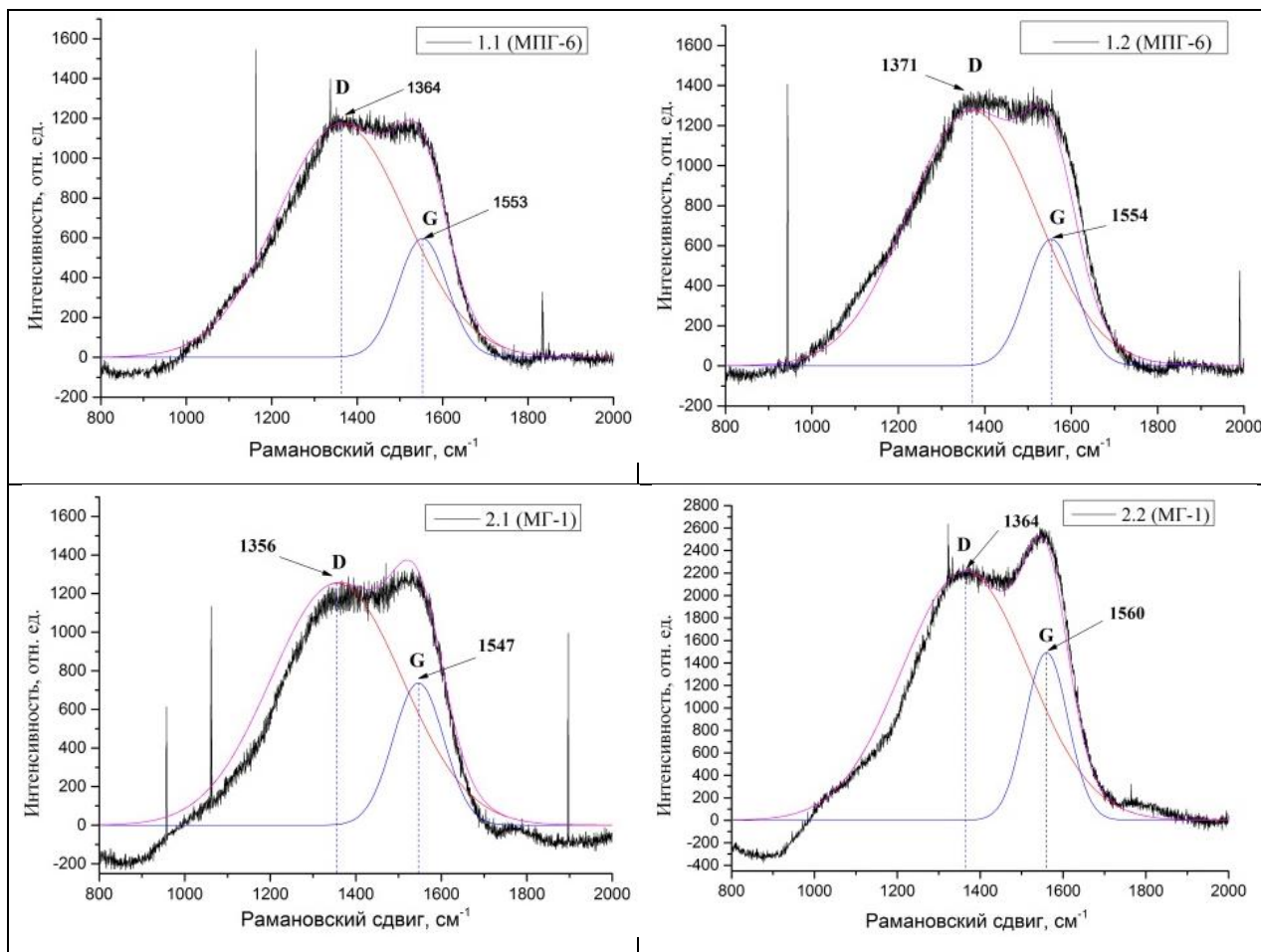
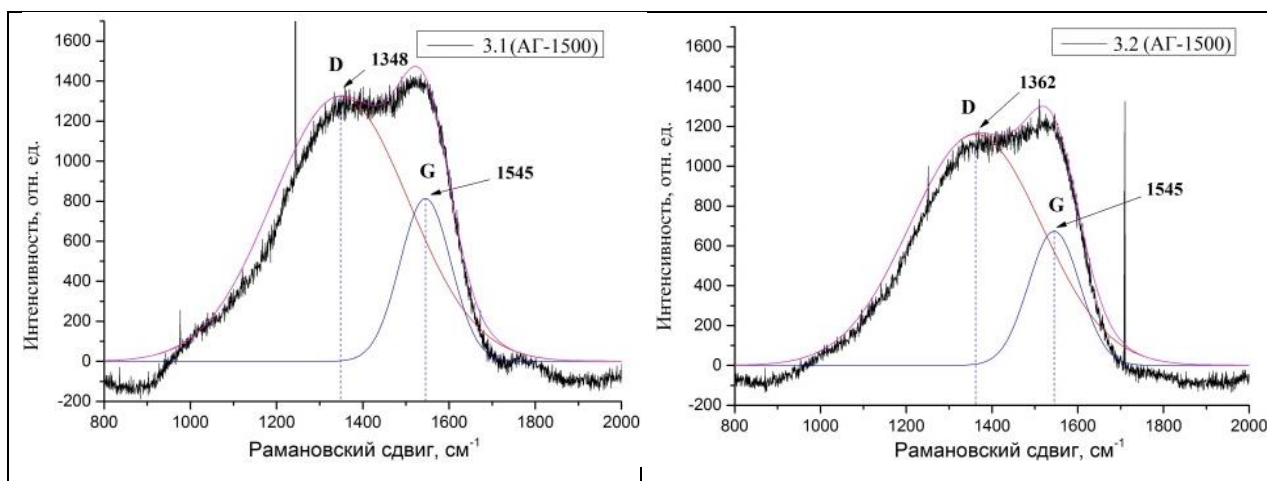


Рисунок 23. Спектр Рамановского рассеяния.



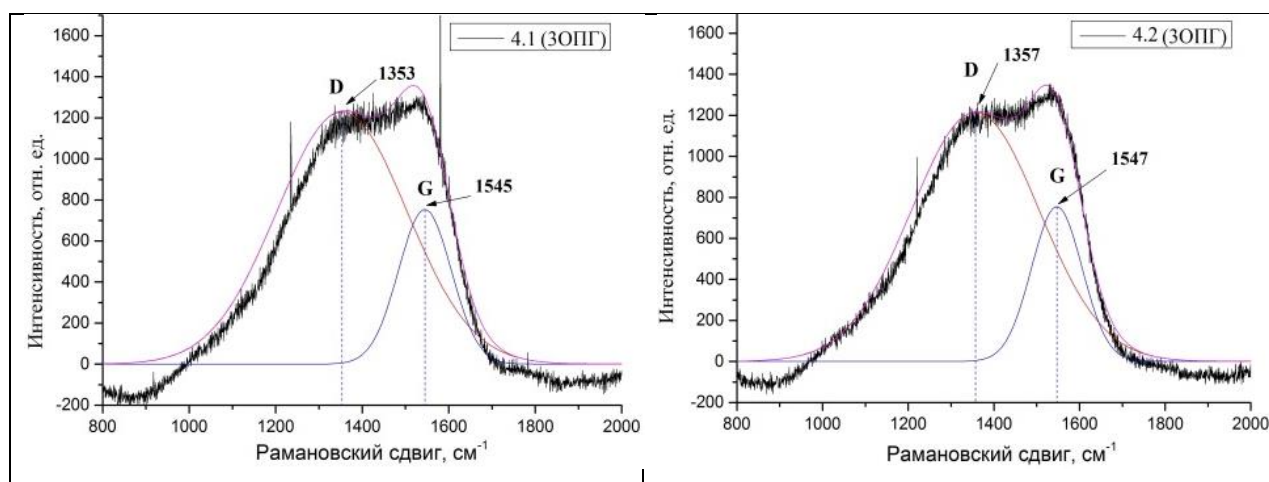


Рисунок 24. Спектр Рамановского рассеяния.

Обработка полученных данных производилась путем разложения спектра на две гауссовы компоненты G (graphite) и D (disorder defects), которые находятся в областях $1530 - 1580 \text{ см}^{-1}$ и $1340 - 1470 \text{ см}^{-1}$ соответственно (рис. 23, 24).

Таблица 5. Параметры разложения спектров Рамановского рассеяния.

Марка	МПГ-6		МГ-1	
Образец	1.1	1.2	2.1	2.2
Положение D пика	1363,75	1370,835	1355,647	1364,245
Ширина D пика	354,8016	348,2389	361,7171	360,2177
Высота D пика	1172,476	1276,01	1253,696	2214,091
Площадь D пика	442814,4	473002,6	482718,1	848970,5
Положение G пика	1552,913	1553,847	1546,573	1560,274
Ширина G пика	135,9532	135,5195	139,7652	121,5208
Высота G пика	597,0132	633,3034	737,2525	1492,5
Площадь G пика	86398,39	91357,83	109685	193062,1
Марка	АГ-1500		ЗОПГ	
Образец	3.1	3.2	4.1	4.2
Положение D пика	1348,329	1361,913	1353,289	1356,823
Ширина D пика	371,0932	361,9443	354,1416	351,6739
Высота D пика	1324,339	1160,498	1228,539	1214,874
Площадь D пика	523135,8	447114,1	463124,7	454782,4
Положение G пика	1545,333	1544,991	1544,908	1546,996
Ширина G пика	138,9618	140,8631	143,7631	138,5949
Высота G пика	813,8845	673,9375	753,0658	754,6163
Площадь G пика	120390	101052,9	115242,4	111328,3

Результат исследования структуры покрытий методом Рамановской спектроскопии представлен на рисунке 25.

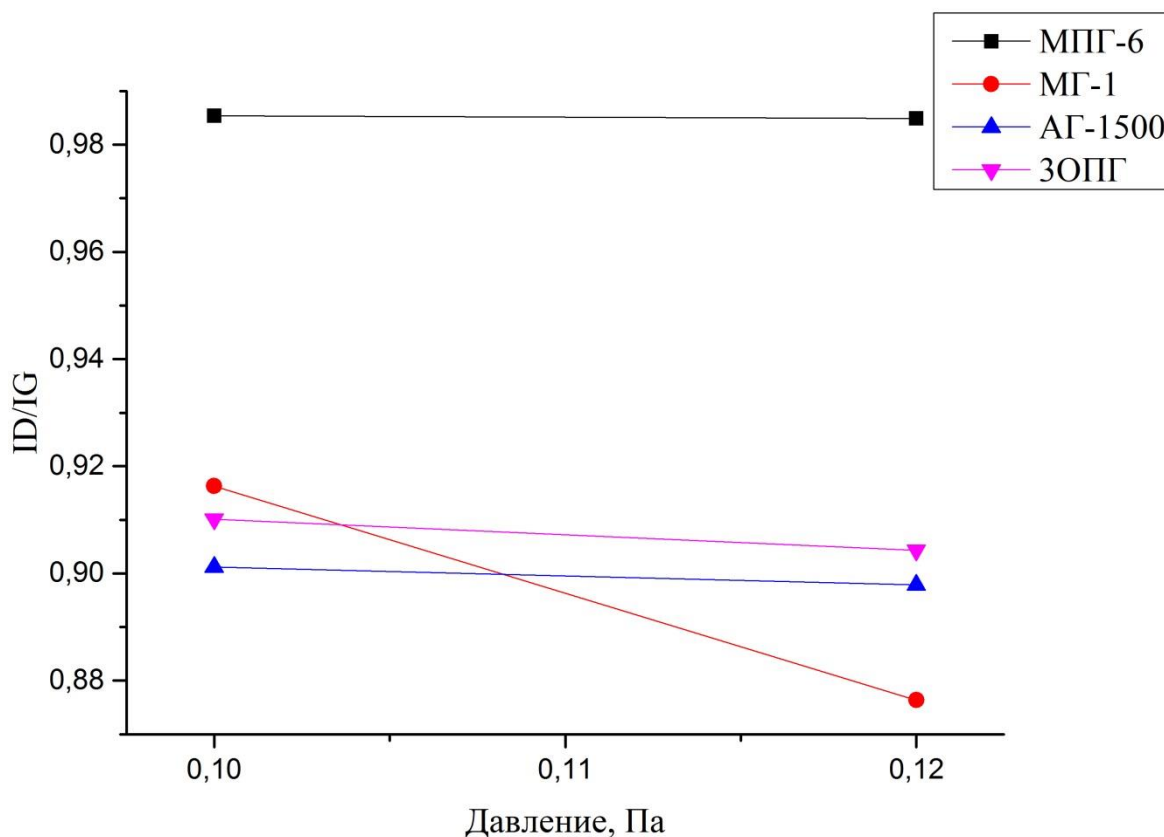


Рисунок 25. Параметры Рамановских спектров полученных покрытий.

Графит с совершенной кристаллической макроструктурой имеет лишь одну линию (G) первого порядка при 1582 см^{-1} . G-тип колебаний молекул графита формируется атомами углерода, находящимися в sp^2 -состояниях и расположенными в плоскости графитовых сеток. В спектре графита, имеющего дефекты графеновых слоёв, а также в случае, когда размер кристаллитов или доменов мал, присутствуют дополнительные линии в области 1355 см^{-1} - D. Амплитуда и суммарная интенсивность D-линии может существенно меняться относительно основной линии. Интенсивность D-линии строго связана с долей шестичленных (ароматических) углеродных колец. Если ароматические кластеры малы, то положение максимума смещается в область более высоких частот; при уменьшении количества неискаженных ароматических колец, например, при переходе нанокристаллического графита в аморфный углерод,

частота и интенсивность D-максимума уменьшается. Присутствие в графеновых слоях не только шестичленных углеродных колец также снижает амплитуду D-пика и увеличивает его ширину. Ширина D-линии более четко коррелирует со степенью разупорядоченности молекулярной структуры по сравнению с величинами смещения частоты D- и G- линий, поскольку положение первой (G-линии) из них достаточно стабильное, а второй (D-линии) – определяется не только уровнем карбонизации вещества, но и в ряде случаев присутствием примесных элементов.

Для анализа структуры плёнки используют такой параметр как отношение интенсивностей пиков ID/IG – меняется от 0 до 3,5. Неопределенность в практическом использовании параметра состоит в том, что для слабоупорядоченных веществ его значение может быть меньше, чем для относительно сильно упорядоченных, поскольку для первых пик D очень широкий, но его интенсивность не слишком большая.

Из полученных данных, изображенных на рисунке 25, видно, что плёнки, полученные распылением графита марок МПГ-6, ЗОПГ, АГ-1500, имеют интенсивность G-пику, равную 1200 отн. ед, и лежащую в области 1523 см⁻¹ Рамановского смещения. Образцы находятся на стадии перехода нанокристаллического графита в аморфный углерод, когда в графеновых слоях появляются дефекты, а в конце стадии наступает полная деформация слоев и наряду с шестичленными кольцами появляются кольца с другим количеством атомов углерода, доля sp³-фазы углерода может повыситься до 20 % [5].

Исследование твёрдости и модуля упругости полученных покрытий показали, что их значения уменьшаются с ростом давления. Это связано с изменением sp³-фазы в покрытии, что убедительно показано с помощью Рамановской спектроскопии.

Плёнки марки МГ-1 получились с различными положениями и интенсивностями пиков. Первый (при давлении 0,1 Па) образец обладал интенсивностью G-пика, равной 1371 отн. ед., при Рамановском смещении 1516 см⁻¹, в то время как G-пик второго (при давлении 0,12 Па) образца сместился до

1540см^{-1} и обладал интенсивностью, равной 2527 отн. ед. Параметры первого образца объясняются тем, что произошел переход от нанокристаллического графита в аморфный углерод (характерный факт при одновременном уменьшении интенсивности и смещения). Для второго образца можно (по анализу работы других ученых) утверждать, что произошло повышение в графите доли аморфного углерода, углерод sp^2 -гибридизации переходит из колец в цепочки и растёт фаза sp^3 -гибридизации, которая может достигать 85%, т.к. положение максимума смещается к 1540 см^{-1} (связи цепочек короче колец, а, следовательно, их колебания выше), отношение интенсивностей ID/IG резко уменьшилось.

Изменение твёрдости данных покрытий напрямую согласуется с изменением ID/IG параметра из которого видно, что при давлении 0,12 Па произошло увеличение sp^3 -фазы, которая отвечает за алмазную структуру.

Полученные значения соотношений ID/IG хорошо сочетаются со значениями твердости углеродных покрытий. Видно, что самые маленькие значения ID/IG соответствуют рабочим давлениям, при которых получены наиболее твердые покрытия. Следовательно, наиболее твердые покрытия содержат большую концентрацию sp^3 .

Все полученные пленки имеют достаточно низкий коэффициент трения (0,1-0,3), за исключением образцов мишени ЗОПГ (0,5), что зависит от твёрдости полученных покрытий, .

По виду спектра все исследованные покрытия можно отнести к классу аморфного углерода (a-C) [5].

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Углеродные покрытия представляют собой наноразмерную тонкопленочную структуру, которую наносят на поверхность различных материалов. Основная функция такого рода покрытий – повышение износостойкости и, как следствие, увеличение времени работы рабочего инструмента. В связи с этим, актуальным становится исследование факторов, влияющих на свойства покрытий, для получения желаемых покрытий.

4.1. Предпроектный анализ

Настоящая работа посвящена исследованию зависимости свойств плёнок аморфного углерода от марки материала распыляемой мишени при помощи дуальной магнетронной распылительной системы. На сегодняшний день произведено немало работ, целью которых является исследование факторов влияющих на свойства плёнок. Такими факторами могут быть режимы осаждения, конфигурации магнитного поля, электрического питания. Однако в научной литературе недостаточно информации о влиянии на свойства плёнок самой марки графитовой мишени.

Основные потребители данной технологии: большие машиностроительные компании, имеющие свои собственные производства, компании по производству различных деталей и механизмов, режущего и сверлящего инструмента, частные заказчики, желающие заниматься инновационными технологиями и проектами.

4.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных решений целесообразно проводить при помощи оценочной карты, для этого были определены 2 конкурента на рынке.

В качестве объектов сравнения были выбраны следующие: технология осаждения с помощью планарных магнетронных источников ($B_{к1}$), технология химического осаждения ($B_{к2}$).

Основные критерии следующие:

- относительно низкие затраты на производство;
- экологичность;
- безопасность;
- простота эксплуатации;
- повышенный срок эксплуатации;
- высокая функциональная мощность
- относительно низкая цена.

Эти факторы предопределяют выбор того или иного технического решения. Обеспечение таких высоких показателей свидетельствует о большом потенциале научно-технической разработки.

Расчет показателя конкурентоспособности производился по следующей формуле:

$$K = \sum_i B_i \cdot V_i, \quad (4)$$

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

Таблица 6. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок).

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	$B_{к1}$	$B_{к2}$	K_{ϕ}	$K_{к1}$	$K_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							

1. Экономичность	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
2. Экологичность	0,2	5	3	3	1	0,6	0,6
3. Надежность	0,07	5	4	3	0,35	0,28	0,21
4. Безопасность	0,15	5	3	3	0,75	0,45	0,45
5. Простота эксплуатации	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,07	5	4	3	0,35	0,28	0,21
2. Уровень проникновения на рынок	0,07	4	5	5	0,28	0,35	0,35
3. Цена	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
5. Финансирование научной разработки	0,03	4	5	4	0,12	0,15	0,12
6. Срок выхода на рынок	0,04	5	4	4	0,2	0,16	0,16
Итого	1	53	44	40	4,9	3,75	3,48

Согласно вышеприведенному расчету видно, что предлагаемая нами технология осаждения углеродных покрытий имеет более высокий показатель конкурентоспособности (4,9). Это обусловлено следующим рядом факторов: технология компактна и энергоэкономична, обладает высокой помехоустойчивостью, проста в эксплуатации и надежна. Что связано с принципом построения технологической линии, используемыми физическими принципами и наличием большого опыта по разработке технологий осаждения тонкопленочных структур. Суммарно это позволяет существенно снизить количество недостатков технологии и повысить число ее конкурентных преимуществ.

4.3. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Целью SWOT-анализа является определение всех сильных и слабых сторон научной разработки, которые рассматриваются как внутренние факторы, а также изучение внешних факторов, каковыми являются рыночные возможности и угрозы, для получения четкого представления основных направлений развития предприятия. На основе такого исследования организация должна максимально использовать свои сильные стороны, попытаться преодолеть слабости, воспользоваться благоприятными возможностями и защититься от потенциальных угроз.

Он проводится в несколько этапов.

1) Сильные стороны проекта.

Исходя из результатов исследования углеродных покрытий, был сделан вывод, что данные покрытия можно использовать в широком функциональном диапазоне по сравнению с их аналогами. Кроме того они абсолютно безвредны, как и методика их получения (полностью экологична). Так же свойства данных покрытий ничуть не уступают аналогам.

2) Слабые стороны проекта.

К сожалению, данный проект находится на начальной стадии. Одним из важных минусов, замедляющих рост проекта, является отсутствие достаточной денежной поддержки со стороны университета и нехватка работников. Так же покрытия исследуются устаревшими методами, что ведет к неточности и редкой повторяемости нужного результата. Это затрудняет движение проекта в сторону коммерциализации. На данный момент конкуренты используют наиболее новую технику для получения и исследования углеродных покрытий.

3) Возможности.

При нехватке заграничного товара с повышенным ресурсом работы, наш товар смог бы удовлетворить спрос российского рынка при должном финансировании. Кроме того сейчас наиболее популярным являются разработки, связанные с биотехнологиями, что может повысить спрос на наш товар из-за его свойств.

4) Угрозы.

Опасным для нашего проекта является заполнение российского рынка товарами конкурирующих сторон и завоевание полного доверия потребителей. В связи с этим руководство может потерять интерес к развитию данного проекта и уменьшить финансирование. Так же одной из угроз являются проблемы с техническим оборудованием, вывод, из строя которого останавливает процесс исследования.

Таблица 7. SWOT-анализ.

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Широкий функционал использования; С2. Экологичность технологии и продукта; С3. Более простая методика получения; С4. Квалифицированный персонал; С5. Полная подготовка требуемого оборудования заказчику; С6. Соответствие заявленным свойствам продукта.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Проект находится на начальной стадии; Сл2. Отсутствие достаточной денежной поддержки; Сл3. Нехватка квалифицированных рабочих кадров; Сл4. Использование устаревшей техники для исследования; Сл5. Отсутствие потенциальных потребителей; Сл6. Долгая доставка комплектующих установки при поломке оборудования.
Возможности:		
В1. Импортозамещение на российском рынке;	1.Получение результатов НТИ	1.Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др.
В2. Появление спроса на товар из-за стремления к инновациям;	2.Продвижение НТИ на рынок 3. При использовании научно-исследовательских	2. Повышение квалификации кадров у потенциальных

В3. Использование инновационной структуры ТПУ;	достижений ТПУ можно улучшить качество продукции. 4. Повышение экономичности и технологичности производства.	потребителей 3. Приобретения необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ 4. Сокращение поставок или смена поставщика
В4. Повышение стоимости конкурентных разработок;		
В5. Использование инфраструктуры ОЭЗ ТВТ Томск.		
Угрозы:		
У1. Отсутствие спроса на данный продукт;	1. Продвижение НТИ с целью создания спроса 2. Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др. 3. Сертификация и стандартизация продукта	1. Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др. 2. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей 3. Приобретение необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ 4. Сокращение поставок или смена поставщика 5. Продвижение НТИ с целью создания спроса
У2. Отсутствие интереса руководства к данному исследованию;		
У3. Уменьшение финансирования исследования;		
У4. Более современная научно-техническая база конкурентов;		
У5. Отсутствие оборудования для выполнения исследования.		

Можно сделать вывод, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия сотрудничества с ОЭЗ ТВТ Томск, получение грантов, а также проведение совместной предпринимательской деятельности. Совместная предпринимательская деятельность – это стратегия, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей. Эта стратегия выбрана, так как необходимо найти стабильный рынок заказов и сбыта товара.

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

4.4. План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта.

Линейный график представляется в виде таблицы 8.

Таблица 8. Календарный план проекта.

№	Название	Длительность, дни	Участники
1	Составление технического задания	1	Руководитель
	Изучение литературы	80	Студент
	Подготовка установки к работе	4	Руководитель
2	Подготовка подложек	20	Студент
3	Подбор режимов нанесения покрытий	2	Студент
4	Получение покрытий	60	
5	Исследование механических свойств покрытий	7	Инженер
6	Исследование структуры покрытий	60	
7	Описание полученных результатов	30	Студент
8	Подготовка отчетов	120	Студент

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы 9 с разбивкой по месяцам и промежуткам в 15 дней за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 9. Календарный план-график проекта по теме.

№	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																	
				сен		окт		ноя б		дек		янв		фев р		мар т		апр		май	
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Составление технического задания	Руководитель	1																		
2	Изучение литературы	Студент	80																		
3	Подготовка установки к работе	Руководитель	4																		
4	Подбор режимов нанесения покрытий	Студент	2																		
5	Получение покрытий	Студент	60																		
6	Исследование механических свойств покрытий	Инженер	7																		
7	Исследование структуры покрытий	Инженер	60																		
8	Описание полученных результатов	Студент	30																		
9	Подготовка отчета о проделанной работе	Студент	120																		

 - студент  - руководитель  - инженер

4.5. Бюджет научного исследования

Расчет сметы затрат необходим для определения себестоимости НТИ. В плановую себестоимость НТИ включаются все затраты, связанные с ее выполнением, независимо от источника их финансирования. Смета затрат является основным документом, на относительно которого производят планирование и учет затрат на выполнение НТИ.

Для формирования бюджета научного исследования необходимо затраты представить по статьям расходов.

Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты:

Расчет стоимости материальных затрат производился по действующим прейскурантам (табл. 10). В стоимость материальных затрат включены транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 10. Сырье и материалы.

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Титановый катод	BT1-0	1	10000	10000
Баллоны	Ag	1	6000	6000
Нержавеющая сталь	12x18н10т	1	250	250
Углеродный катод	МПГ-6	2	500	1000
Углеродный катод	МГ-1	2	350	700
Углеродный катод	АГ-1500	2	2000	4000
Углеродный катод	ЗОПГ	2	800	1600
Всего за материалы				23550
Транспортно-заготовительные расходы (3 – 5%)				1200
Итого по статье				24727,5

Специальное оборудование для научных работ

В данную статью включены все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по данной теме. Определение стоимости спецоборудования производилось по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного научного проекта, учитывалась в виде амортизационных отчислений. Сумма амортизации за один год рассчитывается по формуле:

$$A_{\text{год}} = \frac{F_{\text{п}} * a}{100\%}, \quad (5)$$

где $F_{\text{п}}$ - первоначальная стоимость оборудования, a – норма амортизации, рассчитываемая по формуле:

$$a = \frac{1}{t} * 100\%. \quad (6)$$

Здесь t – это срок полезного использования установки.

Первоначальную стоимость установки для нанесения покрытий можно оценить в 400000 руб, а срок полезного использования 20 лет, тогда годовая сумма амортизационных отчислений – $A_{\text{год}} = \frac{400000 * 5}{100\%} = 20000$ руб.

В рамках данного исследования установка использовалась в течение 62 дней, поэтому сумма амортизации за 62 дней составит:

$$A = \frac{20000 * 62}{219} = 5662 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы. Баланс рабочего времени и расчет основной заработной платы представлены в таблице 11 и 12, соответственно.

Таблица 11. Баланс рабочего времени.

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер	Студент
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней	118	118	118

Потери рабочего времени	28	28	52
Действительный годовой фонд рабочего времени	219	219	195

Месячный должностной оклад работника (Z_m) равен:

$$Z_m = Z_6 \cdot k_p, \quad (7)$$

который в свою очередь складывается из базового оклада (Z_6 , руб.) и коэффициента: k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска). В ТПУ система премирования и начисления доплат и надбавок работает при выполнении договорного плана. По результатам нашего исследования премирования предусмотрено не было.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (8)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 рабочих дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочих дней (таблица 11).

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) на предприятии рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (9)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника, руб; $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, рабочие дни; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, рассчитываемая по формуле 8, руб.

Таблица 12. Расчет основной заработной платы.

Исполнители	Z_6 , руб.	K_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	25286	1,3	32872	1494	5	7470

Инженер	14874	1,3	19336	878	67	58889
Студент	1800	1,3	2340	90	108	9720

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы (табл. 12). Таким образом, сумма основной заработной платы участников проекта и дополнительной будет составлять статью затрат расходов на зарплату:

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (10)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб., $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} * Z_{осн}, \quad (11)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты.

Таблица 12. Заработная плата исполнителей НТИ.

Исполнители	Руководитель	Инженер	Студент
Основная зарплата, руб.	7470	58889	9720
Дополнительная зарплата, руб.	1121	8824	-
Зарплата исполнителя, руб.	8591	67722	9720
Итого по статье $C_{зп}$, руб.	86033		

Отчисления на социальные нужды

Отчисления на социальные нужды (30% от статьи заработной платы) составили 11447 рублей.

Накладные расходы

В эту статью включены затраты на управление и хозяйственное обслуживание и расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту

оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. Что порядка 16% от затрат на заработную плату всех участников проекта. Суммарно накладные расходы составляют 13765 рублей.

Работа со сторонними организациями, научные и производственные командировки не производились.

Бюджет научного исследования составил 141634,5 руб. (табл. 13).

Таблица 13. Бюджет научного исследования.

Статья расходов	Сумма, руб.
Сырье, материалы	24727,5
Зарплата	86033
Отчисления на социальные нужды	11447
Накладные расходы	13765
Затраты на специальное оборудование	5662
Итого	141634,5

Таким образом, статья расходов на сырье материалы составила 24727,5 руб. Затраты на специальное оборудование 5662 руб. Общий бюджет заработной платы всех участников проекта 86033 руб. Отчисления на социальные нужды – 11447 руб. Накладные расходы, включающие в себя текущий ремонт и др., затрачено 13765 руб. Общий бюджет, включая все вышеперечисленные статьи расходов, составил 141634,5 руб.

4.6. Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основании расчета интегрального показателя эффективности научного исследования, что связано с определением финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Его определение основано на двух средневзвешенных величинах – финансовая эффективность и ресурсоэффективность. Другими словами, нам следует определить, насколько эффективна разработка, проведенная в данной работе, и есть ли пути повышения эффективности для ее улучшения.

Интегральный финансовый показатель разработки следующий:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{\max}}, \quad (12)$$

где I_{Φ}^p – интегральный финансовый показатель разработки; Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения; $\Phi_{\max}$ – максимальная стоимость исполнения научно- исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получим в ходе оценки затрат двух конкурентных решений, которые мы анализировали в п. 4.2.

В качестве объектов сравнения были выбраны следующие: технология осаждения с помощью планарных магнетронных источников (B_1), технология химического осаждения (B_2).

Таблица 14. Интегральный финансовый показатель разработок.

№	B	B₁	B₂
Φ_{pi}	141635	140387	311970
I_{Φ}^p	0,454	0,45	1

Таким образом, наиболее экономичное техническое решение – технология осаждения с помощью планарных магнетронных источников (B_1), которая уступает по ряду других характеристик (см. табл. 6).

Следующий параметр оценки сравнительной эффективности исследования – интегральный показатель ресурсоэффективности для текущего проекта и аналогов – определим по следующим формулам:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a \text{ и } I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p, \quad (13)$$

где $I_m^{a,p}$ – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов; a_i – весовой коэффициент i -го параметра; b_i^a и b_i^p – балльная оценка i -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания; n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 15. Сравнительная характеристика вариантов исполнения проекта.

Объект исследования Критерий	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
Экономичность	0,2	5	3	4
Экологичность	0,2	5	5	4
Безопасность	0,3	3	3	2
Простота эксплуатации	0,3	4	4	2
Итого	1	17	15	12
Интегральный показатель ресурсоэффективности		4,1	3,7	2,8

Интегральный показатель эффективности разработки и аналогов определяется на основании подсчитанных интегральных показателя ресурсоэффективности и финансового показателя по формулам:

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{I_m^p}{I_{\text{ф}}^p}, \quad I_{\text{финр}}^a = \frac{I_m^a}{I_{\text{ф}}^a}, \quad (14)$$

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

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a}, \quad (15)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ – сравнительная эффективность проекта; $I_{\text{финр}}^p$ – интегральный показатель эффективности разработки; $I_{\text{финр}}^a$ – интегральный показатель эффективности аналога.

Расчет сравнительной эффективности проекта представлен в таблице 16.

Таблица 16. Сравнительная эффективность разработки.

№ п/п	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый	0,45	1	0,454

	показатель			
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	3,7	2,8	4,1
3	Интегральный показатель эффективности	8,2	2,8	9
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,1	3,2	

Анализируя сравнительную эффективность всех вариантов исполнения, можно сказать, что текущая разработка – наиболее эффективна. Финансовые затраты проекта незначительно выше, чем для аналога 1, однако по показателю ресурсоэффективности она значительно его превосходит.

Вывод по главе 4

В данной главе была проанализирована и рассчитана экономическая эффективность научного исследования.

Проанализирован целевой рынок и произведено сегментирование потенциальных покупателей разрабатываемых технологий или готового продукта. Также проведен SWOT-анализ и составлена итоговая матрица SWOT-анализа. Приведен план проекта и рассчитан бюджет научного исследования, плановая себестоимость НТИ которого составляет 141635 руб.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенный научно-исследовательский проект имеет не только научную новизну, но и заявляет о своей экологичности, энергоэффективности и экономической эффективности.

5. Социальная ответственность

В современных условиях труда для снижения производственного травматизма и профессиональной заболеваемости важным является внедрение системы целенаправленных действий по защите и охране труда на всех стадиях производственного процесса.

В данной работе эксперимент производился на вакуумной установке, состоящей из источника электромагнитного излучения, ЭВМ, баллонов с газами аргон и азотом, форвакуумного пластинчато-роторного и турбомолекулярного насосов, и блоков питания высокого напряжения. Следовательно, для внедрения определенных правил и мер предосторожности требуется разработать комплекс мероприятий технического, организационного, режимного и правового характера, минимизирующих негативные последствия.

5.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов

Согласно [34] при работе с вакуумной установкой и ПЭВМ на сотрудников могут воздействовать опасные и вредные факторы, приведенные в таблице 17.

Таблица 17. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Наименование видов работ	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с ЭВМ, работа на вакуумной	Повышенный уровень воздействия электромагнитного излучения		СанПиН 2.2.2.542-96

установке		Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	Повышенный уровень шума		ГОСТ 12.1.029-80
		Пожаровзрывоопасность (сосуды, находящиеся под высоким давлением)	ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) ССБТ; ПБ 10-115-96; ГОСТ 12.2.085-82

На инженера, работающего с вакуумной установкой и ПЭВМ, воздействуют следующие факторы:

1. физические: температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, электромагнитное излучение, освещённость;
2. психофизиологические: физические перегрузки (статические, динамические), нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

5.2. Требования безопасности при работе на ПЭВМ и вакуумной установке

Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правил техники безопасности. Обучение персонала техник безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа, и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте.

Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

К работе с вакуумной установкой и всеми узлами данной установки допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющих медицинских противопоказаний, прошедших вводный инструктаж и инструктаж по безопасности труда на рабочем месте. К самостоятельной работе допускаются работники после специального обучения и проверки знаний правил электробезопасности, приобретенных навыков и безопасных способов выполнения работы с данной установкой, ознакомленные с инструкцией по эксплуатации прибора имеющие не менее II группы по электробезопасности и получившие допуск к работе с газовыми баллонами, работающими под давлением.

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.

При введении в эксплуатацию нового оборудования сотрудники, которые будут работать на нем, должны пройти внеплановый инструктаж по правилам эксплуатации и безопасной работе на данном оборудовании.

Организация рабочего места при работе на ПЭВМ

Управление установкой осуществляется с помощью ЭВМ. Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что

требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 26.

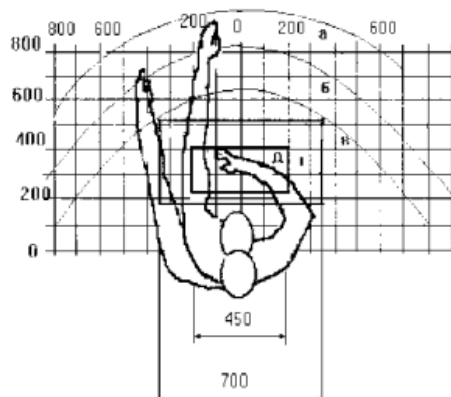


Рисунок 26. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке – зона легкой досягаемости ладони; в – оптимальное пространство для грубой ручной работы; г – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация – в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования. Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до

переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем. Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 градусов. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

Требования безопасности при работе на вакуумной установке

Перед началом работы на установке оператор обязан:

1. проверить у всех приборов и оборудования наличие надежного заземления;
2. проверить состояние соединительных кабелей, проводов, шлангов для подвода воды;
3. проверить наличие и состояние ограждений, предупредительных знаков и клапанов;
4. убедиться в готовности средств пожаротушения и средств оказания первой помощи.

Во время работы с установкой оператор обязан:

1. включить электропитание установки;
2. открыть воду системы охлаждения диффузионных насосов;
3. включить механический насос;
4. включить и вывести на рабочий режим диффузионные насосы;
5. произвести загрузку и откачку вакуумной камеры;
6. выполнить цикл обработки образцов.

После окончания работы оператор обязан:

1. закрыть вакуумную камеру и произвести ее откачку;
2. остудить и выключить диффузионные насосы;
3. выключить механический насос;
4. отключить электропитание установки;
5. перекрыть воду системы охлаждения.

5.3. Условия безопасной работы на вакуумной установке и ПЭВМ

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум и вибрация, излучение, освещённость.

Микроклимат помещения играет большую роль в здоровье сотрудника. При работе с установкой приходится проводить много времени в данном помещении. Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с и приведены в таблице 18.

Таблица 18. Оптимальные и допустимые параметры микроклимата.

Период года	Температура °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23–25	40–60	0,1
Теплый	23–25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция. Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемом помещении

регулируются системой центрального отопления и системой кондиционирования воздуха, установленной в помещении, и имеют следующие значения: влажность – 40 %, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20–25 °С, зимой – 20–25 °С. В помещении осуществляется естественная и механическая вентиляция. Воздух поступает и удаляется вентиляцию, окна, двери.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне

При работе механических и электромеханических изделий часто возникают шумы и вибрации. Шумы и вибрации, возникающие при работе вакуумной установки, связаны с вращением движущихся частей форвакуумного насоса.

В соответствии с [35] допустимый уровень шума при работе, требующей сосредоточенности, работе с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами на рабочих местах в помещениях лабораторий с шумным оборудованием, составляет 75 дБ. Следовательно, средства и методы защиты от шума должны обеспечивать уровень шума на рабочем месте не выше 75 дБ. Зоны с уровнем звука 80 дБ должны быть обозначены знаками безопасности согласно [35,36].

Снижение шума, воздействующего на человека на рабочих местах до значений, не превышающих допустимые, достигается применением средств и методов коллективной защиты, применением средств индивидуальной защиты. Работая в шумоопасных зонах, администрация снабжает средствами индивидуальной защиты, которыми являются специальные наушники,

вкладыши в ушную раковину, противошумовые каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения звука.

Согласно [37] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 25 нТл.

Конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Дисплей ЭВМ являются источником электромагнитного излучения. Так же управление установкой характеризуется монотонностью работы и умственным перенапряжением. Нервно-психические перегрузки приводят к переутомляемости, снижению внимания и могут привести к ухудшению здоровья человека. При регулярной непрерывной работе с компьютером могут возникать заболевания органов зрения, сердечно-сосудистой системы и желудочно-кишечного тракта.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

5.4. Электробезопасность

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества. Безопасной для человека является величина переменного тока — 10 мА, постоянного — 50 мА, безопасное напряжение 12 В.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ или другими электрическими приборами и установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Характер и последствия поражения зависят от величины, частоты и пути прохождения тока; продолжительности воздействия.

При работе на ПЭВМ существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта электрических приборов;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции);

- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании.

Работа установки предполагает использование высокого напряжения блока питания разряда (до 1 кВ, ток до 5 А) и напряжения сети 380\220 В, которое необходимо для питания электродвигателей форвакуумных насосов, электрических измерительных систем и других элементов установки, может привести к поражению электрическим током. Источником поражения электрическим током могут быть незащищенные и неизолированные электропровода, поврежденные электродвигатели, открытые коммутаторы, не заземленное оборудование и др. Проходя через живые ткани, электрический ток оказывает термическое, электролитическое и биологическое воздействия. Это приводит к различным нарушениям в организме, вызывая как местное поражение тканей и органов, так и общее поражение организма [38]. Самый опасный – переменный ток частотой 50 – 60 Гц.

Электрозащитные средства – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. Их выбирают с учетом требований безопасности для данного вида работ. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена, применяют средства индивидуальной защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть сблокированы с устройствами,

- отключающими рабочее напряжение при снятии; – изолирующие устройства и покрытия;
- устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;
- устройства дистанционного управления;
- предохранительные устройства и др.

В соответствии с инструкцией [37], ПУЭ для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала необходимо предусмотреть:

- защитное заземление всех металлических нетоковедущих частей электрооборудования $R_3 \leq 4 \text{ Ом}$;
- раздельное размещение аппаратуры с напряжением до 1000 В и свыше 1000 В;
- ограждение электронного источника, исключающее возможность прикосновения к токоведущим частям;
- полное ограждение от прикосновения к аппаратуре с напряжением выше 1000 В;
- отключение всех источников питания установки общим рубильником.

При поражении работника электрическим током необходимо:

1. освободить пострадавшего от действия электрического тока и оценить состояние пострадавшего;
2. вызвать скорую медицинскую помощь или врача, либо принять меры для транспортировки пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение;
3. если пострадавший находится в сознании, но до этого был в состоянии обморока или продолжительное время находился под действием тока, ему до прибытия врача необходимо обеспечить полный покой и в дальнейшем медицинское наблюдение в течение 2-3 часов;
4. если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но с сохранившимся дыханием, его следует ровно и удобно положить,

расстегнуть одежду, создать приток свежего воздуха и обеспечить полный покой, дать понюхать нашатырный спирт. Если пострадавший плохо дышит, необходимо сделать искусственное дыхание и непрямой массаж сердца;

5. при отсутствии признаков жизни (отсутствие дыхания, пульса, реакции зрачка на свет) нельзя считать пострадавшего мертвым. Ему должна быть оказана первая медицинская помощь в виде искусственного дыхания и непрямого массажа сердца. Искусственное дыхание и непрямой массаж сердца следует делать непрерывно до прибытия врача;

6. переносить пострадавшего в другое место следует только в тех случаях, когда ему или лицу, оказывающему помощь, продолжает угрожать опасность или когда оказание помощи на месте невозможно.

5.5. Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [39] помещение, в котором производится работа с вакуумной установкой и прочими ее узлами относится к категории «В», т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами.

Для получения экспериментальных образцов требуется газ аргон (Ar), который находится в баллонах под высоким давлением. Наполненный сжатым газом баллон обладает большой энергией, и если в нем образуется отверстие, то газ истекает из него с критической скоростью. Разрушение баллонов может явиться причиной взрыва образовавшейся в нем взрывной среды. При утечке газа из баллона возможно удушье, отравление, а также возгорание и взрыв, поэтому необходимо знать и неукоснительно соблюдать правила пользования газовыми приборами.

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, находящихся под высоким давлением описаны в [38,39].

В целях безопасности, необходимо выполнение общих правил эксплуатации баллонов:

- баллоны должны быть установлены вертикально и надежно закреплены в таком положении металлическим хомутом, цепью, тросом и так далее, а также защищены от падения на них сверху каких либо предметов;
- баллоны с газом, устанавливаемые в помещениях должны находиться от радиаторов отопления и других отопительных приборов на расстоянии не менее 1 метра и от печей и других источников тепла с открытым огнем не менее 5 метров. При невозможности выдержать необходимое расстояние, необходимо применять защитные экраны, предохраняющие баллоны от местного разогрева, располагая баллон не ближе 0,1 м от экрана. Установленные баллоны также необходимо предохранять от действия солнечных лучей;
- выпуск газов из баллона должен производиться через редуктор, предназначенный исключительно для данного газа и окрашенный в соответствующий цвет. Камера низкого давления редуктора должна иметь манометр и пружинный предохранительный клапан, отрегулированный на соответствующее давление в емкости;
- во всех случаях открывать и закрывать вентиль баллона необходимо медленно.

Для обеспечения пожарной безопасности необходимо выполнение следующих требований:

- к работе в лаборатории допускаются лица, прошедшие инструктаж по противопожарной безопасности;
- ответственным за противопожарную безопасность является руководитель лаборатории;

- средства пожаротушения (огнетушители, находящиеся в каждой комнате лаборатории) должны быть в постоянной готовности и проходить своевременную техническую проверку;
- в лаборатории должен быть план эвакуации работников в случае пожара;
- в целях предупреждения ожогов запрещается курить, пользоваться открытым огнем, применять электронагреватели открытого исполнения и с несгораемым основанием;
- легко испаряющиеся горючие жидкости должны храниться в плотно закрытых сосудах, вдали от нагревательных приборов, в специально отведенных местах;
- уметь пользоваться средствами пожаротушения и своевременно применять их;
- уходя из лаборатории, отключать свет;
- в случае возникновения пожара звонить по телефону 01, сообщить о случившемся администрации университета, одновременно принять меры к ликвидации пожара с помощью первичных средств огнетушения (огнетушители), находящихся в корпусе.

Вывод по главе 5

В ходе рассмотрения безопасности труда при работе с вакуумной установкой были выявлены вредные и опасные факторы рабочей зоны, установлены допустимые значения вредных факторов, причины и средства защиты. Так же рассмотрены чрезвычайные ситуации и поведение в них. В целях практической работы, были определены оптимальные и допустимые параметры микроклимата для категории работ средней тяжести. Выявлено, что температура, влажность воздуха и скорость движения воздуха находятся в пределах допустимых значений.

Заключение

В данной работе были поставлены цель и задачи, произведен литературный обзор по темам: покрытий, полученных с помощью магнетронной распылительной системы; свойствам и методикам получения графитовых поверхностей; разработан эксперимент по получению необходимых образцов и произведен анализ свойств полученных покрытий.

Так как свойства покрытий (твёрдость, коэффициент трения и др.) сильно зависят от многих факторов их получения, была выдвинута идея о том, что одним из таких факторов являются не только рабочие параметры эксперимента, но и сам тип распыляемой мишени.

В результате проделанной работы можно сказать, что отличие свойств покрытий имеется.

Среди исследуемых марок графитовых мишеней, покрытия, полученные при распылении графита марки МПГ-6, являются наиболее твёрдыми, они на 7% твёрже покрытий марок МГ-1 и АГ-1500 и на 15% твёрже, чем покрытия марки ЗОПГ. Резкое изменение твёрдости для покрытий марки МГ-1 при разных давлениях, вызвано в связи с изменением внутренней структуры покрытия. Также с увеличением рабочего давления в камере, твёрдость и модуль упругости покрытий уменьшается. Всё это связано с изменением sp^3 -фазы в покрытии, что показано с помощью Рамановской спектроскопии.

Плёнки, полученные при распылении графита марки АГ-1500, обладают наименьшим коэффициентом трения, он на 25% меньше, чем у покрытий марки МГ-1, на 39% меньше, чем покрытия марки МПГ-6 и на 208% меньше, чем покрытия марки ЗОПГ. Данный эффект можно объяснить различной ориентацией атомов углерода в покрытии, различным составом графитовых мишеней.

Это говорит о том, что различный состав одного и того же распыляемого материала влияет на необходимые (исследуемые) свойства,

следовательно, распыляя мишени с различным составом можно добиться улучшения конкретных механических свойств, использовать более дешевые материалы.

Список публикаций

По теме бакалаврской работы опубликовано 2 доклада в рецензируемых изданиях:

1. Magnetron sputtering system / A.V. Lazarev, M.A. Andreeva, U.A. Smirnova // «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине»: сборник трудов VII международной научно-практической конференции. – Томск, 2015 – С. 209-210.

2. Dependence of mechanical properties of diamond-like coatings on parameters of power source / A. V. Lazarev, D. A. Zaitcev // «Перспективы развития фундаментальных наук»: сборник трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск, 2016 – Том 1. Физика, С. 145-147.

Список литературы

1. J. Robertson, Amorphous carbon, *Advances in Physics* 35 (4) (1986) 317-374.
2. B. Bhushan Chemical, mechanical and tribological characterization of ultrathin and hard amorphous carbon coatings as thin as 3.5 nm: recent developments, *Diamond and Related Materials* 8 (11) (1999) 1985-2015.
3. J.C. Tan, A.K. Cheetham, Mechanical properties of hybrid inorganic-organic framework materials: establishing fundamental structure-property relationships, *Chem. Soc. Rev.* 40 (2011) 1059-1080.
4. E. Staryga, G.W. Bak, Relation between physical structure and electrical properties of diamond-like carbon thin films, *Diamond and Related Materials* 14 (1) (2005) 23-34.
5. A.C. Ferrari, J. Robertson, Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon, *Physical Review B* 61 (2000) 14095-14107.
6. Gupta B.E. Synthesis, structure and properties of nanolayered DLC/DLC films, 2003.
7. J. Robertson, Deposition mechanisms for promoting sp^3 bonding in diamond-like carbon // *Diamond and Related Materials* – 1993. – №.2. – P. 984-989.
8. Hainsworth S.V., Uhure N.J. *Diamond-Like Carbon Coatings for Tribology: Production Techniques, Characterization Methods and Applications*.
9. Kouya OOHIRA. Characteristics and Applications of DLC films // NTN technical review – 2009. – №.77. – P. 90-95.
10. Соловьев А.А. Устройства со скрещенными электрическим и магнитным полями для нанесения тонкопленочных покрытий на подложки большой площади: диссертация / Институт сильноточной электроники. – Томск, 2007. С. 75, 147.
11. Y. Lifhsitz // *Diamond and Related Materials* – 1999. – №.8 – P. 1659-1676.

12. J.E. Field, The properties of Diamond, Academic Press, London, 1979.
13. B.T. Kelly, Physics of Graphite, Applied Science Publishers, London, 1981.
14. A. Grill, Electrical and optical properties of diamond-like carbon // Thin Solid Films – 1999. – P. 189-193.
15. Polyynes: synthesis, properties, and applications/ edit by Franco Cataldo. — CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. —506 p.
16. Aisenberg S. Ion beam deposition of thin films of diamond like carbon/S. Aisenberg, R. Chabot //J. Appl. Phys. 1971. V.42. P. 2953-2958.
17. Образцов А. Н. Фотоакустическая спектроскопия алмазных порошков и поликристаллических пленок/ А.Н. Образцов, Х. Окуши, Х. Ватанабе, И.Ю. Павловский // Физика твердого тела, 1997, Т. 39, No10, С.1787-1791.
18. Байдакова М. В. Получение алмазных пленок на кристаллическом кремнии методом термического газофазного осаждения /М. В. Байдакова А. Я. Вуль, В. Г. Голубев и др. //Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. No 6. С.651-657.
19. Евлашин С.А. Исследование оптических и автоэмиссионных свойств углеродных наностенок: диссертация / Издательство МГУ им. Ломоносова – Москва, 2014.
20. Poate J.M., Foti G., Jacobson D.C. Surface Modification and Alloying by Laser, Ion, and Electron Beams. - New York: Plenum Press, 1983. - 243 p.
21. Акишин А.И., Бондаренко Г.Г., Быков Д.В. и др. Физика воздействия концентрированных потоков энергии на материалы. – М.: Изд-во УНЦ ДО, 2004. 418 с.
22. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е., Стогней О.В. Новые направления физического материаловедения. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000. – 360 с.
23. J. Musil, P. Baroch, Discharge in Dual Magnetron Sputtering System // IEEE Transactions on Plasma Science – 2005. – №.2. – P. 338-339.

24. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы / Устройство, принцип работы, применение // Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана – Москва, 2009.
25. Society of Vacuum Coaters from the 44th (2001) SVC Annual Technical Conference Proceedings. A new generation of power supplies for large area dual magnetron sputtering // Vacuum Technology & Coating – 2002.
26. Юрьев Ю.Н. Свойства тонких плёнок оксида титана (TiO₂) и аморфного углерода (a-C), осаждённых с помощью дуальной магнетронной распылительной системы: автореф. дисс. на соиск. у. с. к. т. н. // [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://portal.tpu.ru/council/909/worklist>.
27. Приборы для измерения толщины покрытий CALOTEST // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.materials-lab.com.ua/?oid=4312>.
28. Прибор для определения толщины покрытий, устойчивости к износу, а также для определения качества адгезии покрытия к подложке СТ-01 / Руководство по эксплуатации. NCI-SwissNanocoat SA, Switzerland, 2014.
29. Сканирующие нанотвердомеры «НАНОСКАН» // [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.nanoscsan.info.
30. CSM Instruments SA, CSM Tribometers. Nano & Micro range for Tribological studies. // Advanced Mechanical Surface Testing.
31. Трёхмерный бесконтактный профилометр (Micro Measure 3D Station) // [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://portal.tpu.ru/departments/centre/cism/prib/measure-3d>.
32. Громилов С.А. Введение в рентгенографию поликристаллов / Учебно-методическое пособие // Издательство НГУ – Новосибирск, 2008.
33. Компания «NanoScanTechnology» // [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.nanoscantech.ru>.
34. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004.

- 35. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. – 1988.
- 36. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. – Москва: Стандартинформ, 2008.
- 37. Инструкция №22 по охране труда при работе с электроустановками лаборатории №23 НИИ ЯФ
- 38. ПБ 10-115-96. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – 1996.
- 39. ГОСТ 12.2.085-82. ССБТ. Сосуды, работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Требования безопасности. – 1982.