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

Институт **Энергетический (ЭНИН)**
Направление подготовки **13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника**
Кафедра **Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка плазмодинамического метода создания контактных медь-алюминиевых покрытий

УДК 669.2/3:621.791

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ4Е	Нафигин Николай Равильевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Грахова Е.А.			

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроснабжение промышленных предприятий	**Завьялов В.М.**	**д.т.н., доцент**		

Томск – 2016 г.

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

Институт **Энергетический (ЭНИН)**
Направление подготовки **13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника**
Кафедра **Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)**

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ЭПП
_____ _____**Завьялов В.М.**
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	**ФИО**
5АМ4Е	Нафигин Николай Равильевич

Тема работы:

Разработка плазмодинамического метода создания контактных медь- алюминиевых покрытий	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	04.02.2016 г. № 764/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.2016 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель. Конструктивные и энергетические параметры плазмодинамического синтеза. Алюминиевые контактные элементы.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; методика плазмодинамического нанесения меди на алюминий; потери мощности в контактном соединении проводников; экономический анализ проекта; исследование вредных и опасных факторов рабочего места; заключения по работе.
Перечень графического материала	Презентация

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	**Консультант**
Финансовый менеджмент	Грахова Е.А.
Социальная ответственность	Дашковский А.Г.
Иностранный язык	Хасаншин Ю.Р.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Введение

Методика проведения эксперимента

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	

Задание выдал руководитель:

Должность	**ФИО**	**Ученая степень, звание**	**Подпись**	**Дата**
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	**ФИО**	**Подпись**	**Дата**
5АМ4Е	Нафигин Николай Равильевич		

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

Институт **Энергетический (ЭНИН)**
Направление подготовки **13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника**
Кафедра **Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)**
Уровень образования – магистратура
Кафедра электроснабжения промышленных предприятий
Период выполнения (осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	26.05.16 г.

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
04.02.16	*Обзор литературы*	*15*
18.04.16	*Экспериментальная часть*	*30*
28.04.16	*Определение потерь мощности в контактном соединении проводников*	*35*
11.05.16	*Финансовый менеджмент*	*10*
14.05.16	*Социальная ответственность*	*10*

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Электроснабжения промышленных предприятий	Завьялов В.М.	д.т.н.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ4Е	Нафигин Николай Равильевич

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭПП
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Оптимизация развивающихся систем электроснабжения

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. *Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих*	*Приблизительная стоимость ресурсов научного исследования, в том числе научно-технического оборудования, составляет около 20 млн. руб.*
2. *Нормы и нормативы расходования ресурсов*	*В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»*
3. *Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования*	*Налоги рассчитать по упрощенной системе налогообложения (20% от выручки), ставку дисконтирования принять равной 0,1,*
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. *Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ*	*Определение концепции проекта, факторов микро- и макросреды, анализ рынка продукта, экспертная оценка эффективности, SWOT-анализ*
2. *Разработка устава научно-технического проекта*	*Не разрабатывается*
3. *Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок*	*Разработка календарного, бюджета проекта, финансового плана, определение рисков проекта,*
4. *Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности*	*Экспертная оценка эффективности и оценка рисков*
Перечень графического материала *(с точным указанием обязательных чертежей):*	
1. *Экспертная оценка проекта без учета и с учетом коэффициента значимости* 2. *SWOT-анализ* 3. *Перечень работ* 4. *Сетевой график* 5. *Гистограмма бюджета по времени* 6. *Гистограмма трудовых ресурсов по времени* 7. *График Ганта* 8. *Бюджет проекта* 9. *Дерево рисков*	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Грахова Елена Александровна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ4Е	Нафигин Николай Равильевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ4Е	Нафигин Николай Равильевич

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭПП
Уровень образования	Магистратура	**Направление/специальность**	Оптимизация развивающихся систем электроснабжения

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
5.1 Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения: – *вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)* – *опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)* – *негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)* – *чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)*	Рабочая зона представляет собой помещение размером 9х6 метров, в котором расположены 6 персональных рабочих мест, оборудованных персональными компьютерами, а также сканирующий электронный микроскоп Hitachi TM3000, рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD7000, система водяного охлаждение, приточно-вытяжная вентиляция. Работа на персональном месте проводится сидя. Вредные факторы: 1) Физические: уровень шума (монотонный), электромагнитное излучение, ионизирующее излучение, Освещение; 2) Психофизические: перенапряжение анализаторов, монотонность труда. Опасные факторы: 1) Поражение электрическим током; 2) Пожароопасность.
5.2 Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	1) ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ. 2) ГОСТ 12.1.019 (с изм. №1) 3) ГОСТ 12.1.030 -81. 4) ГОСТ 12.2.032 – 78 ССБТ. 5) СНиП 21 – 01 – 97. 6) Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. 123 – ФЗ. 2013. 7) СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. 8) СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03.. 9) СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. 10) СНиП 2.04.05 – 91. 11) СНиП 23 – 05 –95. 12) НРБ-99/2009 "Нормы радиационной безопасности". 13) ОСПОРБ-99/2010 14) ФЗ от 09.01.96 N 3 " 15) СанПиН СП 2.6.1.1282-03 16) ГОСТ 12.0.003-74
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
5.3 Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: – *физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;* – *действие фактора на организм человека;* – *приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);* – *предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)*	- Шум; - Электромагнитное излучение; - Освещение.

5.4 Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности – *механические опасности (источники, средства защиты;* – *термические опасности (источники, средства защиты);* – *электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);* – *пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)*	- Электробезопасноть; - Пожаробезопасность; - Психофизические факторы.
5.5 Охрана окружающей среды: – *защита селитебной зоны* – *анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);* – *анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);* – *анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);* – *разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.*	- Анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);
5.6 Защита в чрезвычайных ситуациях: – *перечень возможных ЧС на объекте;* – *выбор наиболее типичной ЧС;* – *разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;* – *разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;* – *разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий*	- Пожар.
5.7 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – *специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;* – *организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны*	- Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	- План помещения рабочей зоны - План эвакуации

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский Анатолий Григорьевич	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ4Е	Нафигин Николай Равильевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 111 с., 31 рис., 14 табл., 48 источников, 3 прил.

Ключевые слова: коаксиальный магнитоплазменный ускоритель, контактная пара медь-алюминий, магнитное поле, удельное переходное контактное сопротивление.

Объектом исследования является электроразрядная плазма и оценка влияния магнитного поля на равномерность распределения медного покрытия на алюминиевой подложке.

Цель работы – разработка плазмодинамического метода создания контактных медь-алюминиевых покрытий с равномерным распределением медного покрытия на алюминиевой подложке при использовании внешнего импульсного магнитного поля.

В процессе исследования проводились эксперименты по оценке влияния магнитного поля на распределение плазмы при нанесении покрытия, расчет переходного сопротивления контактов.

В результате исследования оптимизирован процесс нанесения покрытий с помощью КМПУ, определена эффективность применения контактных пар медь – алюминий с медным плазмодинамическим покрытием.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: для равномерного нанесения медь-алюминиевых покрытий предложен плазмодинамический метод с дополнительным воздействием на плазму импульсного магнитного поля. Степень внедрения: технология прошла апробацию в лабораторных условиях.

Область применения: контактные пары медь-алюминий, полученные с помощью коаксиального ускорителя, могут быть использованы в качестве контактов при эксплуатации электрических сетей, электроустановок и электротехнического оборудования.

Экономическая эффективность/значимость работы представлена в разделе финансовый менеджмент, показаны результаты расчета срока окупаемости, согласно которым получение контактных пар медь-алюминий с помощью коаксиального магнитоплазменного ускорителя является быстроокупаемым (2 года) и высокодоходным.

В будущем планируется оптимизация технологических, конструкционных и энергетических параметров плазмодинамического метода нанесения покрытий для проведения опытно-конструкторских работ и внедрения на производство.

Данная работа была выполнена в рамках стратегической академической единицы «Экоэнергетика».

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ..... 11

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ..... 13

1.1 Способы нанесения металлических покрытий 13

1.1.1 Химические способы 14

1.1.2 Механические способы 17

1.1.3 Наплавка 19

1.1.4 Методы напыления 20

1.2 Токопроводящие смазки 24

1.3 Биметаллические прокладки..... 26

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....**Ошибка! Закладка не определена.**

2.1 Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель .....**Ошибка! Закладка не определена.**

2.2 Устройство КМПУ и принцип работы**Ошибка! Закладка не определена.**

2.3 Методика обработки экспериментальных данных.....**Ошибка! Закладка не определена.**

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**Ошибка! Закладка не определена.**

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В КОНТАКТНОМ СОЕДИНЕНИИ ПРОВОДНИКОВ.....**Ошибка! Закладка не определена.**

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ..... 30

5.1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ ... 31

5.2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок 38

5.3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности 43

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**Ошибка! Закладка не определена.**

6.1 Техногенная безопасность ... **Ошибка! Закладка не определена.**

6.1.1 Шум ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

6.1.2 Электромагнитное излучение**Ошибка! Закладка не определена.**

6.1.3 Освещение ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

6.1.4 Психофизические факторы**Ошибка! Закладка не определена.**

6.2 Электробезопасность ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

6.3 Экологическая безопасность работ**Ошибка! Закладка не определена.**

6.4 Чрезвычайная ситуация ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

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

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА 51

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

Приложение А ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Приложение Б ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Приложение В ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

ВВЕДЕНИЕ

Незаменимыми материалами для токопроводящих элементов в электроэнергетике являются алюминий и медь, ввиду высокой удельной проводимости материалов и относительно недорогой их стоимости. Одним из главных вопросов в электроэнергетике, возникающих при подключении электрических соединений, является эргономичное совмещение контактной пары медь-алюминий. При присоединении двух металлов, потенциалы которых различны друг от друга, образуется гальванический элемент. Алюминий более активный металл, по сравнению с медью, поэтому даже в нормальных условиях эксплуатации контактных пар медь-алюминий, на поверхности алюминиевого контакта образуется оксидная пленка, которая ухудшает электропроводные свойства, в отличие от чистого алюминия. При попадании влаги возникнет процесс электролиза, который будет разрушать контакт, а также данное соединение будет являться источником пожара. Все это приводит к тому, что переходное сопротивление такой контактной пары увеличивается, в результате чего потери электроэнергии и потери напряжения в системе электроснабжения увеличиваются. Существующие на сегодняшний день способы решения данной проблемы не достаточно эффективны [1-3]. Недостатки всех известных методов в основном сводятся к тому, что оборудование для нанесения покрытий недостаточно безопасно, дорого; покрытие получается низкого качества с высоким значением удельного переходного сопротивления, а также с низкой адгезионной устойчивостью.

В работе предлагается уникальный метод решения проблемы совмещения контактной пары медь-алюминий и снижение ее переходного сопротивления путем воздействия на алюминиевую контактную поверхность высокоскоростной импульсной струей медной электроэрозионной плазмой, генерируемой сильноточным коаксиальным магнитоплазменным ускорителем. Преимущества данного метода состоят в том, что метод является довольно простым, экологичным и быстродейственным. Для данного метода не требуется дозированная подача материала, который нарабатывается

электроэрозионным путем с поверхности ускорительного канала ускорителя. Процесс проводится в воздушной атмосфере при нормальных условиях.

Цель работы – разработка плазмодинамического метода создания контактных медь-алюминиевых покрытий.

Объектом исследования является плазма, оценка влияния магнитного поля на качество адгезии контакта.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Совмещение контактной пары медь-алюминий, путем нанесения медного покрытия на алюминиевые поверхности (на плоские подложки и на внешние поверхности изделий);
2. Исследование поведения плазменной струи при выходе из ствола под действием магнитного поля;
3. Сравнительный расчет потерь электроэнергии на контактных соединениях в системе электроснабжения объектов и электроприемников строительной компании, при использовании стандартных кабельных зажимов (клемм) и медь-алюминиевых клемм, полученных плазмодинамическим методом.

Полученные контактные пары медь-алюминий могут быть использованы в качестве электрических контактов в электрических сетях, например, для присоединения их к контактным выводам электрооборудования, которые в большинстве своем выполняются из меди, для работы в электрических машинах, аппаратах и трансформаторах, которые эксплуатируются в различных атмосферных условиях.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Актуальный и не закрытый вопрос имеет место в электротехнике по отношению совмещения контактной пары медь-алюминий. Возникающие при соединении алюминия с медью, химическая и электрохимическая коррозии особенно активно воздействуют на алюминий, окисляя и разрушая поверхность контакта. Переходное сопротивление при этом резко возрастает, соединение перегревается и при больших токах приводит к значительным потерям электроэнергии в контакте. Прямое присоединение алюминиевых шин к стержневым медным выводам трансформаторов и аппаратов в большинстве случаев приводит к выгоранию алюминиевых шин.

Основные методы решения этой проблемы – использование биметаллических прокладок, применение токопроводящих смазок, нанесение покрытий [1-4]. Отдельно каждый из выше указанных способов имеют свои достоинства и недостатки, поэтому далее необходимо рассмотреть эти методы более подробно.

1.1 Способы нанесения металлических покрытий

Нанесение металлических покрытий используется для изменения морфологии подложки, химических и физических свойств материала подложки. На сегодняшний день существует огромное количество способов нанесения различных покрытий с заданным функциональным назначением. Каждый метод имеет свои плюсы и минусы, каждая технология нанесения решает определенные задачи. Стоит отметить, что объединить в общую классификацию эти способы достаточно затруднительно, так как каждый метод по-своему уникален и может быть определен в несколько классов. Однако попытка сгруппировать существующие методы приведена ниже [2]:

- Процесс кондуктивного и диффузионного нанесения покрытий;
- Химический процесс нанесения покрытий;
- Физические методы получения покрытий;
- Капельное напыление;

- Газово-физическое нанесение покрытий.

Существуют три основных этапа формирования покрытия: синтез или создание материала для покрытия; перенос материала от источника к подложке, нанесение на подложку и рост пленок. Каждый метод по-своему уникален и может содержать другие этапы напыления и наоборот исключить какие-либо стадии [1]. Далее в работе представлены основные используемые методы нанесения покрытий с кратким описанием и сравнением их достоинств и недостатков.

1.1.1 Химические способы

В основе данных методов лежит процесс создания на поверхности изделий тонких пленок путем проведения химической реакции с выделением основных компонентов покрытий.

Магнетронное распыление

Распыление – это выброс атомов путем бомбардировки жидких или твердых заряженных частиц, таких как ионы, на подложку. Магнетронное распыление — технология нанесения тонких плёнок на подложку с помощью магнетрона.

С помощью магнетронного распыления возможно получать покрытия из любого металла, сплава и полупроводникового материала, не вызывая изменений в стехиометрическом составе. [5]. Зависимость состава рабочей атмосферы (азот, сернистые газообразные соединения, доли кислорода, диоксида углерода), определяет возможность получать плёнки карбидов, оксидов, сульфитов, нитритов и других различных материалов.

В силу того, что скорость конденсации, зависящая от силы тока разряда, мощности, а также от давления рабочего газа, определяются очень жесткие и серьезные требования к источникам питания. Для обеспечения стабильности процесса силу тока разряда необходимо поддерживать высокой точности. В качестве рабочей среды при магнетронном распылении используют смесь инертного и реакционных газов. Подбором парциальных давлений компонентов газовой смеси при постоянном общем давлении,

поддерживаемом высокой точностью, что, в свою очередь требует оснащение вакуумных установок насосами, обеспечивающие постоянную скорость откачки в рабочем диапазоне давлений. Состав получаемых соединений (оксидов, карбидов, нитритов) зависит от чистоты применяемых газов и распыляемых материалов, поэтому требуются сложные системы откачки газов и высокочистые материалы для распыления [6].

Преимущества метода:

- Напыление материалов любого типа: проводники, полупроводники, углеродосодержащие и керамические материалы;
- Широкий интервал скоростей напыления: *0,1 – 100 мкм/час*;
- Высокое качество и однородность покрытий, в том числе, многокомпонентных и многослойных, как по составу, так и по слоям;
- Равноскоростное распыление разнородных материалов из одной мишени мозаичного типа;
- Высокая точность конструирования состава мозаичных мишеней и наносимых покрытий;
- Низкая себестоимость процесса и получения мишеней;
- Безопасность в экологии (отсутствуют: жидкие стоки, газообразные выбросы, транспортировка и хранение ядовитых реагентов) [5].

Основным недостатком метода является сложность системы нанесения покрытия, для которой требуются сложные системы откачки газов.

Гальваническое нанесение покрытий

Гальваническое меднение алюминия или его сплавов является одним из решением проблемы совмещения алюминиевых контактных элементов с медными [7-11]. Для получения качественного медного покрытия на алюминиевых подложках с высокой адгезией и заданными функциональными свойствами необходимо проводить процесс меднения в смеси кислот. Используемая технология позволяет наносить на алюминиевые образцы медные покрытия толщиной порядка 9 мкм с высоким уровнем адгезионной устойчивости.

Стоит отметить, что данный метод относится к одному из самых старых способов, благодаря которому возможно нанесение покрытий практически всех металлов при высокой технологичности процесса [3]. Однако данный метод имеет ряд недостатков - для нанесения качественного медного покрытия требуется около часа, качество покрытия не достаточно хорошее.

Химическое осаждение из газовой фазы (катодное распыление)

Осаждение проводили на экспериментальной установке, описанной в работе [12]. Метод осуществляется следующим образом. Вакуумный объем, содержащий анод и катод, откачивают до давления 10^{-4} Па, после чего производят напуск инертного газа (обычно это Ar при давлении 1 – 10 Па). Для зажигания тлеющего разряда между катодом и анодом подается высокое напряжение 1 – 10 кВ. Положительные ионы инертного газа, источником которого является плазма тлеющего разряда, ускоряются в электрическом поле и бомбардируют катод, вызывая его распыление. Распыленные атомы попадают на подложку и оседают в виде тонкой пленки. Катод изготавливают из материала, подлежащего распылению.

Преимущества метода катодного распыления в следующем:

- Без инерционность процесса
- Низкие температуры процесса
- Возможность получения пленок тугоплавких металлов и сплавов (в том числе и многокомпонентных)
- Сохранение стехиометрического исходного материала при напылении
- Возможность получения равномерных по толщине пленок

Метод имеет недостатки:

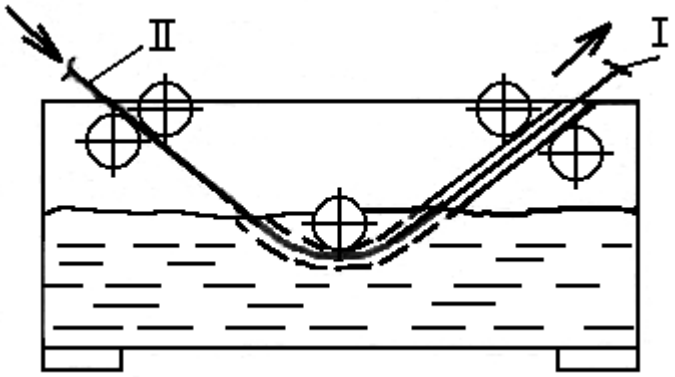
- Низкая скорость осаждения (0,3-1 нм/с)
- Загрязнение пленок рабочим газом вследствие проведения процесса при высоких давлениях
- Низкая степень ионизации осаждаемого вещества [12–14].

1.1.2 Механические способы

К механическим методам относятся: погружение в расплав, плакирование, эмалирование и другие [3]. Для решения данной проблемы метод эмалирования не может быть применен.

Погружение в расплав

В основе данного метода лежит механическое погружение изделия, на которое наносится покрытие, в ванну с расплавленным металлом (рисунок 1.1). После извлечения изделия на его поверхности образуется твердая металлическая пленка требуемого состава.



1 – материал с покрытием; 2 – исходный образец

Рисунок 1.1 – Схема метода нанесения покрытий погружением в расплав

Главным механизмом, контролирующим образование переходной зоны, является диффузия. При погружении изделия в ванну с жидким металлом (после смачивания) в результате диффузии формируются твердые фазы переходной зоны, а после извлечения из расплава на поверхности образуется слой твердого покрытия, соответствующий составу ванны.

Достоинством технологии получения покрытий методом погружения в расплав является высокая производительность, использование агрегатов непрерывного действия (обработка лент, полос, проволоки). К недостаткам можно отнести узкий круг материалов покрытия, связанный с ограничением рабочих температур ванны с расплавленным металлом (возможность

нанесения алюминия и его сплавов, но медь не может быть использована для получения покрытий данным способом).

Плакирование

Плакированные материалы представляют собой двух- или многослойные материалы, полученные методом плакирования, т.е. различными методами механического соединения. Свойства плакированных материалов могут превосходить свойства отдельных исходных материалов и зависят от сочетания выбранных материалов основы и покрытия. Можно получить комбинацию свойств в одном изделии: прочность и пластичность, коррозионно- и износостойкость, сочетание физических свойств (электрические, магнитные, тепловые и т.д.) [15].

Прочность сцепления контактирующих металлических слоев зависит от многих факторов. В первую очередь отметим условия получения физического контакта: развитая топография поверхности с учетом ее тонкой структуры, разрушение оксидных пленок и увеличение площади поверхности сцепления при обработке плакированных материалов давлением.

Важным технологическим параметром при плакировании является температура. При повышении температуры поверхностная энергия и пластичность большинства металлов увеличиваются, а процессы диффузии протекают более интенсивно, благодаря чему достигается более высокая прочность сцепления.

Метод плакирования обеспечивает высокую производительность технологических процессов, высокую адгезию, отсутствует ограничение на толщину соединяемых материалов. Существенным недостатком плакирования является использование его для получения в основном изделий и полуфабрикатов простой формы. А также при использование данного метода для решения данной проблемы не является производительным, так как увеличивается переходное контактное сопротивление.

1.1.3 Наплавка

Наплавкой называется технологический процесс нанесения слоя расплавленного металла на оплавленную поверхность детали или изделия. Нанесенный металл после охлаждения прочно связывается с основным металлом, образуя покрытие [3].

Достоинства и недостатки технологии наплавки:

По сравнению с другими способами обработки поверхности материалов технология наплавки обладает рядом преимуществ:

- Возможность нанесения покрытия большой толщины за счет практически неограниченного числа наплавляемых слоев (от 0,25 до 5,00 мм и выше, электрошлаковая наплавка до 450 мм).
- Высокая производительность (при использовании ленточных электродов до 15 – 25 кг/час).
- Относительная простота конструкции и транспортабельность оборудования, возможность проводить ремонтные работы в полевых условиях.
- Отсутствие ограничений на размеры ремонтируемых деталей.

Недостатки технологии наплавки связаны с высоким значением погонной энергии, используемой для получения в расплавленном состоянии как материала наплавляемого, так и материала детали. Ниже перечислены недостатки технологии наплавки:

- Ухудшение свойств наплавленного слоя из-за перехода в него элементов основного металла.
- Деформация изделия из-за высокого нагрева.
- Ограниченный выбор сочетаний основного и наплавляемого металла из-за образования в ряде случаев (при плохой свариваемости) хрупкой прослойки интерметаллидов на границе покрытие - основа.
- Трудность наплавки на поверхность мелких изделий сложной формы.
- Невозможность наплавки на поверхность тонкостенных деталей.

1.1.4 Методы напыления

Среди других методов нанесения покрытий технологии напыления обладают заметным преимуществом. Во-первых, универсальностью выбора материала покрытий: покрытия металлические, полимерные, керамические, композиционные, покрытия из материалов с низкой и высокой температурой плавления, аморфные покрытия. Согласно приведенной выше классификации все технологии напыления можно разделить на две группы: газотермическое напыление и вакуумно-конденсационное напыление. При этом внутри каждой группы существует целый ряд методов напыления различающихся источником подводимой энергии, физикой протекающих процессов [3].

Процесс газотермического напыления покрытий представляет сложную совокупность физико-химических механических явлений. Его можно разделить на два основных этапа: формирование двухфазного потока (газовой струи с дисперсными частицами) и самого покрытия [16].

К первому этапу относится процесс взаимодействия высокотемпературного газового потока и частиц, включающий в себя теплообмен и нагрев частиц, их ускорение при передаче количества движения от струи газового потока. На практике желательно получить перегрев напыляемых частиц момент их подлета к поверхности (на 50÷100 ºС выше температуры плавления материала частиц), с целью повышения прочности сцепления за счет увеличения пятна химического взаимодействия на границе частица подложка.

На втором этапе формируется покрытие при соударении расплавленных частиц с поверхностью основы, в результате чего частицы плотно ложатся друг на друга и, растекаясь, заполняют неровности шероховатой поверхности. Благодаря их высокой температуре в зоне контакта возникают участки схватывания (приваривания), и частицы прочно соединяются между собой и с основой с образованием сложной структуры покрытия. К данному методу относятся: метод плазменного напыления, метод детонационного напыления, газодинамическое напыление [17-20].

Метод холодного газодинамического напыления (ХГН).

Явление образования покрытий ХГН было впервые обнаружено в Институте теоритической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН) при изучении обтекания затупленных тел сверхзвуковым гетерогенным низкотемпературным потоком [21-23]. Исследования показали, что наличие высоких температур в струе не является обязательным условием и покрытия можно получать из частиц, имеющих температуру значительно меньше их температуры плавления, а это открывает широкие возможности для создания новых технологий и новой техники для напыления [21]. На сегодняшний день этот метод является основным для решения проблемы совмещения контактных пар медь-алюминий.

Суть этого метода в том, что на обрабатываемую поверхность сверхзвуковым потоком воздуха (500 – 1000 м/с) нагретым до температуры 250…500 °С наносятся порошки различных органических, в том числе полимерных, и не органических материалов (металлы, интерметаллиды, керамика или их смеси) с размером частиц 5…50 мкм.

Процесс ХГН осуществления в специальной установке, где частицы порошка разгоняются воздушной струей до сверхзвуковой скорости. По итогу взаимодействия частиц с поверхностью подложки на ней формируется покрытие из пластически деформированных частиц напыляемого порошка (рисунок 1.2).

Процесс напыления методом ХГН можно разделить на три стадии. Первая стадия – это разгон и нагрев частиц. Вторая – взаимодействие частиц непосредственно с поверхностью подложки, адгезионная стадия. Третий – когезионная стадия, когда покрытие наращивается до необходимой толщины и закрепление частиц происходит на поверхности сформированной предыдущими частицами.

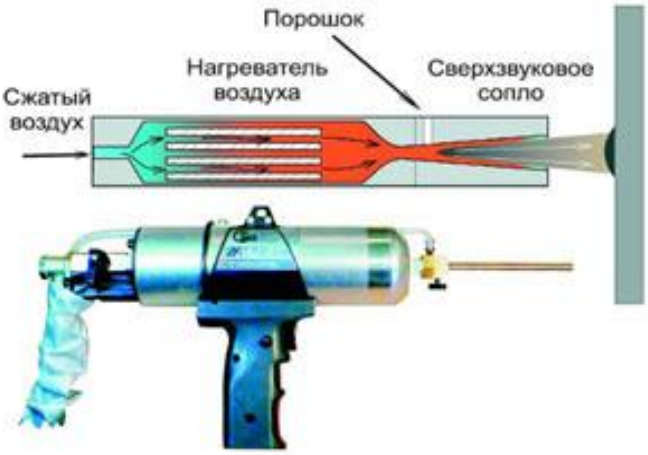
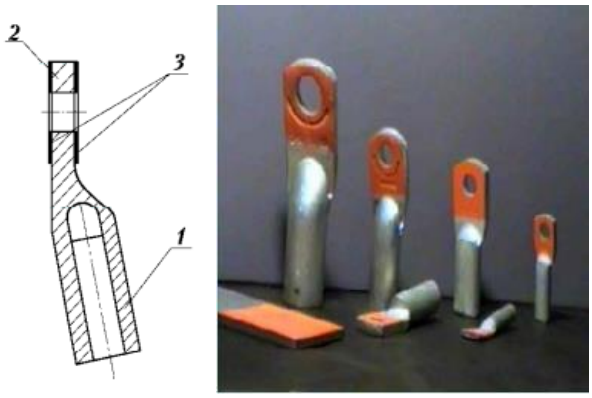


Рисунок 1.2 – Схема и общий вид аппарата для нанесения металлических покрытий методом холодного газодинамического напыления.

ХГН позволяет наносить на алюминиевую контактную поверхность тонкий (0,05…0,2 мм) и прочный слой меди, цинка, никеля и т.д. На рисунке 1.3 представлено схематическое изображение кабельного наконечника с нанесенным на него медным покрытием и представлена фотография таких наконечников.



а) б)

а) схематическое изображение б) фотография кабельных наконечников различного типа. 1 – хвостовая часть; 2 – зажимная часть; 3 – напыленный слой

Рисунок 1.3 – Кабельный наконечник с нанесенным методом ХГН покрытием

Преимущества данного метода:

- Получение высокопрочных покрытий различных по структуре, составу и свойствам в широком диапазоне толщин (от 0,01 до 10 мм);
- Покрытие обладает высоким уровнем адгезии;
- Высокая производительность процесса (до 5-7 $м^2$/час);
- Отсутствие существенного нагрева частиц и связанных с ним процессов высокотемпературного окисления, фазовых переходов, что позволяет получать покрытия по свойствам, близким к свойствам материала исходных частиц, а также композиционные покрытия из механической смеси порошков, значительно различающихся по физико-термическим свойствам;
- Позволяет наносить покрытия на подложки из не термостойких материалов;
- Улучшение технической реализации и улучшение безопасности работ в связи с отсутствием высокотемпературных струй, а также огне- и взрывоопасных газов.

Метод ХГН может найти широкое применение для получения антикоррозийных, упрочняющих, электропроводящих и других покрытий отдельных деталей и конструкций.

Недостатком данного метода является неустойчивость полученного покрытия к динамическим воздействиям.

Электровзрывное напыление

Электровзрывное напыление – это метод нанесения упрочняющих покрытий из продуктов электрического взрыва фольг и порошковых навесок. Одним из достоинств этого метода является формирование покрытий с высокой адгезией. Электровзрывное напыление без оплавления поверхности подложки позволяет получать единичные слои из того или иного вещества, при многократном нанесении покрытий разных материалов возможно получение композиционных покрытий со слоистой структурой.

Электровзрывное напыление с оплавлением поверхности и перемешиванием наносимых частиц с материалом подложки позволяет

формировать покрытия с наполненной структурой, когда в матрице одного металла расположены включения других фаз.

Одной из установок, с помощью которой возможно получение покрытий электровзрывным способом, является установка ЭВУ 60/10М [24-26]. Установка включает в себя емкостной накопитель энергии, импульсный плазменный ускоритель, состоящий из системы электродов с размещенным на них проводником, локализирующий продукты взрыва разрядной камеры, переходящей в сопло, по которому эти продукты истекают в вакуумную технологическую камеру с остаточным давлением 100 Па. Электровзрыв происходит в результате пропускания через проводник тока большой плотности при разряде накопителя энергии.

Данный способ получения медных покрытий на алюминиевых подложках является достаточно перспективным, однако на ряду со всему достоинствами данный метод имеет свои недостатки:

- Оборудование для получения покрытий достаточно опасное;
- Покрытие поверхности получается с большим значением шероховатости;
- Получаемая контактная пара имеет высокое удельное переходное контактное сопротивление.

1.2 Токопроводящие смазки

В разъемных соединениях алюминиевых проводников с алюминиевыми, медными и стальными выводами электрооборудования контактные алюминиевые поверхности вследствие их активного сопротивления подвергаются дополнительной подготовке непосредственно перед соединением. Эта подготовка заключается в механической обработке и зачистке контактной алюминиевой поверхности от окисной пленки. Зачистку поверхности производят под слоем технического вазелина с последующим нанесением на обработанную поверхность защитной смазки или пасты, препятствующих окислению металла.

Смазки и пасты должны иметь высокую липкость (адгезию) и наноситься на поверхность тонким слоем, обладать эластичностью и не растрескиваться от колебания температуры в пределах от –60 до +150 °С. Они должны иметь высокую температуру каплепадения в пределах от 120 до 150 °С, быть химически стабильными, исключающими перерождение смазки или пасты, влагонепроницаемыми и стойкими к воздействиям кислот и щелочей. Нарушение покрытия хотя бы в одном месте приводит к образованию коррозии металла, которая имеет тенденцию к “вгрызанию” в металл. Кроме того, в месте контакта смазки и пасты должны обеспечивать разрушение химическим путем оксидной пленки и в течение длительного времени не допускать ее возникновения вновь.

Применение токопроводящей смазки позволяет увеличить эффективную площадь контактирования и токопередачи, вплоть до размера рабочей площади контакта, уменьшая одну из главных составляющих переходного контактного сопротивления, сопротивление стягивания, возникающего по причине стягивания линий тока к точкам контактирования. Частицы медного порошка, входящего в состав смазки, при сжатии в контактном соединении образуют сплошную токопроводящую металлическую прокладку.

Смазка, находясь между контактными поверхностями заполняет микропустоты, спрессовывается, создает сплошную твердую токопроводящую металлическую прокладку, герметизирует рабочую зону контакта, препятствуя попаданию туда пыли, влаги, агрессивных аэрозолей и газов (рисунок 1.4). Таким образом, предотвращается окисление контактов, которые остаются в идеальном состоянии на протяжении всего срока эксплуатации.

Применение электропроводящих смазок позволяет:

- Повысить надёжность работы оборудования;
- Повысить качество электромонтажа;

- Снизить количество человеко – часов на текущее обслуживание оборудования;
- В ряде случаев полностью отказаться от сварки и пайки в пользу применения легко выполняемых разъемных контактных соединений.

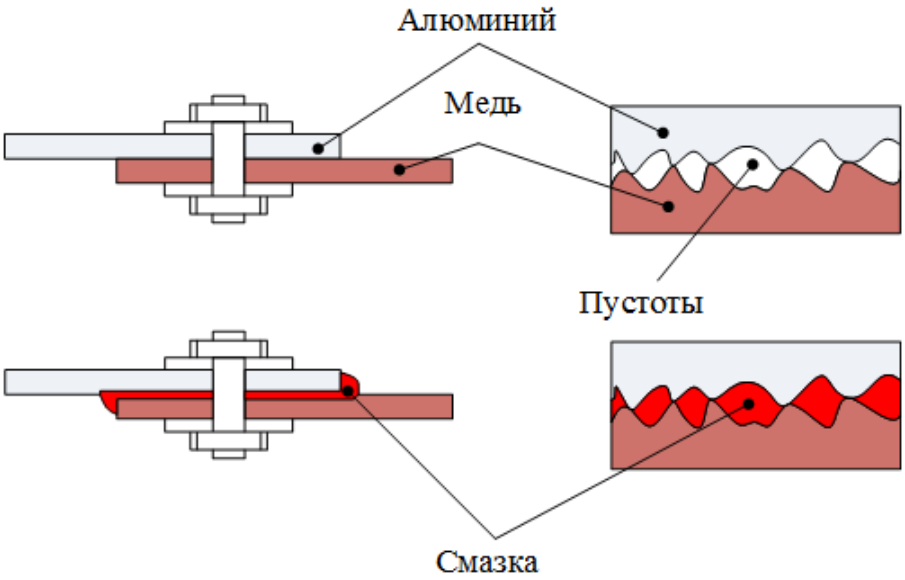


Рисунок 1.4 – Принцип действия токопроводящих смазок

Недостатки применения токопроводящих смазок:

- Ухудшение свойств при длительной эксплуатации;
- Невозможность повторного использования после ревизии контакта [26].

1.3 Биметаллические прокладки

Переходные медно – алюминиевые прокладки применяются для соединения алюминиевых шин к медным выводам электротехнических устройств, а также к медным шинам. В настоящее время используются следующие основные промышленные способы получения переходников такого рода: метод холодной сварки, сварка давлением, и сварка взрывом. При использовании первых двух методов биметаллическая пластина отличается невысокой надежностью и качеством, поэтому в последнее время все более широкое применение в области производства композиционных материалов

получила технология сварки взрывом. В ходе данной технологии материалы претерпевают ряд глубоких, структурных и фазовых превращений, протекающих в результате действия высоких давлений и скоростей нагружения при одновременно малой длительности происходящих процессов, что приводит к образованию высокопрочных неразъемных соединений.

Под определением “технологии сварки взрывом” понимается процесс соединения поверхностей двух металлических пластин, происходящий при их высокоскоростном соударении. Соударение металлов происходит при метании плакирующего металла на лист основного металла взрывом заряда взрывчатого вещества. Важным аспектом является процесс подготовительной работы, четкость исполнения которого является необходимостью для проведения сварки взрывом и получения высокого качества биметаллических листов.

Уникальные свойства биметаллов объясняются тем, что основной слой обеспечивает конструктивную прочность и другие механические свойства изделий, а плакирующий слой (нержавеющая сталь, никель, титан, медь, алюминий или другие металлы), который находится в контакте с агрессивной средой, обеспечивает требуемую коррозионную стойкость.

При сварке взрывом соединение образуется даже при наличии окисных и масляных пленок, что свидетельствует о существовании эффективного механизма очищения поверхностных слоев, струей сжатого воздуха, находящегося в зазоре между свариваемыми элементами.

Преимущества сварки взрывом:

- Изготовление биметаллов, которые невозможно производить традиционными методами;
- Полностью сохраняются механические свойства металлов;
- Достигается наиболее прочная связь между материалами;
- Отсутствуют слабые участки, полученные в результате воздействия высоких температур (во время взрыва за счет быстроты процесса теплопереноса не происходит) [27-31].

Основным и важным недостатком использования биметаллических пластин является увеличение контактных переходов, вследствие чего увеличивается переходное контактное сопротивление, и потери электроэнергии.

Анализ литературных данных показывает, что совмещение контактной пары медь-алюминий существующими методами, возможно, но не достаточно эффективно. При использовании биметаллических прокладок увеличивается число контактных переходов, что приводит к увеличению переходного сопротивления контакта, следствием чего является увеличение потерь электроэнергии в электрических цепях. Кроме того, биметаллическая прокладка для мощной ошиновки изготавливается по технологии сварки взрывом, что требует создания на промышленном предприятии специализированного производственного участка по ведению взрывных работ и организации специальных мероприятий по техники безопасности.

Наиболее приемлемым и эффективным способом решения задач совмещения контакта медь – алюминий и снижение его переходного сопротивления является использование специальной смазки или пасты на основе медного порошка. Однако при длительной эксплуатации с циклическими нагрузками их свойства ухудшаются и их невозможно использовать повторно при ревизии контакта.

Получаемое покрытие катодным распылением недостаточно высокого качества. При магнетронном распылении слишком большая стоимость оборудования.

Наиболее используемые на сегодняшний день методы получения контактных пар способы напыления покрытий. Основным негативным параметром всех методов газотермического напыления является высокая температура переносимых частиц, как правило, существенно превышающая температуру плавления наносимого материала. Основными недостатками холодного газодинамического напыления является то, что данные покрытия имеют низкую устойчивость к динамическим воздействиям (низкая

адгезионная устойчивость), а также дополнительная механообработка, в которой нуждается конечное покрытие. В связи с этим является актуальным нахождение способа, который бы позволил не только совместить сильноточную контактную пару медь–алюминий, но и уменьшил переходное контактное сопротивление. Данная задача может быть решена путем воздействия на алюминиевую контактную поверхность высокоскоростной импульсной струи медной электроэрозионной плазмы, генерируемой сильноточным коаксиальным магнитоплазменным ускорителем (КМПУ) эрозионного типа [32]. Метод является прямым и относительно простым, так как процесс полностью реализуется в кратковременном ($10^{-4} \div 10^{-3}$ с) цикле работы ускорителя. Порошкообразный материал, необходимый для обработки поверхности нарабатывается электроэрозионным путем с поверхности ускорительного канала КМПУ в атмосферных условиях.

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В рамках данной ВКР рассматриваются научно-технические основы разработки плазмодинамического способа получения контактной пары медь-алюминий. Одним из наиболее распространенных видов переходных токоведущих элементов оборудования является пара медь-алюминий. Однако невысокая надежность и низкое качество покрытий, полученных существующими на данный момент методами, представляет серьезную проблему в отрасли электроэнергетики. В месте соединения разнородных металлов между собой происходит их окисление. Пленка окиси, образующаяся на поверхности металла, обладает значительно большим значением сопротивления. Это приводит к разрушению контакта в месте соединения алюминиевой и медной частей и разрыву электрической цепи, что является причиной довольно частых аварий и перерывов в работе электрооборудования. Предлагаемая технология позволит решить проблему совмещения пары медь-алюминий. При получении контактной пары Cu-Al, с помощью коаксиального магнитоплазменного ускорителя, уменьшается переходное контактное сопротивление, повышается качество контактных соединений, вследствие чего уменьшаются потери электроэнергии и риск возникновения аварийных ситуаций.

Целью данного раздела является оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-технического исследования (НТИ), планирование процесса управления НТИ, определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.

5.1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ

Для реализации производства контактной пары медь-алюминий необходимо реализовать спектр задач, связанных с научными, техническими и экономическими проблемами. Основные решаемые в данном проекте цели указаны на рисунке 5.1. Для реализации проекта необходимо оптимизировать разрабатываемую технологию для получения образцов с заданными характеристиками и испытания их в реальных условиях работы. Сперва цели необходимо решать с помощью научно-исследовательского персонала, в дальнейшем же потребуется привлечение специалистов в области экономики и предпринимательства. При достижение поставленных целей (рисунок 5.1) возможно получение серии образцов контактной пары медь-алюминий.

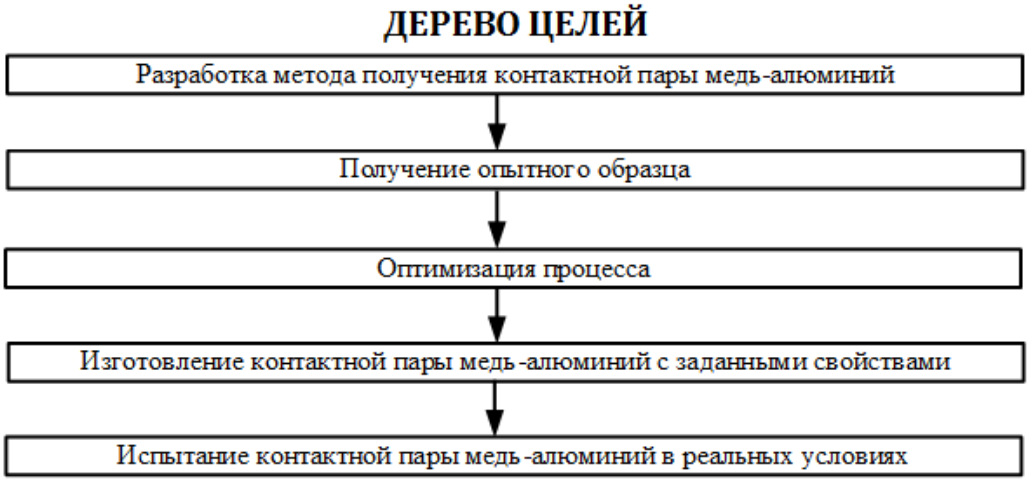


Рисунок 5.1 – Дерево целей

Задачи проекта решаются на базе оборудования, находящегося в 8 корпусе ТПУ. Главным объектом развития и оптимизации технологии является экспериментальная установка – коаксиальный магнитоплазменный ускоритель. Это устройство предназначено для получения покрытий (медь-алюминий, титан-сталь), а также для получения порошков с ультра и нанодисперсным размером частиц. В настоящий момент для настоящего проекта завершена стадия НИР, получены опытные образцы, необходимо начать этап ОКР.

Конкурентные преимущества плазмодинамического метода синтеза состоят в следующем:

1)метод является прямым, т.е. продукт получается без дополнительных этапов;

2) при реализации данного метода отсутствуют вредные выбросы;

3) не требуется предварительная подготовка исходного материала (электроэрозионная наработка);

4) производство реализуется при нормальных температуре и давлении;

5) метод является довольно простым и безопасным;

6) быстродействие метода (порядка 10-3 с);

7) низкое переходное контактное сопротивление – низкие потери электроэнергии;

8) покрытия получаются достаточно прочные с толщиной до 100 мкм;

9) возможность нанесения на внутренние поверхности изделий.

Рассмотрим факторы микросреды, к которым относятся анализ поставщиков, потенциальных покупателей, конкурентов и контактной аудитории. Поставщиками материалов для реализации производства являются следующие компании:

1) ООО ПКФ «Графит Гарант Сервис», г. Челябинск – поставка графита для изготовления электродов;

2) ООО «Русские медные трубы», Сербия – поставка медных труб;

3) ООО «Промметалл», г. Томск – поставка металлических элементов для изготовления деталей и частей магнитоплазменного ускорителя.

На сегодняшний день к конкурирующим фирмам можно отнести:

1) «Обнинский центр порошкового напыления – технология газодинамического напыления с использованием оборудования ДИМЕТ. Эффективность использования материала - 20 - 30 %, скорость нанесения покрытий - от 0,2 до 0,8 кг/час, толщина покрытия – любая;

2) «ALD Vacuum Technologies» – технология вакуумного напыления;

3) «ИЗОВАК», Республика Беларусь – вакуумное напыление;

4) Компания ЗАО «Ферри Ватт», г. Казань – разработкой и изготовлением вакуумных технологических установок, для нанесения наноразмерных и наноструктурированных покрытий, а также другого вакуумного оборудования.

Потребительский капитал – выявлена целевая аудитория для распространения и применения установки. Потенциальные покупатели:

- Электротехнические подразделения промпредприятий;
- Предприятия электрических сетей;
- Предприятия электротехнической промышленности;
- ОАО “Сибэлектромотор”;
- ОАО “Томскэнерго”;
- ОАО “Томская энергосбытовая компания”;
- ОАО “Томские распределительные сети”;
- ООО “Таврида Электрик”.

Отметим факторы макросреды, влияющие на реализацию проекта:

1) Политические. Отсутствие государственных программ по поддержке предприятий в области производства контактных пар медь-алюминий с улучшенными свойствами.

2) Социально-культурные. Отсутствие интереса к повышению и улучшению качества контактных деталей в электротехнической отрасли.

3) Международные. Затрудненность взаимодействия с зарубежными потребителями и выхода на международный рынок.

4) Научно-технические. Возможность финансовой поддержки со стороны государства и частных лиц (гранты, проекты и др.).

5) Экономические. Наличие государственных программ по повышению энергоэффективности.

Проведем маркетинговые исследования проекта.

Сильными сторонами проекта является улучшенная технология нанесения медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью коаксиального магнитоплазменного ускорителя. Благодаря этой

технологии, уменьшается переходное контактное сопротивление, вследствие чего уменьшаются потери электроэнергии и риск возникновения аварийных ситуаций. В существующих технологиях слой металла наносится на поверхность без прочного сцепления одного материала с другим. Используя предлагаемую технологию, происходит перемешивание материалов, соответственно, полученное покрытие более устойчиво к динамическим воздействиям и хорошего качества. Сильным фактором проекта является также наличие защиты интеллектуальной собственности. В данном проекте объектом интеллектуальной собственности является патент на коаксиальный магнитоплазменный ускоритель Патент №137443 Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель от 10.02.2014г.. Патентообладателем является Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Слабыми сторонами проекта является небольшая производительность установки: за один рабочий цикл получается покрытие площадью 180 см2. Установка находится на уровне опытно – конструкторского образца. На данном этапе развития проекта отсутствует автоматизация работы системы.

Рынок электрооборудования в настоящее время является одним из самых динамично-развивающихся рынков промышленных товаров и оборудования, что обусловлено, в первую очередь, ростом потребностей в подобных изделиях во всех сферах (в промышленности, в быту, в сельском хозяйстве, на транспорте и др.) повседневной жизни. Спрос на электрооборудование связан с электропотреблением, и на протяжении последних лет, за исключением 2009 года, Россия демонстрирует устойчивую положительную динамику роста спроса на электрооборудование. В ближайшей перспективе спрос на продукцию электротехнической промышленности в России также будет расти. На рисунке 5.2 приведен график потребления электроэнергии в России до 2016 г. Также рост рынка связан с вступлением в силу закона ФЗ 261 от 23 ноября 2009 г. "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации ", который должен

повлечь за собой инициативу внедрения ресурсоэффективных технологий, в том числе и контактной пары медь-алюминий. То есть внедрение контактных пар медь-алюминий, полученных плазмодинамичеким методом, повысит эффективность работы систем электроснабжения, а также уменьшит потери электроэнергии.

Электротехническая промышленность поставляет оборудование практически во все отрасли экономики и социальную сферу. Основными потребителями электрооборудования являются: топливно-энергетический комплекс — 20% поставок, оборонная промышленность — 12%, агропромышленный комплекс — 19%, транспортный комплекс — 8,5%, коммунальное хозяйство — 15%, прочие отрасли — 26,5%.

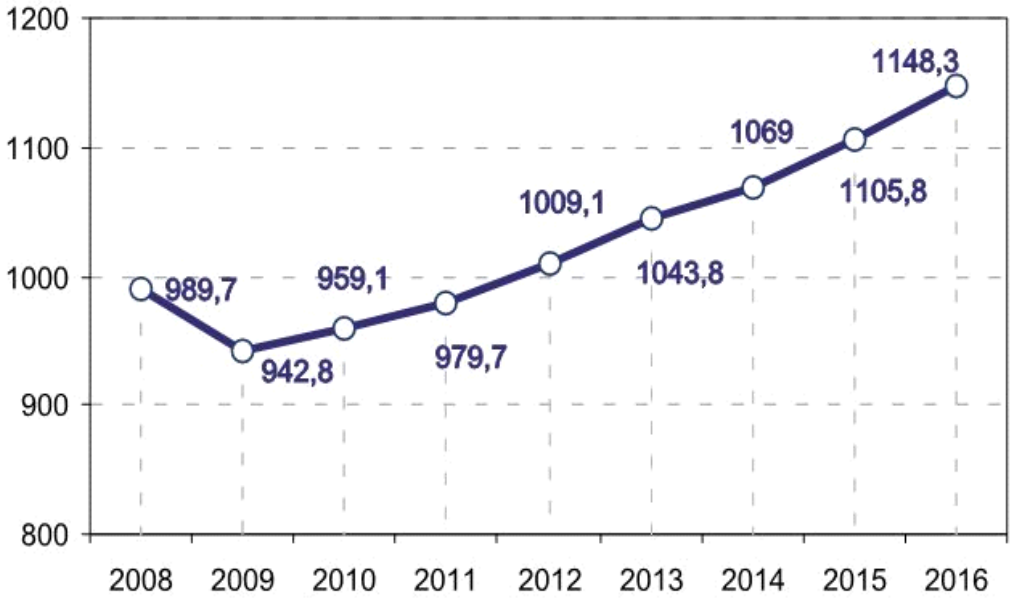


Рисунок 5.2 – Прогноз электропотребления в России до 2016 г., млрд кВт•ч

Отмечается некоторое улучшение экономической обстановки, что способствует постепенному восстановлению спроса на электрооборудование и электромонтажные работы, что в свою очередь увеличивает объемы работ в данной отрасли.

Важным фактором, позволяющим оценить потенциал проекта, является экспертное оценивание – процедура получения оценки проблемы на основе мнения экспертов. В данном случае проводится сравнение

существующих методов получения контактной пары медь-алюминий. Результаты экспертного оценивания представлены в приложении Б (таблица Б.1). Для каждого метода в столбцах с факторами конкурентоспособности поставлена оценка от 1 до 10, показывающая степень удовлетворения потребностям заказчика. Далее вводятся некоторые коррекционные коэффициенты, призванные распределить критерии по важности. В результате расчета для плазмодинамического метода получена максимальная оценка, что свидетельствует о его наибольшей эффективности.

Значимым инструментом маркетингового исследования является SWOT-анализ – это акроним слов Strengts (сильные стороны), Weaknesses (слабости), Opportunities (благоприятные возможности) и Threats (угрозы). Внутренняя обстановка фирмы отражается в основном в S и W, а внешняя – в O и T. SWOT-анализ является одним из этапов разработки маркетинговой стратегии. Методология SWOT-анализа предполагает, во-первых, выявление внутренних сильных и слабых сторон фирмы, а также внешних возможностей и угроз, и, во-вторых, установление связей между ними. Сводные данные SWOT-анализа представлены в приложение Б (таблица Б.2). В процессе анализа определяется следующее.

1.Конкурентные активы. Использование сильных сторон для освоения рыночных возможностей (S-O). Метод получения контактных пар медь-алюминий характеризуется такими важными конкурентными преимуществами, как простота метода, быстродействие, энергоэффективность, экологическая безопасность, низкая себестоимость, высокое качество покрытий, возможность нанесения покрытий как на плоские, так и на внутренние поверхности изделий, которые способны привлечь инвесторов для выполнения ОКР и коммерциализации проекта, выхода на российский и мировой рынок. Учитывая эти преимущества и инновационный характер разработки, можно надеяться на государственную поддержку проекта.

2. Конкурентные пассивы. Преодоление слабых сторон для нивелирования угроз (W-T). Наиболее значимыми недостатками проекта являются отсутствие в составе проектной команды маркетологов и экономистов и, как следствие, отсутствие стратегии развития, неизвестная торговая марка, отсутствие автоматизированной производственной линии и поэтому малые объемы получаемой продукции в настоящее время. Если в ходе развития проекта команда будет укомплектована высококвалифицированными экономистами, то это позволит провести тщательные исследования мирового и российского рынков и попытаться выработать стратегию развития компании.

3. Узкие места. Преодоление слабых сторон для освоения возможностей (W-O). Преодоление недостатков, связанных с отсутствием в команде экономистов и маркетологов и с недостаточно высокими объемами выпуска продукции, откроет возможности для освоения и развития рынка электротехнического оборудования.

4. Безопасность и защита. Использование сильных сторон для нивелирования угроз (S-T). Такие преимущества, как большой опыт работы высококвалифицированной команды проекта, сплоченный коллектив, помогут добиться успешного выполнения опытно-конструкторских работ и создания автоматизированной установки.

Из полученных стратегических альтернатив необходимо выбрать те, которые будут обладать наибольшей силой, весом.

1. Приоритеты угроз – сопоставление угроз с преимуществами и рыночными возможностями. Получения патента на мировом уровне, позволит добиться охраны интеллектуальной собственности на международном рынке. Привлечение специалистов из областей рекламы позволит просветить компании-потребители о существующем методе получения контактной пары медь-алюминий с улучшенными характеристиками.

2. Приоритеты развития – немедленное улучшение слабых мест, сопоставление недостатков с преимуществами и рыночными возможностями.

Наиболее существенными недостатками, которые необходимо разрешить в ходе реализации проекта являются проблемы, связанные с отсутствием в команде экономистов и маркетологов, и малый объем производства. При этом имеется высокая возможность освоения и развития рынка. Такие возможности могут заинтересовать специалистов по экономике и маркетингу топ-уровня.

Таким образом, в ходе SWOT-анализа удалось выявить наиболее важные проблемы, которые необходимо разрешить в процессе выполнения проекта: повышение объемов производства контактной пары медь-алюминий за счет создания автоматизированной установки и привлечение в команду высококвалифицированных экономистов и маркетологов.

5.2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок

Исходя из SWOT-анализа, стратегия развития состоит из двух сторон: осуществление на базе завершенной НИР этапа ОКР, связанного с созданием опытной производственной линии; параллельная подготовка к стадии коммерциализации проекта, т.е. к осуществлению первых продаж продукта.

Разработаем календарный план проекта. Для построения сетевого графика приведем перечень работ (приложение Б – таблица Б.3). При помощи этой таблицы построим сетевой график, гистограммы бюджета и трудовых ресурсов по времени (приложение Б – рисунки Б.1-3). Сетевой график дает четкое представление о порядке следования работ, но он недостаточно нагляден для определения работ в некоторый момент времени. Построим график учета выполнения работ, представленный в приложение Б (таблица Б.4).

Таблица 5.1 – Бюджет проекта

			I квартал			II квартал			III квартал	
Основные показатели инвестиционного проекта	**ед.изм**	**всего**	**Март**	**апр**	**май**	**июнь**	**июль**	**авг**	**сент**	**окт**
Суммарные затраты по проекту / сроки реализации	**тыс.руб/ дни**	**20927 / 209**	**346,5**	**8443,5**	**7300**	**2680**	**840**	**835**	**472**	**10**
Исследование рынка	**тыс.руб/ дни**	**10,5 / 7**	**10,5**							
оплата труда рабочих	тыс.руб	10,5								
Модернизация системы	**тыс.руб/ дни**	**300 / 30**	**300**							
оплата труда рабочих	тыс.руб	300								
Составление бизнес-плана	**тыс.руб/ дни**	**8. / 4**	**8**							
оплата труда рабочей группы финансистов	тыс.руб	8								
Работа с инвесторами	**тыс.руб/ дни**	**28 / 14**	**28**							
оплата труда рабочих	тыс.руб	14								
поездки в пределах области и соседних регионах	тыс.руб	14								
Регистрация предприятия	**тыс.руб/ дни**	**15. / 9**		**15**						
услуги юриста	тыс.руб	5								
оплата расходов	тыс.руб	10								
Поиск дополнительного персонала	**тыс.руб/ дни**	**7. / 7**		**7**						
оплата труда	тыс.руб	7								
Поиск поставщиков	**тыс.руб/ дни**	**20. / 10**		**20**						

оплата труда	тыс.руб	15								
поездки в пределах области и соседних регионах	тыс.руб	5								
Расширение производственных площадей	**тыс.руб/ дни**	**6000 / 14**		**6000**						
оплата труда	тыс.руб	30								
оплата услуг жилищного агенства	тыс.руб	30								
покупка необходимого помещения	тыс.руб	5000								
оформление помещения в собственность	тыс.руб	20								
фонд непредвиденных расходов	тыс.руб	900								
Рекламная кампания	**тыс.руб/ дни**	**2400 / 120**		**400**	**400**	**400**	**400**	**400**	**400**	
оплата услуг рекламной компании	тыс.руб	2000								
фонд непредвиденных расходов	тыс.руб	400								
Наем дополнительного персонала	**тыс.руб/ дни**	**1,5 / 3**		**1,5**						
оплата труда персонала	тыс.руб	1,5								
Закупка оборудования	**тыс.руб/ дни**	**10000 /45**		**2000**	**6500**	**1500**				
проведение тендера	тыс.руб	100								
поездки ддя заключения договоров	тыс.руб	50								
покупка оборудования	тыс.руб	9000								
фонд непредвиденных расходов	тыс.руб	850								
Отделка помещения	**тыс.руб/ дни**	**400 / 15**			**400**					
закупка стройматериалов	тыс.руб	200								
оплата труда рабочих	тыс.руб	200								
Монтаж оборудования	**тыс.руб/ дни**	**900 / 30**				**780**	**120**			

оплата труда рабочих	тыс.руб	850								
фонд непредвиденных расходов	тыс.руб	50								
Акт сдачи – приема	**тыс.руб/ дни**	**2. / 3**					**2**			
оплата услуг юриста	тыс.руб	2								
Отладка системы	**тыс.руб/ дни**	**48 / 12**					**48**			
закупка исходных реагентов	тыс.руб	8								
оплата труда рабочих	тыс.руб	40								
Исследование и анализ продукта	**тыс.руб/ дни**	**150 / 20**					**150**			
оплата труда рабочих	тыс.руб	100								
проведение анализов на специальном оборудовании	тыс.руб	50								
Автоматизация системы	**тыс.руб/ дни**	**150 / 15**					**120**	**30**		
оплата труда рабочих	тыс.руб	150								
Выход на производственные мощности	**тыс.руб/ дни**	**450 / 30**						**405**	**45**	
оплата труда рабочих	тыс.руб	450								
Поиск покупателей	**тыс.руб/ дни**	**30 / 30**							**27**	**3**
оплата труда рабочих	тыс.руб	30								
Заключение договоров	**тыс.руб/ дни**	**7 / 7**								**7**
оплата труда рабочих	тыс.руб	7								

Разработаем производственный план проекта. Предлагаемый проект является инновационным, т.е. в его основе имеется принципиально новая идея, внедрение которой является потенциально коммерциализируемой. Выполнение опытно-конструкторских работ предполагается на базе лаборатории магнитоплазменных технологий ТПУ. Наиболее оптимальный вариант –создание малого инновационного предприятия. Основными преимуществами такого вида коммерческой деятельности являются более быстрая адаптация к требованиям рынка, гибкость управления и оперативность в выполнении принимаемых решений, низкая потребность в первоначальном капитале и прочее. Однако в данном проекте необходимо учесть вариант реализации, в том числе и при использовании собственных основных фондов. Расчетный бюджет проекта при таком способе реализации приведен ниже в приложении Б (таблица Б.4).

Таким образом, потребность в инвестициях составляет 20 927 000 рублей. Финансирование проекта возможно на средства частных инвесторов – бизнес-ангелов, либо из средств венчурных фондов (в том числе, РВК – российской венчурной компании).

Проведем расчет финансового плана (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Финансовый план

Показатели	Тыс. руб				
	2016	2017	2018	2019	2020
Инвестиционные вложения	21000				
Поступления от продаж		28000,0	32000,0	36000,0	40000,0
Себестоимость		9000,0	10800,0	11700,0	12600,0
Амортизация		2500,0	2500,0	2500,0	2500,0
Налоги		3800,0	4240,0	4860,0	5480,0
Прибыль		19000,0	21200,0	24300,0	27400,0
Чистая прибыль		15200,0	16960,0	19440,0	21920,0
Чистый доход		17700,0	19460,0	21940,0	24420,0
Рентабельность продаж		0,54	0,53	0,54	0,55
Рентабельность произ-ва		0,61	0,68	0,78	0,88

Инвестиционные вложения рассчитаны с учетом бюджета проекта и расширения производства (закупка оборудования) через два года. Налоги посчитаны по упрощенной системе налогообложения (20% от выручки).

На протяжении анализируемого периода поступления от основной деятельности являются положительными и возрастают от периода к периоду. Таким образом, основная деятельность дает стабильный приток денежных средств, что положительно характеризует финансовое состояние предприятия.

5.3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности

Разработаем инвестиционный план проекта

К числу основных финансовых показателей относят:

1. ЧДД (NPV) – чистый дисконтированный доход:

$$NPV = \sum_{i=1}^{n} \frac{ЧД_i}{(1+r)^i} - \sum_{i=1}^{n} \frac{K_i}{(1+r)^i} = \frac{17700}{(1+0,1)^1} + \frac{19460}{(1+0,1)^2} + \frac{21940}{(1+0,1)^3} + \frac{24420}{(1+0,1)^4} - \frac{21000}{(1+0,1)^0} = 44336 \; тыс.руб$$

где $ЧД_i$ – чистый доход i-го года; K_i – объем инвестиций по годам реализации проекта; n – срок реализации проекта; r – номер дисконта, принимаем равной 0,1.

2. ИД (PI) – индекс доходности:

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{ЧД_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{K_i}{(1+r)^i}} = \frac{\frac{17700}{(1+0,1)^1} + \frac{19460}{(1+0,1)^2} + \frac{21940}{(1+0,1)^3} + \frac{24420}{(1+0,1)^4}}{\frac{21000}{(1+0,1)^0}} = 3,111$$

3. $T_{ок}$ – дисконтируемый срок окупаемости:

$$NPV_0 = \frac{21000}{(1+0,1)^0} = -21000\ тыс.руб;$$

$$NPV_1 = \frac{17700}{(1+0,1)^1} - \frac{21000}{(1+0,1)^0} = -4909\ тыс.руб;$$

$$NPV_2 = \frac{17700}{(1+0,1)^1} + \frac{19460}{(1+0,1)^2} - \frac{21000}{(1+0,1)^0} = 11174\ тыс.руб;$$

$$NPV_3 = \frac{17700}{(1+0,1)^1} + \frac{19460}{(1+0,1)^2} + \frac{21940}{(1+0,1)^3} - \frac{21000}{(1+0,1)^0} = 27657\ тыс.руб.$$

$$NPV_4 = \frac{17700}{(1+0,1)^1} + \frac{19460}{(1+0,1)^2} + \frac{21940}{(1+0,1)^3} + \frac{24420}{(1+0,1)^4} - \frac{21000}{(1+0,1)^0} = 44336\ тыс.руб.$$

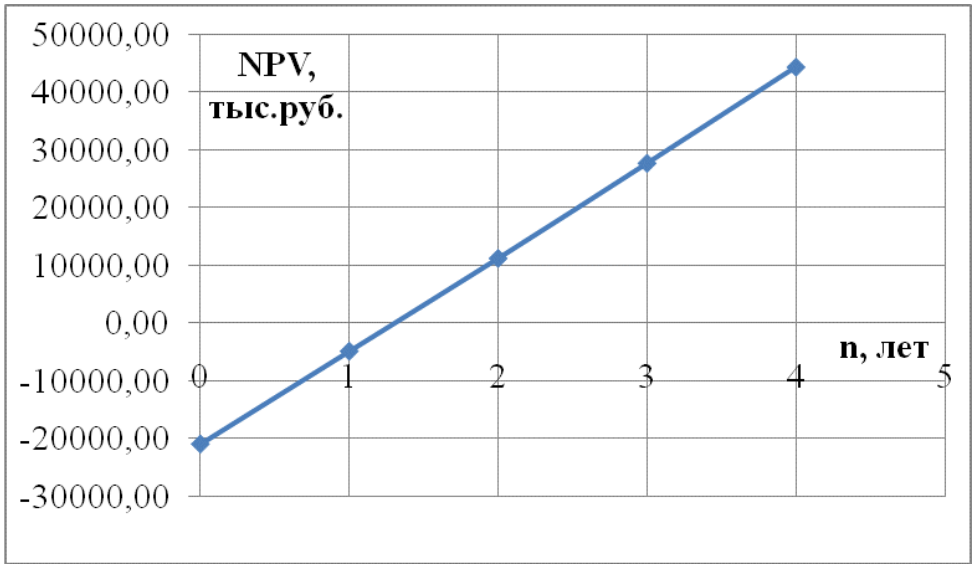


Рисунок 5.3 – График NPV(t)

Дисконтируемый срок окупаемости 2 года.

4. ВНД (IRR) – внутренняя норма доходности:

$$IRR = r \text{ при } NPV = 0;$$

$$NPV_{r=0,2} = 31737 \text{ тыс.руб};$$

$$NPV_{r=0,3} = 26667 \text{ тыс.руб};$$

$$NPV_{r=0,8} = 15924 \text{ тыс.руб};$$

$$NPV_{r=1,0} = 928 \text{ тыс.руб};$$

$$NPV_{r=1,2} = -5830 \text{ тыс.руб}.$$

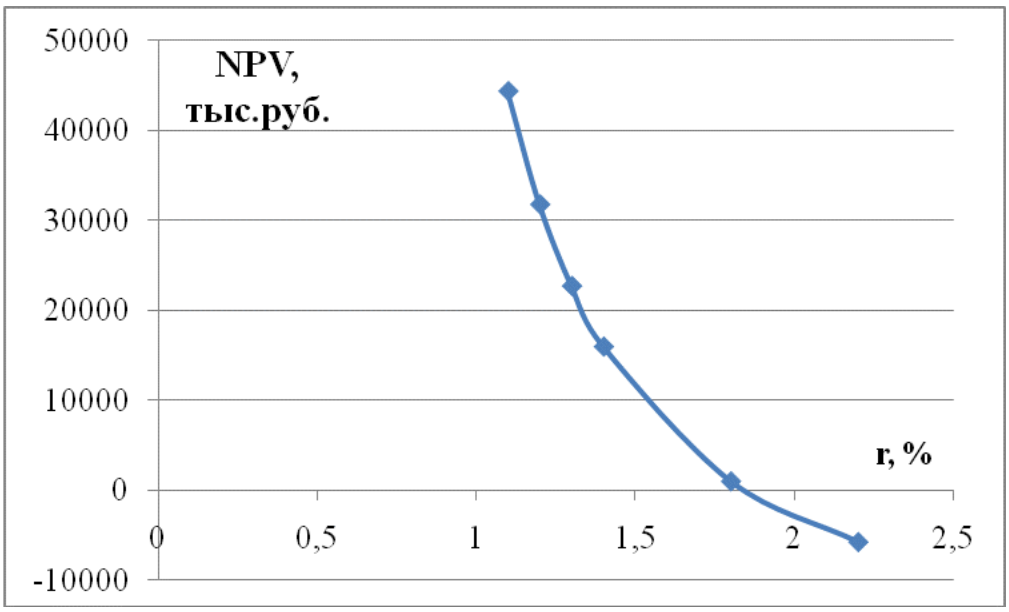


Рисунок 5.4 – График NPV(r)

По расчетам получено IRR=101%.

Произведем оценку рисков. Определение и рисков является одним из важнейших моментов при создании проекта. Учет рисков поможет при реализации проекта избежать опасных факторов, негативно отражающихся на внедрении в жизнь проекта. С целью классификации рисков в первую очередь составляется древо рисков, изображенное в приложении Б (рисунок Б.4).

Далее производится оценка важности рисков. При оценке важности рисков оценивается вероятность их наступления (P_i). По шкале от 0 до 100 процентов: 100 – наступит точно, 75 – скорее всего наступит, 50 – ситуация неопределенности, 25 – риск скорее всего не наступит, 0 – риск не наступит. Оценка важности риска оценивается весовым коэффициентом (w_i). Важность оценивается по 10- балльной шкале b_i. Сумма весовых коэффициентов должна равняться единице. Оценка важности рисков приведена в таблицах 5.3-5.7.

Таблица 5.3 – Социальные риски

Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
Низкая квалификация ремонтного персонала	0	2	0,071	0
Непросвещенность компаний о предлагаемом методе	50	5	0,178	8,928
Бюрократические проволочки на стадии регистрации	50	8	0,285	14,285
Несоблюдение техники безопасности	25	7	0,25	6,25
Увеличение нагрузки на персонал	50	5	0,178	8,928
Отсутствие корпоративных стандартов	75	1	0,035	2,678
Сумма		28	1	41,071

Таблица 5.4 – Экономические риски

Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
Инфляция	100	1	0,019	1,960
Экономический кризис	25	2	0,039	0,980
Недобросовестность поставщиков	25	6	0,117	2,941
Непредвиденные расходы в плане работ	50	7	0,137	6,862
Снижение уровня спроса на продукцию	50	10	0,196	9,803
Сложность выхода на мировой рынок	75	7	0,137	10,29
Колебания рыночной конъюнктуры	25	6	0,117	2,941
Отсутствие в числе сотрудников экономистов	25	2	0,039	0,980
Низкие объемы сбыта	50	10	0,196	9,803
Сумма		51	1	46,56

Таблица 5.5 – Политические риски

Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
Снижение приоритета Правительства РФ в энергосбережения	25	7	0,466	11,66
Смена власти	0	1	0,066	0
Угроза национализации	0	1	0,066	0
Отсутствие поддержки со стороны чиновников	75	6	0,4	30
Сумма		15	1	41,66

Таблица 5.6 – Технологические риски

Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
возможность поломки оборудования	25	7	0,25	6,25
низкое качество поставленного оборудования	25	9	0,3214	8,0357
неправильная сборка оборудования	25	8	0,2857	7,1428
опасность для работающего персонала и аппаратуры	75	4	0,1428	10,714
Сумма		28	1	32,142

Таблица 5.7 – Научно-технические риски

Риски	P_i	b_i	w_i	$P_i \cdot w_i$
развитие конкурентных технологий	75	7	0,145	10,937
создание новых методов получения контактной пары	75	7	0,145	10,937
риск невозможности усовершенствования технологии	50	8	0,166	8,333
отсутствие результата в установленные сроки	50	7	0,145	7,2916
получение отрицательного результата при внедрении в производство	25	10	0,208	5,208
несвоевременное патентование	25	9	0,187	4,687
Сумма		48	1	47,395

Далее производится расчет общих рисков (таблица 5.8), который дает общую оценку в 43, т.е. проект имеет право на жизнь, хотя и не лишен препятствий. Оценка групп риска с наиболее высокими показателями будет учтена на этап ОКР, чтобы по возможности снизить их отрицательное влияние.

Таблица 5.7 – Общие риски

№ п/п	Риски	P_i	b_i	w_i	b_i*w_i
1	Социальные	6	0,162	41,071	6,660
2	Экономические	9	0,243	46,568	11,327
3	Политические	4	0,108	41,666	4,504
4	Технологические	8	0,216	32,142	6,949
5	Научно-технические	10	0,270	47,395	12,809
Итого			9		43

Для того чтобы избежать риски или минимизировать их воздействие на проект необходимо проводить мероприятия по борьбе с рисками. Рекомендуемые мероприятия приведены ниже.

Социальные риски:

1. низкая квалификация ремонтного персонала - не скупиться на зарплату высококвалифицированному персоналу, затратить время на поиск персонала;

2. непросвещенность компаний о предлагаемом методе – писать статьи в научно-популярных изданиях, проводить работу с инвесторами;

3. бюрократические проволочки на стадии регистрации – запастись терпением;

4. несоблюдение техники безопасности – применять информационные стенды и сообщения, обязательное получение допуска по ТБ, ведение журнала ТБ;

5. увеличение нагрузки на персонал – организация режима труда-отдыха, премирование добросовестных работников;

6. отсутствие корпоративных стандартов – проведение коллективных мероприятий, «корпоративных пятниц».

Экономические риски:

1. инфляция – закладывание в бюджет дополнительных потерь финансовых средств от инфляции;

2. экономический кризис – прогнозирование экономической ситуации;

3. недобросовестность поставщиков – поиск добросовестных и проверенных поставщиков;

4. непредвиденные расходы в плане работ – закладка в бюджет и план работ дополнительных расходов;

5. снижение уровня спроса на продукцию – проведение рекламной кампании;

6. сложность выхода на мировой рынок – проведение рекламной кампании за рубежом, поиск опытных экономистов;

7. колебания рыночной конъюнктуры – отслеживание рынка «спроса-предложение», прогнозирование экономической ситуации;

8. отсутствие в числе сотрудников экономистов – поиск квалифицированных специалистов;

9. низкие объемы сбыта – поиск покупателей, проведение рекламных кампаний.

Технологические риски:

1. возможность поломки оборудования – заказ качественного оборудования известных фирм-производителей, качественный монтаж и эксплуатация оборудования;

2. низкое качество поставленного оборудования – заказ качественного оборудования известных фирм-производителей;

3. неправильная сборка оборудования – качественный монтаж и эксплуатация оборудования;

4. опасность для работающего персонала и аппаратуры – проведение мероприятий по ТБ.

Научно-технические риски:

1. развитие конкурентных технологий, создание новых методов получения контактной пары, риск невозможности усовершенствования технологии – искать и рассматривать всевозможные пути оптимизации;

2. отсутствие результата в установленные сроки – премирование и штрафные санкции к ответственным за выполнение работ по плану, отслеживание времени начала и окончания работ, четкого графика;

3. получение отрицательного результата при внедрении в производство – согласование и контакт с возможными покупателями продукта;

4. несвоевременное патентование – назначение ответственных за написание и оформление патентных документов, как в РФ, так и на международном уровне.

Таким образом, при учете возможности возникновения факторов, указанных при оценке рисков, а также при применении вышеуказанных мероприятий, предлагаемый проект является реализуемым. В особенности при реализации этапа опытно-конструкторских работ следует обратить внимание на научно-технические и технологические риски.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1. Создание медь-алюминиевых покрытий плазмодинамическим методом [Электронный ресурс] / Н. Р. Нафигин [и др.] // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VII Международной научно-технической конференции, 14-16 октября 2015 г., г. Томск / Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ) ; Томская область, Администрация ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — [С. 315-317]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader. Режим доступа: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C112/064.pdf