

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 метода получения несущего анода $\text{NiO} - \text{ZrO}_2: \text{Y}_2\text{O}_3$ (NiO-YSZ) для топливных водородных элементов по технологии искрового плазменного спекания

УДК 620.91:539.26:621.352.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM4E	Пропой Михаил Сергеевич		

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

(Подпись) (Дата) **Завьялов В.М.**
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5AM4E	Пропой Михаил Сергеевич

Тема работы:

Разработка метода получения несущего анода $\text{NiO} - \text{ZrO}_2:\text{Y}_2\text{O}_3$ (NiO-YSZ) для топливных водородных элементов по технологии искрового плазменного спекания	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	04.02.2016 г. № 764/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2016
--	------------

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>	Установка искрового плазменного спекания SPS 10–4; композитный материал состава $\text{NiO} - \text{ZrO}_2:\text{Y}_2\text{O}_3$; образцы, полученные искровым плазменным спеканием.
--	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки и 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>	Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки и техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования; исследование образцов, полученных искровым плазменным спеканием; экономический анализ проекта; исследование вредных и опасных факторов рабочего места; заключения по работе.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Грахова Е.А.
Социальная ответственность	Дашковский А.Г.
Иностранный язык	Матухин Д.Л.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение	
Экспериментальная часть	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	17.09.14 г.
---	-------------

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
5AM4E	Пропой Михаил Сергеевич		

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

Институт Энергетический (ЭНИН)

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Уровень образования магистр

Кафедра Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)

Период выполнения осенний 2014/2015/, весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	25.05.16 г.
--	-------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
18.04.16	<i>Обзор литературы</i>	25
10.05.16	<i>Методика проведения исследований</i>	35
25.05.16	<i>Экспериментальная часть</i>	40

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
Электроснабжение промышленных предприятий	Завьялов В.М.	д.т.н., доцент		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM4E	Пропой Михаил Сергеевич

Институт	Энергетический	Кафедра	Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Приблизительная стоимость ресурсов научного исследования, в том числе научно-технического оборудования, составляет около 35 млн. руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Налоги рассчитать по упрощенной системе налогообложения (20% от прибыли), ставку дисконтирования принять равной 0,1

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Определение концепции проекта, факторов микро- и макросреды, анализ рынка продукта, , SWOT-анализ
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Не разрабатывается
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Разработка календарного плана, бюджета проекта, финансового плана
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Экспертная оценка эффективности, оценка рисков

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Экспертная оценка проекта без учета и с учетом коэффициента значимости</i>
2. <i>SWOT-анализ</i>
3. <i>Перечень работ</i>
4. <i>Сетевой график</i>
5. <i>Гистограмма бюджета по времени</i>
6. <i>Гистограмма трудовых ресурсов по времени</i>
7. <i>График Ганта</i>
8. <i>Бюджет проекта</i>

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM4E	Пропой Михаил Сергеевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM4E	Пропой Михаил Сергеевич

Институт	Энергетический	Кафедра	Электроснабжение промышленных предприятий (ЭПП)
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»	<i>Описание места проведения работ по разделу на предмет:</i> - возникновения вредных и опасных проявлений факторов производственной среды; - возникновения негативного воздействия на окружающую среду; - возникновения чрезвычайных ситуаций (пожара); - организации работы отдела охраны труда и его месторасположения.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке	1. Анализ вредных факторов, проектируемой производственной среды в следующей последовательности: - выдержки из действующих нормативов на нормы с необходимой размерностью (с ссылкой на соответствующий нормативно технический документ); - предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства); - описание технических систем, обеспечивающих требования нормативов. 2. Анализ опасных факторов проектируемой производственной среды: - электробезопасность (технические способы защиты). 3. Охрана окружающей среды: - анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); - анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); - анализ воздействия объекта на литосферу (твердые отходы). 4. Защита в чрезвычайных ситуациях: - пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения); - 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. 5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: - характерные для проектируемой рабочей зоны правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия управления охраной труда.
Перечень расчетного и графического материала	- план помещения рабочей зоны; - расчет искусственного освещения для помещения; - план эвакуации.

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM4E	Пропой Михаил Сергеевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 148 с., 66 рис., 21 табл., 113 источников, 3 прил.

Ключевые слова: искровое плазменное спекание, анод твердооксидного топливного элемента, «керметный» электрод, композит на основе NiO и YSZ (оксид циркония, стабилизированный 8÷10мол.% оксида иттрия), катод ТОТЭ, аккумулятор водорода - нитрид кремния.

Объектом исследования является ультрадисперсные монокристаллические порошки и керамика следующих составов: $\text{NiO} - \text{ZrO}_2:\text{Y}_2\text{O}_3$, нитрид кремния Si_3N_4 , $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{O}_{3-x}$.

Цель работы – разработка способа получения несущего анода $\text{NiO} - \text{ZrO}_2:\text{Y}_2\text{O}_3$ (NiO-YSZ) для топливных водородных элементов по технологии искрового плазменного спекания, а также оценка возможности изготовления S_3N_4 -керамики для аккумуляторов водорода и LSCF-керамики в качестве материала катода - элемента ТОТЭ.

В процессе исследования проводился анализ структурных характеристик и фазовый анализ порошковых материалов и керамики, полученной по технологии искрового плазменного спекания.

В результате исследования получена керамика состава $\text{NiO} - \text{ZrO}_2:\text{Y}_2\text{O}_3$ с плотностью 25-40% и газопроницаемостью от 1,2 до 1,5 мл/мин, а также керамика S_3N_4 с массовым содержанием водорода 0,25% и $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{O}_{3-x}$ -керамика.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: в работе предложен способ создания несущего анода для топливного элемента, в основу которого положена технология искрового плазменного спекания, кроме этого методом искрового плазменного спекания получены образцы S_3N_4 , являющимися перспективными аккумуляторами водорода. Одной из сопутствующих задач в работе являлось получение материала катода в качестве мишени для установок магнетронного напыления.

Степень внедрения: технология прошла апробацию в лабораторных условиях.

Область применения: в топливных ячейках твердооксидных топливных элементов; в химической промышленности при изготовлении фильтров, керамических горелок и т.п.

Экономическая эффективность/значимость работы. В разделе финансовый менеджмент представлены результаты расчета срока окупаемости, согласно которым изготовление анода методом искрового плазменного спекания имеет срок окупаемости 6 лет.

В будущем планируется отработка оптимального режима изготовления как отдельных элементов топливной ячейки, так и всей ячейки топливного водородного элемента.

Оглавление

Введение.....	9
1 Обзор литературы	11
1.1 Конструкция твердооксидных топливных элементов	12
1.2 Аноды ТОТЭ.....	16
1.3 Методы изготовления анодов ТОТЭ.....	18
2 Методика проведения исследований	32
2.1 Гомогенизация и диспергирование порошкового материала.....	32
2.2 Установка искрового плазменного спекания	33
2.3 Методики исследований полученных образцов	36
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... 41	
4.1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ.....	41
4.2 Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет и организация закупок.....	51
4.3 Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности .	56
Заключение по разделу	59
Список публикаций студента	60

Введение

В настоящее время все больше увеличивается потребность человечества в электрической энергии. Но рост производства данного продукта затрудняется ограниченностью в запасах органического топлива, нарушением экологической обстановки, изношенностью оборудования ТЭЦ. Решить же данную проблему строительством АЭС также является сложной задачей. Возобновляемая энергетика тоже не является решением проблемы в виду невысокого КПД, определенных требований к природным условиям, трудностей при включении данных источников в энергосистему, а также практически исчерпавших свой ресурс ГЭС. Использование же термоядерной энергии остается задачей на ближайшее будущее.

В виду всех вышеуказанных проблем в настоящее время наукой решается задача по повышению энергоэффективности производства электроэнергии, а также её передачи и использования. Решить данную задачу возможно только созданием и внедрением новых, более эффективных и надежных материалов, оборудования и технологий.

Одним из перспективных и активно-развивающихся направлений решения проблем обеспечения электрической энергией потребителей в различных, в том числе и сложных условиях, являются твердооксидные топливные элементы [40] (ТОТЭ, по международной терминологии — SOFC).

Преимущества твердооксидных топливных элементов в том, что они не нуждаются в дорогом катализаторе (платине) в отличие от твердо-полимерных, щелочных и фосфорно-кислотных топливных элементов. К тому же ТОТЭ могут работать на многих видах топлива, а также выделяются высоким КПД и экологичностью. При использовании ТОТЭ имеется возможность использования отходящей тепловой энергии для производственных и бытовых нужд, при этом КПД может достигать 67-93% [1].

- Крупные стационарные установки мощностью 1 МВт и выше;
- Бытовые стационарные установки мощностью 100 Вт — 10 кВт;
- Установки для бортового электропитания транспорта (например, автомобильные рефрижераторы) мощностью порядка 5-15 кВт;
- Силовые установки водного транспорта;
- Установки в труднодоступных районах без инфраструктуры (месторождения, крайний север, пустыня, горы и пр.).

Основными трудностями технологий ТОТЭ в настоящее время являются высокая стоимость и низкий ресурс батарей топливных элементов. На решении этих проблем в настоящее время сосредоточены большие исследовательские усилия по всему миру, направленные на совершенствование производства наноструктур электродно-электролитной сборки и разработку наиболее рациональных конструкций ТОТЭ. Кроме государственных организаций, исследования поддерживают крупные производители энергооборудования (Siemens, General Electric, Mitsubishi, и др.).

1 Обзор литературы

В конце 90-х годов XX века начался прорыв в технологиях производства ТОТЭ, связанный с началом применения в них нанодисперсных порошков. С этим связано и рост интереса к ТОТЭ. Статистика публикаций и результаты патентных исследований позволяют проследить динамику изменения заинтересованности этим вопросом. На рис. 1 представлен график числа публикаций в ведущих научных журналах по годам за последние 20 лет (согласно международной научной базе, ScienceDirect [4], при поиске по слову «sofc»). Аналогичный график, но для числа патентных документов представлен на рис. 2 за период 2009-2014 годов (согласно международной патентной базе Espacenet [6] по классу международной патентной классификации H01M8/12 – топливные элементы с твердым электролитом, работающие при высокой температуре, например со стабилизированным электролитом ZrO_2 [7]).

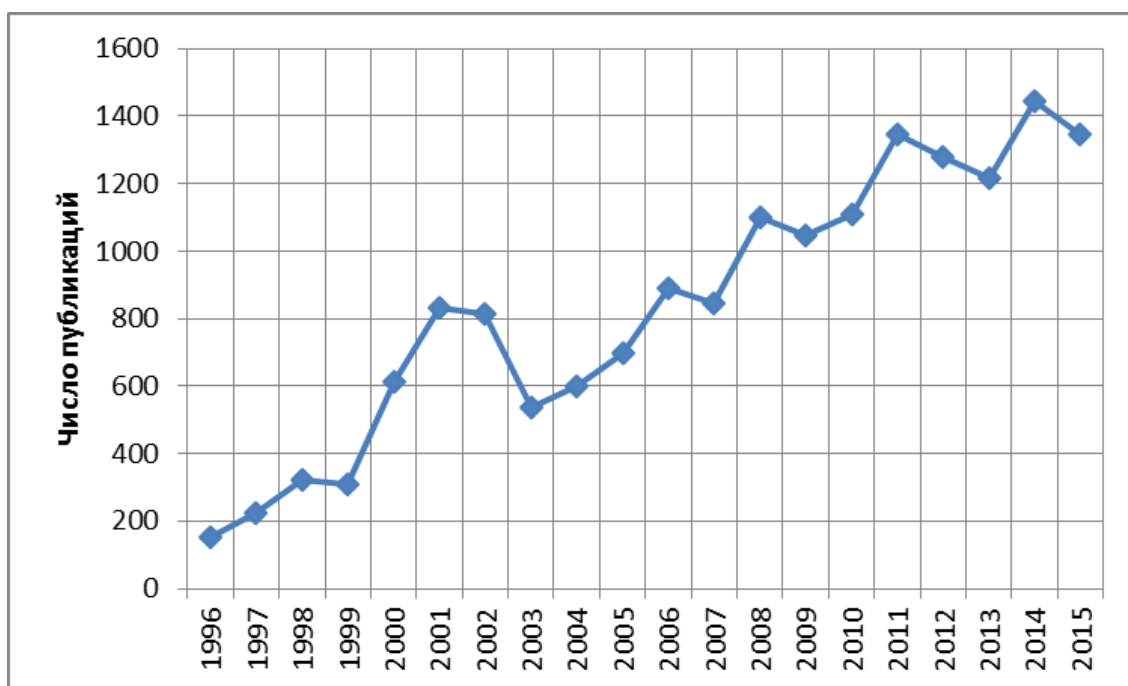


Рисунок 1.1 – Число публикаций в ведущих научных журналах в зависимости от года

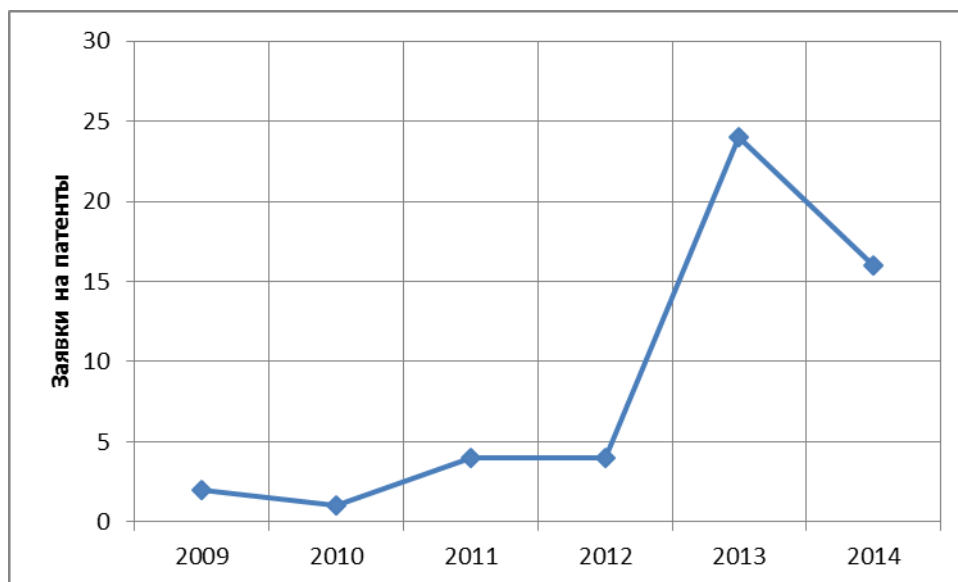


Рисунок 1.2 – Число патентных документов в зависимости от года публикации

Как видно из рис.1.1 и рис.1.2 за последние пять лет число, как научных статей, так и патентных заявок остается стабильно высоким с тенденцией к росту. Анализ тенденций развития технологий ТОТЭ [7], рассматривавший как исследовательскую активность, так и коммерческое внедрение, позволил заключить, что ТОТЭ в настоящее время находятся в самой динамичной стадии развития – стадии роста.

1.1 Конструкция твердооксидных топливных элементов

В ТОТЭ, как и во всех топливных элементах [37-39], химическая энергия преобразуется в электрическую. Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) состоят из трех основных компонентов: анод, катод и электролит. В качестве анодного материала наиболее часто используют кермет из никеля и твердого оксидного электролита [2]. В качестве катодного материала чаще всего используется манганит лантана-стронция [3].

Электроды современных конструкций ТОТЭ имеют многослойную структуру. Каждый слой выполняет определенную функцию. Анод как минимум изготавливается из двух слоев – функционального, на котором протекает реакция окисления топлива, и токосъемного. Катод также состоит из нескольких слоев – функционального, токосъемного и контактного. Задачей функционального слоя является уменьшение сопротивления реакции восстановления молекулярного кислорода до ионов O^{2-} и он должен иметь развитую поверхность и систему мелких пор. Задачей токосъемного слоя как анода, так и катода является уменьшение слоевого сопротивления электрода, а также он должен обеспечивать подвод газа к функциональному слою. Для этого его изготавливают из более крупного порошкового материала с добавлением порообразователей, таких как сажа, крахмал. Контактный слой несет функцию улучшения электрического контакта между катодом и биметаллической пластиной.

На рис. 1.3 и 1.4 представлены наиболее перспективные конструкции ТОТЭ – плоская (планарная) и трубчатая [99-104]. В основном они выполняются либо с несущим анодом, либо с несущим электролитом. Плоская конструкция позволяет применять для изготовления ТОТЭ более современные технологичные способы формирования несущего анода, а также функциональных слоев. К достоинствам трубчатой конструкции относится наличие значительно меньшего количества герметизирующих швов, а также меньшие механические напряжения на конструкцию. Топливные каналы в данных конструкциях служат не только для подвода топлива, но и для отвода продуктов реакции. Воздух также выполняет несколько функций. Одновременно с выступлением в роли окислителя в электрохимической реакции, он еще и отводит тепло, которое выделяется при реакции.

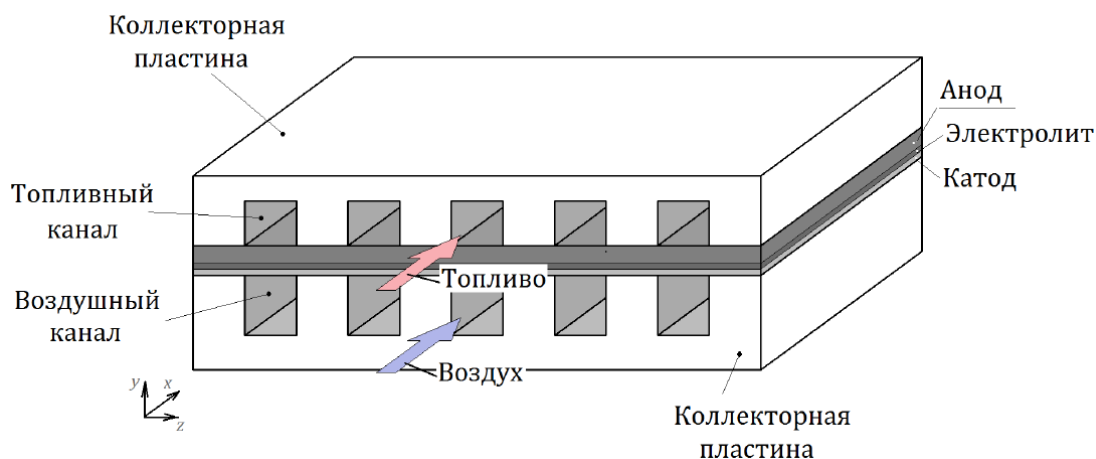


Рисунок 1.3 – Конструкция плоского ТОТЭ

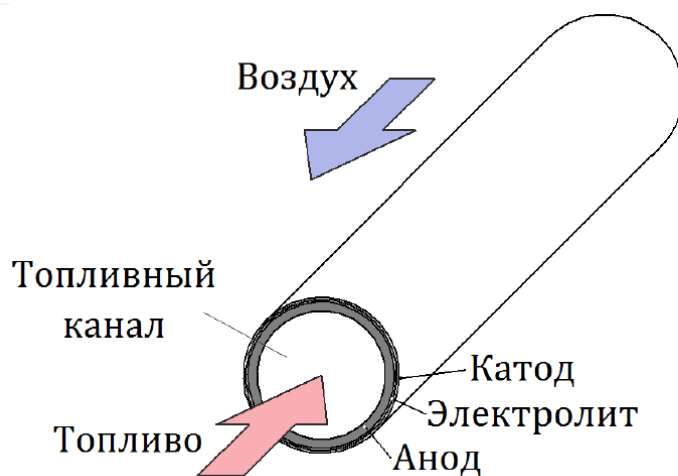


Рисунок 1.4 – Конструкция трубчатого ТОТЭ

С точки зрения экологии наиболее привлекательным является использование в качестве топлива водорода, который при его электроокислении превращается в водяной пар. Но могут применяться и различные углеводороды [43,44]. В качестве окислителя в ТОТЭ используют чистый кислород или воздух. Кислород восстанавливается до ионов, которые переносятся по кислородным вакансиям кристаллической решетки твердого электролита и реагируют на аноде с водородом, образуя воду. Для того чтобы эти реакции происходили, анод и катод должны быть подключены к нагрузке (рис.1.5).

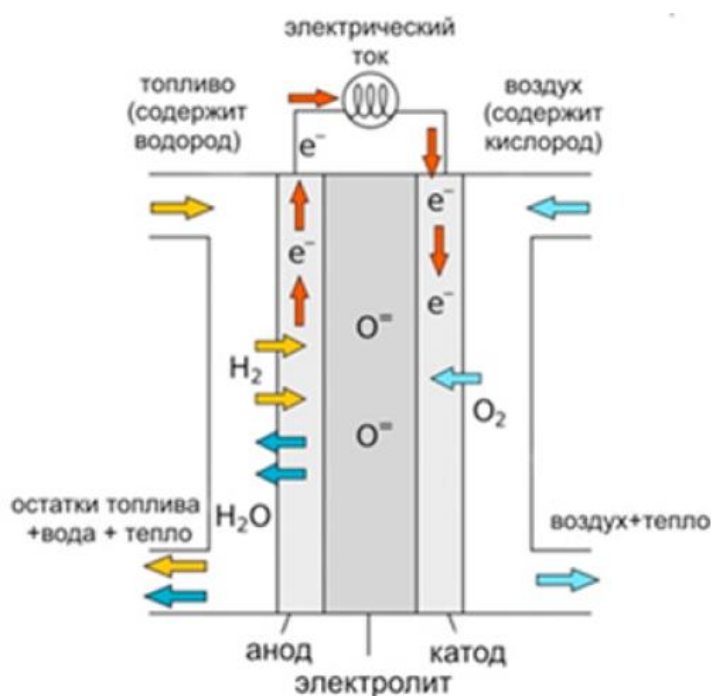


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема топливного элемента

Ячейка с несущим электродом изготавливается следующим образом. На толстую пористую подложку, выполняющую функцию токосъемного слоя, наносится функциональный слой анодного электрода. Подложка выполнена из анодного материала – субстрата, с высоким содержанием NiO. Далее поверх функционального слоя наносится слой электролитического материала. Затем наносится катодный электрод.

Наиболее распространённой является электролит-поддерживающая структура ТОТЭ. Недостатком данной конструкции являются большие омические потери на транспорт ионов через электролит, которые составляют половину от всех потерь в топливной ячейке. Снижение же этих потерь можно достичь только уменьшением толщины электролитической мембраны. Но данный метод ограничивается прочностными характеристиками электролитической мембраны, т.к. уже при 150 мкм происходит нарушение её прочности.

Более обширной распространенности анод-поддерживающей конструкции мешает трудность изготовления газоплотного слоя анионного

проводника. В качестве внешней поддержки могут применяться и непроводящие подложки, а также подложки из нержавеющей стали. Но с первыми связаны проблемы токосъема с электродов ТОТЭ, а со-вторыми – проблемы деградации контакта и отслаивания подложки от топливной ячейки. Применение катод-поддерживающих конструкций ТОТЭ затруднено тем, что при спекании электролитического слоя поверх катодного происходит взаимодействие между этими слоями с образованием непроводящих материалов. Данный процесс связан с тем, что уже при 1200°C происходит взаимодействие манганитных соединений (само спекание электролитического слоя происходит при температуре около 1500°C), которые являются основным материалом катодов, с электролитическими материалами.

1.2 Аноды ТОТЭ

Как уже говорилось выше, основным наиболее эффективным материалом анода в настоящее время является «керметный» электрод, который представляет собой композит на основе Ni или NiO и YSZ (оксид циркония, стабилизированный 8÷10 мол. % оксида иттрия). Свойства материалов, конструкция электрода описана в монографиях [52,53]. Применение же других материалов ограничено их низкой каталитической активностью, или является нецелесообразным с экономической точки зрения (например, драгоценные металлы Pt и Pd). Также для некоторых материалов наблюдается их нестабильность в водородном топливе (например, сульфиды металлов) [54]. Доказано, что Ni-YSZ обладает самой высокой производительностью в чистом водороде среди всех материалов, когда-либо изученных для ТОТЭ анодов, и в дополнение к своей превосходной совместимостью с YSZ электролитом данный материал остается самым подходящим для изготовления анодного электрода.

Основные требования к аноду:

- высокая электронная и ионная проводимость;
- пористая структура должна быть оптимизирована для массового переноса нужного вида газа;
- тепловое расширение совместимо с другими компонентами ячейки;
- химическая стабильность;
- устойчивость к термоциклированию;
- высокая каталитическая активность;
- достаточная механическая прочность структуры;
- срок службы в течение 5-10 лет.

Также современные микроструктуры анодов ТОТЭ характеризуются следующими параметрами:

- пористость ε_{an} (в пределах 0,22-0,47 [55-60]);
- извилистость пор τ_{na} (в пределах 1,6-3,48 [56-58, 59, 61]);
- средний диаметр пор d_p^{an} (в пределах 0,6-2,6 мкм [56-58, 59, 60]);
- толщина несущего анода δ_{an} (в пределах 0,5-2,45 мм [63-67]).

Пористость ε_{an} определяется как доля объема пористой среды, занятая порами. Извилистость пор τ_{na} представляет собой отношение пути, пройденного вдоль поры, к длине отрезка, соединяющего начальную и конечную точку этого пути.

Экспериментально установлено, что пористую матрицу электродов ТОТЭ можно считать однородной и изотропной [56, 68].

В настоящее время существуют несколько основных способов изготовления анодов твердооксидных топливных элементов. К ним относятся шликерное литье с последующим спеканием в воздушной атмосфере, горячее прессование, спекание, трафаретная печать.

Добавление иттрия к материалу электрода, стабилизированного оксидом циркония, связано с тем, что в результате уменьшается активационная поляризация. Поэтому область трехфазной границы газ–

электролит–электрод не ограничивается контактной поверхностью электролит-электрод, а расширяется в объем электрода, что увеличивает длину трехфазной границы газ-электролит-электрод и снижает активационные потери.

В данный момент наиболее высокие показатели эффективности достигнуты в ТОТЭ с несущим анодом, в которых толщина одного из электродов значительно превосходит толщины двух других слоев электродно-электролитной сборки [69]. В элементах такого типа массоперенос в несущем электроде значительно влияет на мощность и эффективность элемента в целом. Подробно о явлении массопереноса изложено в работах авторов [70-74], в которых изложена наиболее разработанная модель этого процесса.

1.3 Методы изготовления анодов ТОТЭ

Шликерное литье

Шликерное литьё является одним из самых распространённых методов формования керамических материалов.

Оно позволяет, не прилагая высокого давления, получать изделия, имеющие относительно равномерное распределение свойств по объёму вне зависимости от формы изделия.

Шликер представляет собой водную (или же с применением другой дисперсной среды) суспензию порошка с требуемым значением текучести. Данная суспензия заливается без давления или под избыточным давлением в пористую керамическую или гипсовую форму нужного профиля. На следующем этапе жидкая среда либо отфильтровывается через форму, имеющую пористую структуру, либо как в гипсовой форме – впитывается в тело формы. В результате порошковая масса постепенно занимает все пространство формы. В конце концов, форму сушат и удаляют, а полученная деталь подвергается спеканию.

Повышению более равномерного заполнения пресс-форм может служить наложение вибрации на шликер. Таким способом пользовались в работе [49] при шликерном литье из высокодисперсных порошков оксида бериллия с одновременным наложением ультразвукового воздействия.

Керамика в результате шликерного литья имеет ненапряжённую структуру, что связано с тем, что порошки не подвергаются нагружению и не деформируются [50].

Недостатком данного метода является большая трудоемкость, так как технологический процесс состоит из большого количества операций по подготовке и обработке шликеров, последующей сушке и финишной обработки изделий.

Существует несколько видов шликерного литья:

1. Литье из водных суспензий в пористые формы [8, 9];
2. Электрофоретический метод формования [9, 10];
3. Литье под давлением пластифицированных горячих шликеров [10];
4. Протяжка пластифицированных масс (непрерывное литье) [8-11].

Горячее прессование

Горячее прессование — это спекание под давлением. Прессование при высокой температуре имеет ограниченное распространение и применяют его для получения изделий с высокой плотностью из тех материалов, которые при обычном спекании (без давления) не образуют плотного тела [51].

Данный метод применяется при производстве нанокерамик, которые обладают при повышенных температурах эффектом сверхпластичности [45,46]. Применение этого метода позволяет удешевить производство в виду удаления из технологического процесса операции механической обработки.

Недостатком данного метода являются высокие требования к материалу пресс-форм. Этот материал должен быть инертным при повышенных температурах к обрабатываемым порошкам. К тому же он

должен быть жаропрочным, не обладающим свойством сверхпластичности, экономичным [26]. Еще одним немаловажным недостатком является то, что данным способом можно прессовать изделия лишь простейшей формы. Для придания нужной формы изделие придется подвергнуть механической обработке.

Горячее прессование позволяет производить процесс при температурах более низких, чем температура спекания в свободном, ненагруженном состоянии, что в определенных условиях является достоинством данного метода.

Для горячего прессования используют специальные установки (например, индукционные печи нагрева [47]).

Достоинства метода:

- хорошие прочностные характеристики конечных изделий;
- минимальные допуски по размерам заготовок;
- сокращение времени спекания вследствие совмещения процессов

прессования и спекания.

Недостатками горячего прессования в дополнение к вышеуказанным следует отнести быстрый износ пресс-форм, невысокую производительность процесса [26]. К тому же из работы автора [48] стало известно то, что, у керамических сегнетоэлектриков, полученных горячим прессованием, ухудшаются эксплуатационные свойства из-за наличия остаточных напряжений и нарушения стехиометрии по сравнению с обычным обжигом. Несмотря на то, что после обработки электрокерамики данным методом улучшаются её прочностные и макроструктурные характеристики, в результате ухудшаются её сегнетоэлектрические и ферромагнитные свойства. Автор работы [45] отметил значительный рост зёрен в циркониевой керамике, полученной описываемым методом.

Основные теоретические и технологические вопросы, определяющие эффективность процессов прессования порошкообразных масс, описаны рядом авторов [8,11-14].

Завершающей стадией всех традиционных методов формования керамических изделий является высокотемпературный обжиг. В большинстве случаев отформованные изделия имеют в своем составе порошок и связующее. Исходя из этого, спекание осуществляют после предварительного удаления связующего. Таким образом, весь процесс спекания состоит из двух этапов: удаления технологической связки (утильный отжиг) и собственно спекания.

Первый этап протекает при температурах плавления и выгорания технологической связки и заканчивается при температурах начала спекания частиц порошка.

Второй этап протекает от температур начала спекания до температур, обеспечивающих завершение процесса спекания частиц порошка, находящихся в полуфабрикате, в плотный монокристаллический материал [10].

Спекание

Спекание — это процесс уплотнения и упрочнения пористых порошковых изделий под влиянием термической обработки, который сопровождается увеличением плотности и усадки, уменьшением пористости, изменением механических и физико-химических характеристик материала и приближением их к характеристикам компактного материала [15]. Отформованная заготовка перед спеканием имеет пористость 25-60%, а после — 10-15%.

В результате спекания сцепление частиц порошка происходит вследствие взаимной диффузии атомов. Характерными особенностями спекания являются:

а) эффект упрочнения и изменение физико-механических свойств, связанные с изменением величины и качества межчастичных контактных участков;

б) изменение микроструктуры детали (рост зерен, формы и числа пор и т.д.).

Спекание деталей производят в водородных или в вакуумных печах.

Процесс спекания делится на три этапа:

- 1) начальный нагрев до 100-200°C (удаление влаги);
- 2) промежуточный нагрев от 100-200°C до $0,5 t_{пл}$ (снятие упругих напряжений и активное сцепление частиц);
- 3) окончательный нагрев до температуры спекания (восстановление оксидных пленок в защитной или нейтральной среде и полное сцепление частиц). Время выдержки после достижения окончательной температуры спекания составляет несколько часов.

Пример данного метода является работа [17], в которой топливный Ni-керметный электрод изготавливался в виде двухслойного покрытия на твердом электролите. Функциональный слой изготавливался из смеси порошков 56 мас.% NiO + 44 мас.% $\text{Ce}_{0,01}\text{Sc}_{0,1}\text{Zr}_{0,89}\text{O}_{1,92}$ и припекался при 1350°C, а слой токового коллектора – из композиции состава 61 мас.% NiO + 39 мас.% $(0,9\text{ZrO}_2 + 0,1\text{Y}_2\text{O}_3)$ и спекался при 1320°C. После спекания толщина функционального слоя топливного электрода составила около 20 мкм, а суммарная толщина – приблизительно 50 мкм.

Трафаретная печать (Print Screen)

При использовании этого метода паста из используемого материала и связующего проникает через полиэстерную сетку-трафарет на образец [16].

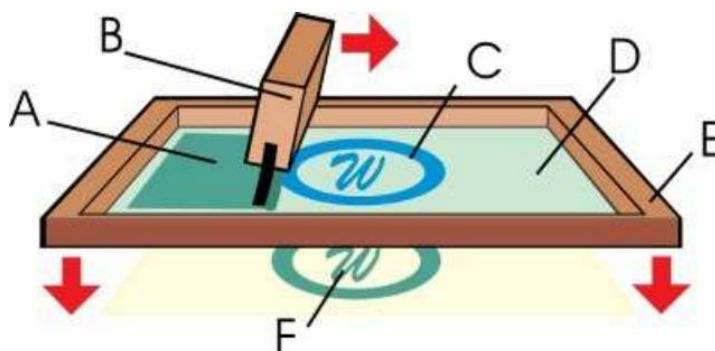


Рисунок 1.6 - Метод трафаретной печати для нанесения электродных слоев (А – Паста, В – Шпатель, С – Трафарет, D – Сетка, E – Рама, F – Наносимый слой (электрод))

В работе [18] анод на Ni-Al основе формировался методом трафаретной печати из NiO (50%)/ $\text{ZrO}_2\text{:Y}_2\text{O}_3$ (50%) пасты (SOFCMAN, Китай). Паста наносилась послойно через сетку SEFAR PET 1500 77/195-48W. При этом каждый слой высушивался при температуре 170°C в течении 15 минут. Затем анод спекался в трубчатой печи в атмосфере аргона при температуре 1250°C в течении 2 часов. После спекания на анод наносился слой $\text{ZrO}_2\text{:Y}_2\text{O}_3$ (YSZ) электролита методом реактивного магнетронного распыления [19]. Анодный слой имел хорошую адгезию к металлической основе. При спекании анода происходило частичное восстановление оксида никеля, поскольку температура спекания превышает его температуру диссоциации. За счет использования более мелких частиц в анодном слое (≤ 1 мкм), он имеет более ровную и гладкую поверхность, чем у крупнопористой металлической основы. Это позволило сформировать газонепроницаемый слой YSZ электролита толщиной около 15 мкм.

Наиболее близким аналогом предлагаемой технологии изготовления анода ТОТЭ является следующая технология [20]. В ней в качестве подложек были использованы пористые аноды ТОТЭ, полученные в результате высокотемпературного спекания ($t=1350\text{-}1450^\circ\text{C}$, 2 часа изотермической выдержки) сырой полимерной ленты, изготовленной методом шликерного литья (производство фирмы ESL ElectroScience). Анодные подложки представляли собой двухслойную конструкцию диаметром 20 мм из основного (толщина 0,5-1 мм, размер пор 1,5-2 мкм) и функционального (толщина 10-15 мкм, размер пор $\sim 0,6$ мкм) слоев. Основной слой играет роль газодиффузионного и имеет размер пор, достаточный для транспортировки топлива к электролиту, а функциональный играет роль электрохимически активного слоя. Перед обработкой анодные подложки восстанавливались в атмосфере увлажненного водорода при 800°C с двухчасовой изотермической выдержкой.

Модификация поверхностного слоя пористых анодных подложек с

целью изменения размера пор и пористости их приповерхностного слоя осуществлялась методом электронно-лучевой обработки (ЭЛО). Для модификации использовался электронный источник, генерирующий низкоэнергетичный сильноточный пучок с энергией электронов $E_e = 10\text{--}12$ кэВ, током пучка ~ 15 кА, диаметром 70–80 мм и длительностью импульса 2–3.5 мкс [21, 22]. В процессе обработки использовались следующие параметры пучка: плотности энергии пучка (E_s) = 0,8, 2,5, 3,5 и 4,5 Дж/см²; количество импульсов (N) в процессе обработки составляло 1, 2, 3, 4, 6 и 9; частота следования импульсов $f = 0,1\text{--}0,2$ Гц; скорость нагрева и охлаждения поверхностного слоя пористых подложек при этом была $\sim 10^{10}$ К/с. Плотность энергии пучка регулировалась изменением амплитуды ускоряющего напряжения и конфигурации магнитного поля. Рабочее давление в камере находилось на уровне $3,8 \cdot 10^{-4}$ Торр. После ЭЛО на образцы наносилось покрытие $\text{ZrO}_2\text{:Y}_2\text{O}_3$ методом реактивного магнетронного распыления $\text{Zr}_{0,86}\text{Y}_{0,14}$ катода в атмосфере Ar/O₂. Рабочее давление в камере при этом равнялось $1 \cdot 10^{-3}$ Торр. Осаждение покрытия происходило на образцы, нагретые до 600°C.

При увеличении плотности энергии пучка $E_s > 2,5$ Дж/см² и количества импульсов ($N > 3$) на поверхности появляется сеть микротрещин, которые располагаются на всю глубину модифицированного слоя, и таких дефектов, как кратеры. Это связано с локальным перегревом подложки в результате высокоскоростного нагрева и охлаждения поверхностного слоя. Проведение процесса ЭЛО при меньшей плотности пучка электронов, а также при предварительном нагреве анодных подложек перед ЭЛО хоть и позволило уменьшить трещинообразование, но полностью не решило проблему.

Искровое плазменное спекание (ИПС)

При анализе литературы по искровому плазменному спеканию было выявлено, что существует крайне мало работ, посвящённых его использованию для изготовления слоев ТОТЭ. Это возможно обусловлено с

тем, что данный метод относительно новый и применяется большинством исследователей только с 2000 г.

В работах [23,24,25] была показана возможность применения ИПС для изготовления керамики, металлов и композиционных материалов. В работе [23] была проведена консолидация двух наноструктурных керамик составов $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{O}_{3-x}$ (LSGM) и его композита $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{CeO}_{3-x}$ (LSGM-Ce). SPS объединение наноструктурного чрезвычайно активного LSGM и LSGM-Ce порошков достигалось за счет быстрой обработки под давлением 90-110 МПа. LSGM нанокристаллический порошок, состоящий из примерно 11 нм кристаллитов был объединен с LSGM-Ce нанокерамикой со средним размером зерна около 14 нм, при низкой температуре SPS (1250°C). Предварительные результаты показали, что наноструктурные образцы 14 нм зерен (LSGM-Ce) могут демонстрировать супермагниторезистивный эффект в отличие от обычных свойств парамагнитных, измеренных на образцах с большим размером зерна.

В работе [24] была проведена попытка определения зависимости проводимости от размеров зерна порошка. Отмечена сложность данной зависимости, а также то, что применение нетрадиционной, далекой от равновесия техники, такой как SPS могло бы воздействовать на неё. В тоже время подтверждалось применение высокого уровня смещения в порошках-прекурсорах, применение высокого давления во время спекания, низкого размера частиц (нано) в агломерационной керамике для высшей проводимости высокой чистоты фазы.

Авторы работы [41] так же произвели изучение микроструктуры, газопроницаемости и электропроводности несущих анодов на основе Ni для ТОТЭ. Было установлено, что увеличение общей пористости образцов с 30-32% до 55% приводит к снижению электропроводности от 9000 См/см до 1000 См/см. Также выявлено, что при увеличении дисперсности электролита,

входящего в состав композиции, при одной дисперсности исходного оксида никеля снижается электропроводность несущих анодов с близкой пористостью. Это наблюдали и другие исследователи [42].

Технически метод ИПС основывается на использовании прямого нагрева порошковых материалов путем пропускания последовательностей импульсов постоянного тока (рис.1.7). В неметаллических материалах возникают высокие плотности электронов и дырок, и в макроскопически большом объеме диэлектрика может генерироваться электронно-дырочная плазма.

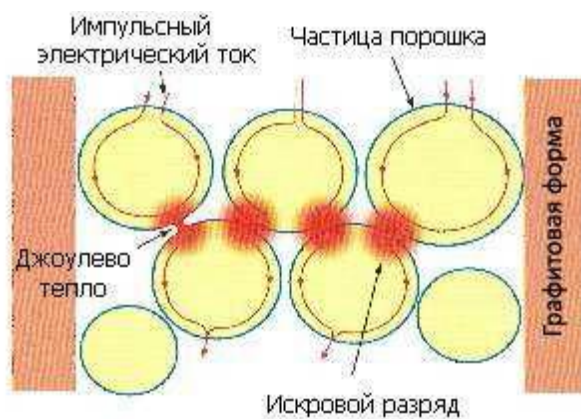


Рисунок 1.7 – Пути протекания импульсного электрического тока через частицы порошка

Импульсный ток создает в образце:

- 1) Искровую плазму;
- 2) Искровое ударное давление;
- 3) Интенсивное локальное выделение джоулевого тепла;
- 4) Эффект ускоренной диффузии в электрическом поле.

В отличие от других способов спекания отсутствует необходимость применения специальных связующих добавок. Спекание происходит при более низкой температуре и давлении по сравнению с другими распространёнными методами, а также при этом затрачивается меньшее время.

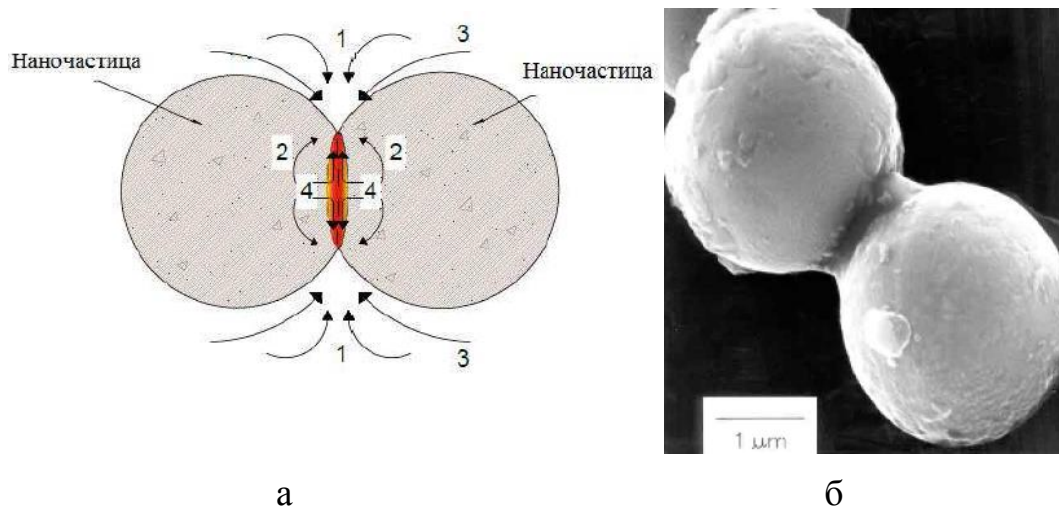


Рисунок 1.8 – Начальная стадия спекания частиц порошка: а – Перенос материала в модели спекания: 1 – Испарение и затвердевание; 2 – Объемная диффузия; 3 – Поверхностная диффузия; 4 – Диффузия по границам зерен; б – Формирование шейки в области контакта частиц

Свойства неметаллических материалов при средних и высоких плотностях ионизации плазмы, создаваемой электрическим разрядом, существенно изменяются, что отмечено авторами [26]. В работе [27] были сравнены результаты по получению керамики $\text{Ba}(\text{Zr}_x \text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ ($x=0$ and $0,2$) (BZT) методом SPS и конвенционным (обычным) синтезом. При обычном синтезе плотность, величина зерна и диэлектрическая проницаемость керамики увеличивалась с температурой синтеза. В керамике, полученной SPS-спеканием, удалось подавить рост зерен. Были получены зерна со средним размером менее чем 1 мкм. В BZT керамике, которую получили методом SPS и последующим отжигом при 1000°C 12 часов обнаружилась слабая температурная зависимость диэлектрической постоянной. Она достигала высоких номинальных значений, приближающихся к значениям при комнатной температуре. В этой керамике гистерезис в электрическом поле был меньше, чем в керамике, полученной обычным методом.

Возможность получения образцов, с относительной плотностью выше 96% с размером зерна около 80 нм показана авторами работ [36, 37]. Также

показано что при размере зерна около 160 нм можно добиться полного уплотнения.

Авторы работы [28] сравнили порошки Si_3N_4 , приготовленные методом SPS и горячим прессованием. Из результатов данных исследований следует, что механические свойства нитрида кремния, синтезированного SPS-методом при 1500°C , лучше, чем в таких образцах, синтезированных обычным спеканием при 1700°C : микротвёрдость достигала значений 15,72 ГПа, сопротивление изгибу 716,46 МПа и трещиностойкость $7,03\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Данные значения были получены вследствие того, что синтезированной SPS-методом зёрна керамики мельче и имеют выше гомогенность.

Применительно к твердооксидным топливным элементам метод ИПС применялся в основном при формировании плотных (газонепроницаемых) слоев керамического электролита YSZ. Авторы работы [28] с помощью ИПС спекли исходной порошок толщиной около 0,1 мкм в течении 10 мин., уплотнив его до 99% теоретической плотности рентгеновского излучения. Затем была измерена прочность на изгибе в трех точках при комнатной температуре, которая составила около 400 МПа, что выше измеренного значения для керамики, полученной обычным способом (250 МПа). Также была измерена электропроводность, которая составила 0,19 См/см при 1000°C на воздухе, что сопоставимо с электропроводимостью для хорошо спеченной керамики (около 0,1 См/см).

Авторам работ [29,30] удалось даже улучшить ионную проводимость исследуемых образцов. Ими был взят электролит YSZ, полученный плазменным распылением, и имеющий характерные для этого метода многочисленные дефекты между гранулами. С помощью дальнейшей последовательной обработкой искровым плазменным спеканием при температурах 1200, 1400 и 1500°C , а также выдержкой в 3 мин. за цикл была увеличена плотность зерен в структуре электролита. С помощью измерения пористостью с помощью MIP технологии [31], было отмечено значительное

снижение пор при 1500 °С. Затем посредством АС импедансной спектроскопии [32] была оценена ионная проводимость, которая и показала увеличения данной характеристики электролита.

Что же касается изготовления самого анода ТОТЭ методом ИПС, то этому вопросу посвящено всего несколько работ. В работе [33] методом ИПС сформирован Ni-YSZ анод. Время выдержки при температуре 1100°С равнялось 1 мин при давлении 100 МПа. Полученный анод обладал высокой проводимостью и плотностью 96%. Таким образом, была показана возможность формирования Ni-YSZ анода, но работ по оптимизации его структуры, увеличению пористости не проводилось.

В работе [34] методом высокочастотного индукционного спекания (high-frequency induction heated sintering – HFHS), схожим с ИПС, сформирован NiO-YSZ анод при температурах 1100-1200°С и давлениях 40, 60, 80 МПа (время выдержки 3 мин). Пористость анодов составила 24-28% при содержании NiO 60 об.%. Полученные образцы обладали большей прочностью и электропроводностью по сравнению с образцами, полученными методом высокотемпературного спекания.

Авторы работы [35] методом ИПС сформировали NiO-YSZ анод на YSZ подложках, так же сформированных методом ИПС. Анод спекался в вакууме при температурах 950-1100°С с выдержкой 1-10 мин при давлении 15 МПа. Для регулирования пористости анода в NiO-YSZ порошок добавлялось 30-50 масс. % порообразователя. Без добавления порообразователя пористость образцов составляла всего 11%. Электрокаталитические свойства анода в составе топливного элемента ни в одной из перечисленных работ не изучались.

Можно выделить следующие преимущества метода ИПС:

- равномерное распределение тепла по образцу;
- полная плотность и контролируемая пористость;
- предварительная обработка давлением, в результате чего связующие материалы не требуются;

- равномерное спекание однородных и разнородных материалов;
- короткое время рабочего цикла;
- выпаривание имеющихся примесей;
- изготовление детали сразу в окончательной форме и получение профиля, близкого к заданному;
- минимальный рост зерна в процессе спекания.

Выводы по обзору:

1. В настоящее время существует большое количество методов изготовления анодов ТОТЭ, обладающих как достоинствами, так и существенными недостатками;
2. В качестве анода ТОТЭ большинством исследователей используется «керметный» электрод на основе Ni (или NiO) и YSZ;
3. Наиболее близкой к предлагаемой технологии является трудоемкой, а также занимает значительное количество времени. При несоблюдении режима нагрева в аноде могут возникнуть трещины, которые заметно ухудшают рабочие характеристики анода;
4. Практически показано, что в результате применения метода ИПС образцы имеют лучшие механические характеристики, зерна структуры керамики мельче и имеют выше гомогенность. Также показана возможность получения образцов с высокой плотностью, лучшей ионной проводимостью;
5. В данный момент времени отсутствуют работы по оптимизации структуры анода, получаемого методом ИПС, изучению электрокаталитических свойств, увеличению пористости образцов, полученных методом ИПС;
6. В виду указанных преимуществ метода ИПС для изготовления анода ТОТЭ данный метод с большой вероятностью вызовет интерес у производителей ТОТЭ.

На основании анализа литературы можно говорить о целесообразности разработки нового более совершенного анода ТОТЭ,

получаемого по технологии искрового плазменного спекания из композитного материала $\text{NiO} - \text{ZrO}_2: \text{Y}_2\text{O}_3$ (NiO-YSZ) для топливных водородных элементов.

Таким образом, из анализа литературы в данной работе были определены следующие направления исследований:

1. Установление влияния параметров искрового плазменного спекания, таких как, скорости нагрева и охлаждения, максимальной температуры, времени выдержки и механической нагрузки на фазовый состав, микроструктуру, характеристики пористости и газопроницаемость NiO-YSZ керамики – анода ТОТЭ;

2. Определение оптимального режима ИПС и состава исходного порошка для формирования NiO-YSZ керамики с заданными характеристиками;

3. Оценка возможности искрового плазменного спекания S_3N_4 – керамики, используемой в качестве аккумулятора водорода;

4. Влияние искрового плазменного спекания на фазовый состав LSCF-керамики – материала для катода ТОТЭ.

Предметом исследования является технология искрового плазменного спекания и перспективы ее использования в водородной энергетике при изготовлении ТОТЭ.

Объектом исследования является твердооксидный топливный элемент.

2 Методика проведения исследований

2.1 Гомогенизация и диспергирование порошкового материала

Для подготовки исходного кристаллического материала его подвергают механоактивационной обработке в планетарной шаровой мельнице SPEX SamplePrep 8000M Mixer/Mill (рис. 2.1). Материал помещается в барабан из циркониевой керамики с мелящими шарами. В результате вращения барабана вокруг центральной и собственной оси (рис. 2.2) шары приобретают центростремительное ускорение и происходит интенсивное измельчение исходного порошка. Таким образом удастся получить гомогенный порошок с достаточно узким распределением частиц по размеру. Кроме этого механоактивация позволяет эффективно диспергировать исходные порошки и получать размеры частиц в несколько десятков нм.



а



б

Рисунок 2.1 –SPEX SamplePrep 8000M Mixer/Mill:

а – Внешний вид; б – Барабан с мелящими шарами

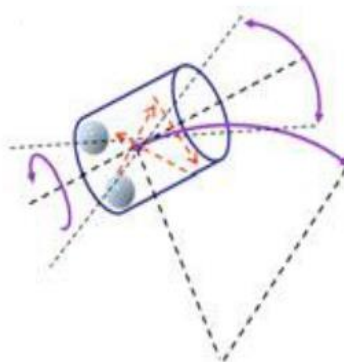


Рисунок 2.2 – Схема рабочей зоны в шаровой мельнице

2.2 Установка искрового плазменного спекания

Искровое плазменное спекание подготовленных нанопорошков проводится на установке SPS 10–4 фирмы Thermal Technology (США). Основные элементы установки представлены на рис. 2.3, а на рис. 2.4 представлена её принципиальная схема.



Рисунок 2.3 – Установка искрового плазменного спекания SPS 10-4:

1 – Камера; 2 – Источник питания; 3 – Вакуумная система; 4 – Система водоснабжения; 5 – Контрольно-измерительные приборы и автоматика; 6 – Система гидравлического пресса с усилием 10 тонн

SPS состоит по существу из совместного действия высокой температуры, высокого осевого давления, низковольтного напряжения и большого тока в присутствии электромагнитного поля (плазмы) [74].

Спекаемый порошок помещается в пресс-форму (рис. 2.5). Сверху и снизу располагают пуансоны. Внутри пресс-формы устанавливают прокладки 8 и трубку из графитовой фольги 7, между электродами и графитовыми вставками укладывают графитовые прокладки 9. Этим обеспечивается надежный контакт между стальными электродами 1 и 6 и графитовыми вставками 9.

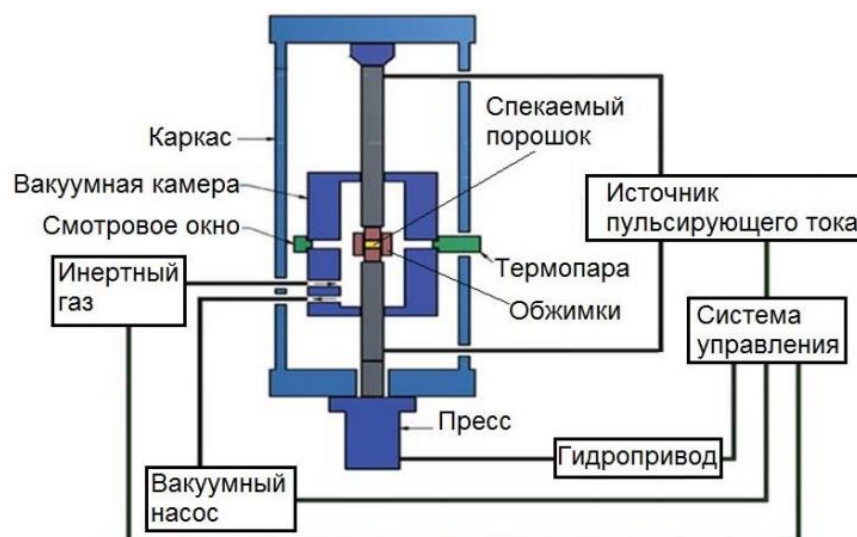


Рисунок 2.4 - Принципиальная схема установки искрового плазменного спекания [75]

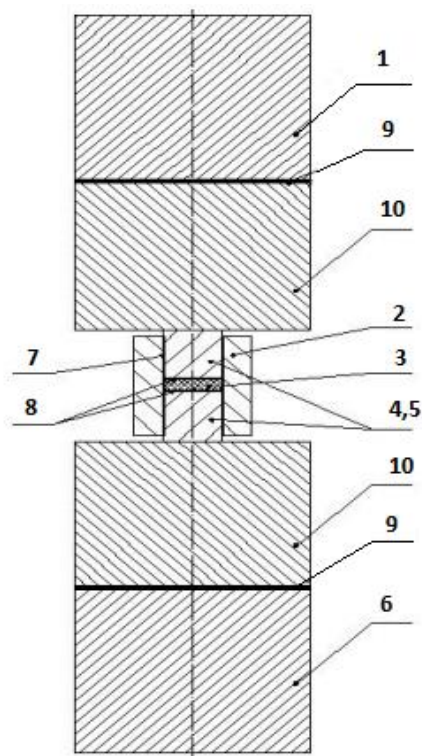


Рисунок 2.5 – Рабочая зона установки:

1 – Верхний охлаждаемый электрод; 2 – Матрица пресс-формы; 3 – Образец; 4,5 – Верхний и нижний графитовые пуансоны; 6 – Нижний охлаждаемый электрод; 7 – Трубка из графитовой фольги; 8,9 – Прокладки из графитовой фольги; 10 – Графитовые вставки

На сам процесс искрового плазменного спекания, как и на свойства получаемых материалов влияют следующие факторы:

- величина механического давления;
- величина прикладываемого напряжения;
- длительность импульса тока;
- форма и размеры частиц порошка;
- свойства спекаемого материала.

Верхний и нижний охлаждаемые электроды выполнены из стали NIST; пуансоны, матрица пресс-формы и графитовые вставки – из графита МПГ-8.

Пуансоны выполняют две функции [76]:

- 1) Через них происходит прессовка спекаемого порошка;
- 2) Через них пропускается импульсный электрический ток (до 60 кА).

За счет импульсов электрического тока между зернами возникает искровая плазма, вследствие чего в зоне контакта растет температура (максимально возможная температура, достигаемая установкой - 2200 °С). Происходит джоулев нагрев порошкового материала, который переходит из твердого состояния частично в плазменное, частично - в жидкое. В результате происходит пластическая деформация спекаемого порошка с последующей консолидацией в единый нанокompозитный материал.

Весь процесс искрового плазменного спекания регистрируется с помощью программного обеспечения SpecView, которое установлено на персональном компьютере, связанном с программируемым удаленным терминалом.

Сбор данных, предусмотренный программным обеспечением SpecView:

- Усилие;
- Положение (ползуна) по оси Z;
- Температура;
- Вакуум (давление в камере);

- Напряжение;
- Сила тока.

После остывания в рабочей камере полученного продукта, он вынимается из пресс-формы и подвергается шлифовке с помощью алмазных кругов на установке Metkon Forcipol 1V, оборудованной автоматической головкой Metkon Forcimat.

2.3 Методики исследований полученных образцов

Полученный после предварительной обработки (шлифовки) материал анализировался при помощи современных аналитических методик.

Методика изучения структуры материалов

Структура полученных образцов анода исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) [77]. Для этого использовался растровый электронный микроскоп Hitachi TM-3000.

Методика изучения кристаллической структуры и фазового состава материалов

Кристаллическая структура и фазовый состав полученных образцов исследуется при помощи метода рентгеновской дифрактометрии (XRD). Для этого используется рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 7000 (CuK α -излучение, $\lambda=1,54060$ Å), оснащенный различными приставками и, в частности, монохроматором для уменьшения шума сигнала. Анализ и расшифровка рентгеновских дифрактограмм получаемых продуктов проводится с использованием современного программного обеспечения для полнопрофильного анализа «PowderCell 2.4» и баз структурных данных PDF2 и PDF4+.

Методика изучения плотности материалов

Плотность полученных образцов исследовалась методом гидростатического взвешивания (рис.2.6). Этот метод основан на законе

Архимеда. Он заключается в последовательном взвешивании исследуемых образцов на воздухе и жидкости. Во втором случае образцы предварительно перед взвешиванием в жидкости пропитываются расплавленным парафином. Это делается с целью закрытия открытых пор. Плотность подготовленных таким образом образцов называется кажущейся ρ_k .

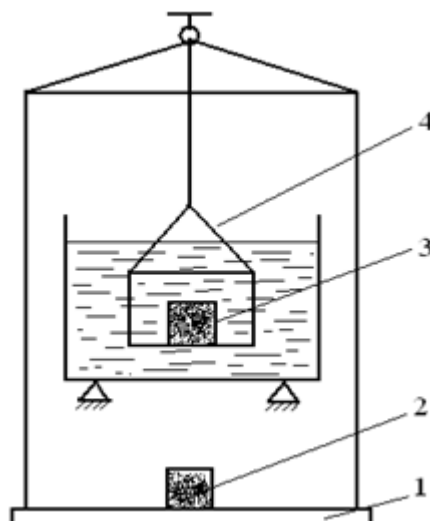


Рисунок 2.6 – Схема приспособления для гидростатического взвешивания: 1 – Чашка весов; 2 – Образец, взвешиваемый на воздухе; 3 – Образец, взвешиваемый в жидкости; 4 – Корзинка

С учетом этого, формулу для определения плотности тела можно записать в виде

$$\rho = \frac{M}{M-m} \cdot \rho_{ж}, \quad (2.1)$$

где M – масса тела на воздухе; m – масса тела в жидкости.

Методика изучения газопроницаемости материалов

Газопроницаемость исследовалась с помощью устройства, блок-схема которого изображена на рис. 2.7.

Суть метода заключается в помещении исследуемого образца между двумя камерами, в одной из которых создается вакуум или избыточное давление, а в другой измеряется скорость увеличения давления или расход прошедшего через образец газа.

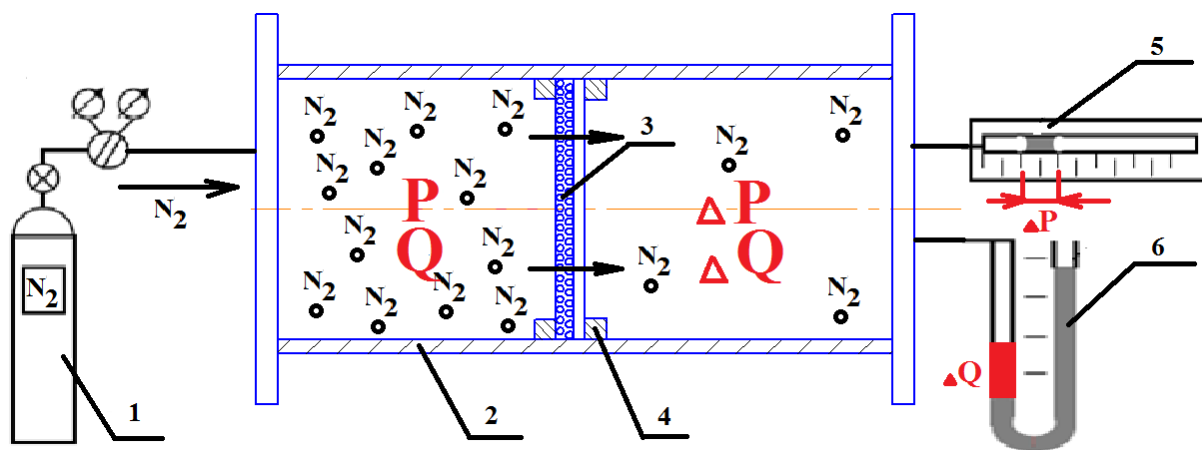


Рисунок 2.7 – Блок-схема устройства для измерения газопроницаемости:

1 – Баллон с газом; 2 – Корпус камеры; 3 – Пористый образец; 4 – Резиновые уплотнения;
5 – Пузырьковый расходомер; 6 – U-образный ртутный манометр для измерения избыточного давления в напорной полости

Зная скорость потока газа через образец, можно по закону Дарси определить его газопроницаемость K , $\text{см}^4/\text{г} \cdot \text{с}$:

$$K = \frac{d \times Q}{\Delta P \times A}, \quad (2.2)$$

где d – толщина образца, см ; Q – скорость потока газа, $\text{см}^3/\text{с}$; ΔP – разность давления, $\text{г}/\text{см}^2$; A – площадь поверхности образца, см^2 .

В нашем случае в одной из камер создавалось избыточное давление 0,5 атм., а вторая камера была подсоединена к расходомеру газа. В качестве рабочего газа использовался азот, измерения газопроницаемости проводились при комнатной температуре, расход прошедшего через образец газа измерялся посредством пузырькового расходомера.

Методика оценки содержания водорода в материалах

В данной работе одним из ключевых вопросов было проведение исследований нитрид кремниевой керамики на предмет аккумуляирования газообразного водорода в объеме. Исследования проводились с помощью автоматизированного комплекса GRC [112]. Для этого исследуемый образец после взвешивания помещался в камеру низкого давления (рис. 2.7б), которая затем присоединялась к высоковакуумной автоматизированной печи (рис. 2.7а). Камера низкого давления после этого помещалась в камеру системы

охлаждения (рис. 2.7в). После сборки установки камера низкого давления заполнялась водородом от высоковакуумной автоматизированной печи, в которую водород подавался помощью форвакуумного мембранного и турбомолекулярного насосов из баллона. Для очистки водорода используются специальные фильтры.



а



б



в

Рисунок 2.7 – Автоматизированный комплекс GRC: а – Высоковакуумная автоматизированная печь; б – Камера низкого давления; в – Камера системы охлаждения

С помощью программного обеспечения на базе LabVIEW устанавливалось необходимое давление, температура и время процесса, а

также в нее же записывались как сам процесс насыщения, так и количество поглощенного образцом водорода. После завершения процесса насыщения водород откачивался из камеры и после охлаждения образец вынимался.

Насыщения водородом происходили при следующих параметрах:

Время процесса насыщения – $t=30$ мин.

Давление – $1,8 \div 2$ атм.

Температура – $T=20 \div 27^{\circ}\text{C}$

Далее образцы, насыщенные водородом, помещались в анализатор водорода RHEN602 (рис. 2.8) [113]. Данное оборудование предназначено для измерения водорода в металлах и сплавах, используя принцип плавления в инертной среде. Для этого предварительно взвешенная проба помещается в шлюз, и после дегазации графитового тигля сбрасывается в него. Проба плавится в восстановительной среде графита тигля в потоке инертного газа. Водород, присутствующий в пробе, выделяется в виде молекулярного водорода, измеряется в ячейке теплопроводности путем регистрации изменения теплопроводности инертного газа-носителя в термокондуктометрической ячейке. С помощью измерительной части термокондуктометрической ячейки измеряется содержание водорода в газе образца. Затем все полученные параметры поступают через аналогово-цифровой преобразователь на компьютер, где отображаются в специальной программе.



Рисунок 2.8 – Анализатор водорода RHEN602

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В рамках данной работы рассматриваются научно-технические основы разработки метода получения несущего анода $\text{NiO} - \text{ZrO}_2: \text{Y}_2\text{O}_3$ (NiO-YSZ) для топливных водородных элементов по технологии искрового плазменного спекания (ИПС).

Керамика состава $\text{NiO} - \text{ZrO}_2: \text{Y}_2\text{O}_3$ (NiO-YSZ) является материалом, сочетающем в себе целый спектр разнообразных физических, химических и электрофизических свойств. В последние десять-пятнадцать лет большие исследовательские усилия по всему миру направлены на решение задачи по совершенствованию производства наноструктур электродно-электролитной сборки и разработку наиболее рациональных конструкций ТОТЭ. Разработанный метод получения анода состава $\text{NiO} - \text{ZrO}_2: \text{Y}_2\text{O}_3$ (NiO-YSZ) методом ИПС является перспективным решением данной задачи. Полученные результаты найдут практическое применение не только в производстве топливных элементов, но и химической промышленности, при изготовлении фильтров, керамических горелок и т.п.

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

4.1 Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ

Для реализации производства анода состава $\text{NiO} - \text{ZrO}_2: \text{Y}_2\text{O}_3$ (NiO-YSZ) методом ИПС необходимо реализовать спектр задач, связанных с научными, техническими и экономическими проблемами. На рис. 4.1 указаны основные цели, решаемые в рамках данной работы. 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 потребуются привлечение специалистов в области экономики и предпринимательства.



Рисунок 4.1 – Дерево целей

Задачи проекта решаются на базе оборудования, находящегося в 8 корпусе ТПУ. Главным объектом развития и оптимизации технологии является экспериментальная установка по искровому плазменному спеканию SPS 10-4 фирмы Thermal Technology (США). Данная система позволяет обрабатывать электропроводные, неэлектропроводные и композитные материалы до любой степени плотности, включая полную плотность, с высокой однородностью и особо прочными связями между частицами. В настоящий момент для настоящего проекта завершена стадия НИР, получены опытные образцы, необходимо начать этап ОКР.

Конкурентные преимущества производства анода состава NiO – ZrO₂: Y₂O₃ (NiO-YSZ) методом ИПС состоят в следующем:

- Равномерное распределение тепла по образцу;
- Полная плотность и контролируемая пористость;
- Не требуются предварительная обработка давлением и связующие материалы;
- Равномерное спекание однородных и разнородных материалов;

- Удобство использования;
- Короткое время рабочего цикла;
- Выпаривание имеющихся примесей;
- Изготовление детали сразу в окончательной форме и получение профиля, близкого к заданному;
- Минимальный рост зерна;
- Минимальное влияние на микроструктуру;
- Низкие производственные затраты.

Рассмотрим факторы микросреды, к которым относятся анализ поставщиков, потенциальных покупателей, конкурентов и контактной аудитории. Материалы необходимые для реализации производства поставляются следующими компаниями:

- 1) ООО ПКФ «Графит Гарант Сервис», г. Челябинск – поставка графита для изготовления пресс-форм;
- 2) ООО «ГВС», г. Томск – поставка газообразного или жидкого азота, используемого в качестве газовой среды в рабочей камере;
- 3) Университет Теджон (Корея) – поставка кристаллического материала $\text{NiO} - \text{ZrO}_2: \text{Y}_2\text{O}_3$.

Несмотря на то, что на сегодняшний день как на российском, так и на международном рынке есть как технологии по изготовлению анодов, так и само производство анодов в составе ТОТЭ, но существуют потребности в новых, более совершенных методах получения анодов состава $\text{NiO} - \text{ZrO}_2: \text{Y}_2\text{O}_3$ ($\text{NiO} - \text{YSZ}$). Спрос же на сами ТОТЭ год от года увеличивается. Поэтому можно быть уверенным, что следующие фирмы могут быть заинтересованы в приобретении технологии или самого продукта:

- Cummins-SOFCo;
- Delphi-Battelle;
- General Electric;
- Siemens;
- Acumentrics;
- FuelCell Energy;
- Horizon Fuel Cell Technologies;
- BloomEnergy;
- УрО РАН и ООО «Центр промышленных нанотехнологий»

(Екатеринбург).

Организации, представленные выше являются ведущими производителями ТОТЭ.

На сегодняшний день к конкурирующим фирмам можно отнести:

- 1) Cummins-SOFCo – использование технологии шликерного литья;
- 2) Horizon Fuel Cell Technologies – использование технологии горячего прессования;
- 3) Siemens – использование технологии спекания;
- 4) Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской Академии Наук – использование технологии трафаретной печати.

Отметим факторы макросреды, влияющие на реализацию проекта:

- 1) Политические. Отсутствие государственных программ по поддержке предприятий в области исследования новых методов изготовления анодов ТОТЭ;
- 2) Социально-культурные. Отсутствие интереса к повышению и улучшению качества анодов ТОТЭ;

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. Выше уже неоднократно было отмечено, что, область применения ТОТЭ обширна, а также то, что у существующих технологий имеются значительные недостатки. Это говорит о том, что рынок данного продукта широк, а также о потребности новых конкурентоспособных методов изготовления ТОТЭ.

Сильными сторонами проекта является улучшенная технология изготовления анода состава $\text{NiO} - \text{ZrO}_2 : \text{Y}_2\text{O}_3$ (NiO-YSZ) искровым плазменным спеканием. Это технология позволяет получать однородный продукт с высокой плотностью, лучшей ионной проводимостью. Существующие технологии имеют более длительный технологический процесс, а также у них существует большая вероятность наличия трещин и увеличение размера зерен структуры.

Слабыми сторонами проекта является небольшая производительность установки, ограниченная параметрами изготавливаемых элементов и рабочей зоны установки. На данном этапе развития проекта отсутствует автоматизация работы системы.

На рис. 4.2 приведен график потребления электроэнергии в России с прогнозом до 2021 г. [78]. По данному графику можно судить о устойчивом росте электропотреблении, отсюда и возникает вопрос о необходимости дополнительных источников электрической энергии. Таким источником может являться ТОТЭ, который к тому что имеет высокий КПД

и превосходные экологические характеристики (рис. 4.3), еще и значительно более устойчив к загрязнениям топлива и универсален по отношению к типам используемых горючих газов по сравнению с другими типами топливных элементов. Также дополнительным стимулом к внедрению данной технологии является закон 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. Единственным ограничивающим фактором на данный момент является относительно высокая стоимость. После решения этой важнейшей задачи - снижения стоимости - этот вид энергетического оборудования будет востребован на рынке автономных систем тепло - и электроснабжения. В частности, решению данной проблемы и посвящена эта работа.

Важным фактором, позволяющим оценить потенциал проекта, является экспертное оценивание - процедура получения оценки проблемы на основе мнения экспертов. В данном случае проводится сравнение с существующими методами получения анодов ТОТЭ с составом $\text{NiO} - \text{ZrO}_2 : \text{Y}_2\text{O}_3$. Результаты экспертного оценивания представлены в табл. 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 метода искрового плазменного спекания получена максимальная оценка, что свидетельствует о его наибольшей эффективности.

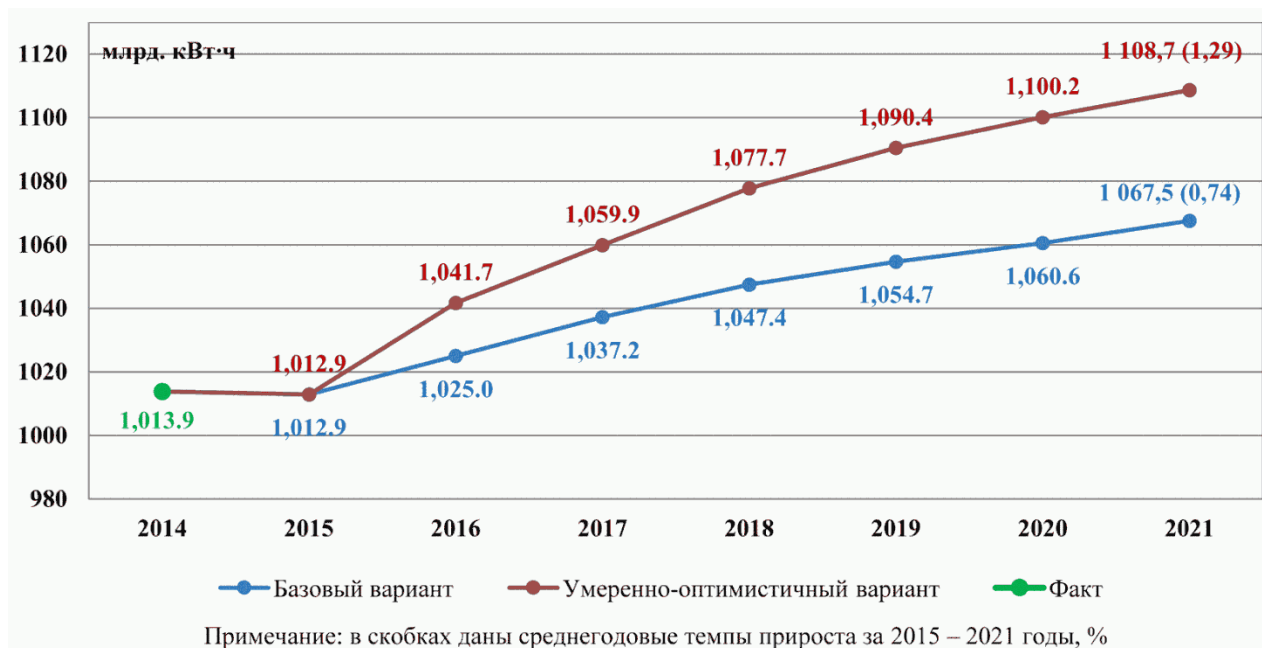


Рисунок 4.2 – Прогноз спроса на электрическую энергию по ЕЭС России до 2021 года



Рисунок 4.3 – Сравнение преобразования энергии топлива в электрическую энергию с применением ТОТЭ

Значимым инструментом маркетингового исследования является SWOT-анализ – это акроним слов Strengths (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 табл. 4.1. В процессе анализа определяется следующее.

Таблица 4.1 – SWOT-анализ

	Сильные стороны	Слабые стороны
	Возможности "О" — Opportunities	Угрозы "Т" — Threats
Внешняя среда	1. Уникальность получения продукта 2. Новизна метода 3. Рост рынка электротехнической продукции 4. Государственная поддержка научно-технических проектов в области энергосберегающих технологий	1. Отсутствие патентов на международном уровне 2. Отсутствие просвещенности компаний-покупателей о существующем методе 3. Недостаточное заинтересованность потребителей к проблеме энергосбережения
	Преимущества "S" — Strength	Недостатки "W" — Weakness
Внутренняя среда	1. Большой опыт 2. Высококвалифицированный персонал 3. Высокое качество продукции 4. Простота метода 5. Быстродействие 6. Энергоэффективность, экологическая безопасность 7. Инновационные технологии 8. Низкая себестоимость 9. Сплоченный коллектив	1. Мало оборотных средств 2. Отсутствие в составе проектной команды маркетологов и экономистов 3. Отсутствие стратегии развития 4. Незвестная торговая марка 5. Отсутствие автоматизированной производственной линии 6. Малые объемы получаемой продукции

1. Конкурентные активы. Использование сильных сторон для освоения рыночных возможностей (S-O). Метод изготовления анода ТОТЭ состава $\text{NiO} - \text{ZrO}_2 : \text{Y}_2\text{O}_3$ характеризуется такими важными конкурентными преимуществами, как простота метода, быстрое действие, энергоэффективность, экологическая безопасность, низкая себестоимость, высокое качество, 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, что позволит нивелировать угрозы неразвитости рынка.

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 изготовления анода ТОТЭ состава $\text{NiO} - \text{ZrO}_2 : \text{Y}_2\text{O}_3$.

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 за счет создания автоматизированной установки и привлечение в команду высококвалифицированных экономистов и маркетологов.

4.2 Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет 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 (табл. 4.2). При помощи этой таблицы построим сетевой график, гistogramмы бюджета и трудовых ресурсов по времени (рис. Б.1-Б.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 табл. Б.2.

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 в табл. Б.3.

Таблица 4.2 – Перечень работ

	Наименование работ	Срок, дн.	Исполнители, чел.	Стоимость, тыс.руб./дн.	Σ , тыс.руб.
A	Исследование рынка	7	3	1,5	10,5
B	Модернизация технологической установки	30	10		300
C	Составление бизнес-плана	4	2	2	8
D	Работа с инвесторами	14	1	2	28
E	Регистрация предприятия	9	2		15
F	Поиск дополнительного персонала	7	1	1	7
G	Поиск поставщиков оборудования	10	2	2	20
H	Расширение производственного помещения	14	2		6000
I	Рекламная кампания	120	2		2300
J	Наем дополнительного персонала	3	1	0,5	1,5
K	Закупка оборудования	45	1		35000
L	Отделка помещения	15	15		400
M	Монтаж оборудования	30	20		900
N	Акт сдачи – приема	3	1		2
O	Отладка системы	12	4		48
P	Исследование и анализ продукта	20	5		150
Q	Автоматизация системы	15	10		150
R	Выход на производственные мощности	30	15		450
S	Поиск покупателей	30	2	1	30
T	Заключение договоров	7	2	1	7
Σ					45927

Таким образом, потребность в инвестициях составляет 45927000 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 (табл. Б.4). Для 2017 года приведен пример расчета.

Амортизация основных фондов – сумма амортизационных отчислений на полное восстановление основных производственных фондов, вычисленная исходя из их балансовой стоимости и утвержденных норм амортизации.

Оборудование, которое амортизируется, начинается от 20 тыс. рублей. Амортизационные отчисления рассчитываются по формуле

$$A_{\text{год}} = K \cdot \frac{H_A}{100\%}; H_A = \frac{1}{T_G} \cdot 100\%$$

где К – капитальные вложения в электрооборудование; $T_G = 10$ – гарантийный срок изделия [96]; H_A – проценты отчислений на амортизацию.

$$H_A = \frac{1}{10} \cdot 100\% = 10\%$$

$$A_{\text{год}} = 35000 \cdot \frac{10}{100\%} = 3500 \text{ тыс.руб.}$$

Расчет заработной платы – заработная плата рассчитывается в соответствии с занятостью исполнителей, с учетом районного и тарифного коэффициентов исполнителей.

Таблица 4.3 – Данные для расчета заработной платы участников проекта

№ п/п	Наименование категории работника	Группа	Количество работников	Форма оплаты труда	Ставка в месяц без РК
1.	Доцент (ктн)	3	1	оклад	23264,86
2.	Ассистент	1	2		14584,32*2
3.	Итого		3		52433,5

Рассчитаем основную заработную плату

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} \cdot 12,$$

где $З_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $З_{\text{тс}}$); $k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от $З_{\text{тс}}$); $k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

$$З_{\text{осн}} = 52433,5 \cdot (1 + 0,3 + 0,15) \cdot 1,3 \cdot 12 = 1186045,8 \text{ руб.}$$

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

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

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (принимается равным 0,07).

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} = 0,07 \cdot 1186045,8 = 83023,21 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{зп}} = З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}} = 1186045,8 + 83023,20 = 1269069 \text{ руб.}$$

Прочие затраты – затраты, к которым вознаграждения за изобретение и рационализаторские предложения, за подготовку кадров. Эти затраты составляют 2% от всех издержек и вычисляются по формуле:

$$И_{\text{прочие}} = 0,02 \cdot (И_{\text{мат}} + 3П_{\text{осн}} + А_{\text{год}} + И_{\text{соц.отч.}})$$

где $И_{\text{соц.отч.}}$ – единый социальный налог при $k_{\text{ЕСН}} = 31,1\%$; $И_{\text{мат}}$ – расходы на материалы и реагенты.

Рассчитываем отчисления на социальные нужды ($I_{\text{соц.отч.}}$):

$$I_{\text{соц.отч.}} = K_{\text{ЕСН}} \cdot Z_{\text{зп}} = 0,311 \cdot 1269069 = 394680,45 \text{ руб.}$$

$$I_{\text{мат}} = I_{\text{эл.эн.}} + I_{\text{графит}} + I_{\text{порошки}} + I_{\text{газ}}$$

где $I_{\text{эл.эн.}}$ – стоимость потребляемой электроэнергии, руб.; $I_{\text{графит}}$ – стоимость графита МПГ-8, руб.; $I_{\text{порошки}}$ – стоимость нанокompозитных порошков, руб.; $I_{\text{газ}}$ – затраты на покупку газа аргона в баллонах, руб.

$$I_{\text{эл.эн.}} = C_{\text{эл.энергии}} \cdot W_{\text{эл.энергии}} \cdot t_{\text{день}} \cdot t_{\text{месяц}} \cdot 12 = 2,93 \cdot 47424 \cdot 8 \cdot 24 = 26678845,44 \text{ руб.}$$

где $C_{\text{эл.энергии}}$ – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч; $W_{\text{эл.энергии}}$ – количество потребляемой электроэнергии, кВт·ч; $t_{\text{день}}$ – количество рабочих часов в день, ч. $t_{\text{месяц}}$ – количество рабочих часов в месяце, дни.

$$I_{\text{графит}} = C_{\text{графит}} \cdot m_{\text{графит}} = 523 \cdot 168 = 87864 \text{ руб./кг}$$

где $C_{\text{графит}} = 523 \text{ руб./кг}$ – стоимость графита; $m_{\text{графит}}$ – масса графита МПГ.

$$I_{\text{порошки}} = C_{\text{порошки}} \cdot m_{\text{порошки}} = 234 \cdot 36 = 8432937 \text{ руб.}$$

где $C_{\text{порошки}}$ – стоимость нанокompозитного порошка, руб./кг; $m_{\text{порошки}}$ – масса нанокompозитного порошка, кг.

$$I_{\text{газ}} = C_{\text{газ}} \cdot n_{\text{б}} = 1829 \cdot 96 = 175584 \text{ руб.}$$

где $C_{\text{газ}}$ – стоимость аргона за баллон объемом 40л., руб.; $n_{\text{б}}$ – количество баллонов с аргоном, шт.

$$I_{\text{мат}} = 26678845,44 + 87864 + 8432937 + 175584 = 35375230,44 \text{ руб.}$$

$$I_{\text{прочие}} = 0,02 \cdot (35375230,44 + 1186045,8 + 3500000 + 394680,45) = 809119,13 \text{ руб.}$$

Накладные расходы. В данной статье заключены затраты на хозяйственное обслуживание, на содержание производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений, печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной заработной платы работников.

$$I_{\text{накл.}} = Z_{\text{осн}} = 1186045,8 \text{ руб.}$$

Себестоимость

$$\begin{aligned}\Sigma И_{\text{работы}} &= И_{\text{мат}} + А_{\text{год}} + З_{\text{зп}} + И_{\text{соц.отч}} + И_{\text{прочие}} + И_{\text{накл}} = \\ &= 35375230,44 + 3500000 + 1269069 + 394680,46 + 809119,13 + 1186045,8 = \\ &= 42534144,77 \text{ руб.}\end{aligned}$$

Рассчитываем плановые накопления (прибыль - ПР). Себестоимость проекта включает в себя 30% прибыли, таким образом:

$$ПР = 0,3 \cdot \Sigma И_{\text{работы}} = 0,3 \times 42534144,77 = 12760243,43 \text{ руб.}$$

Налоги (Н) рассчитываются по упрощенной системе налогообложения (20% от прибыли).

$$Н = 0,20 \cdot 12760243,43 = 2552048,69 \text{ руб.}$$

В итоге чистая прибыль составит за год

$$ЧПР = ПР - Н = 12760243,43 - 2552048,69 = 10208194,74 \text{ руб.}$$

Рентабельность продаж

$$РП_{\text{пр}} = \frac{\text{ЧПР}}{\text{Выручка}} = \frac{\text{ЧПР}}{ПР + \Sigma И_{\text{работы}}} = \frac{10208194,74}{12760243,43 + 42534144,77} = \frac{10208194,74}{55294388,20} = 0,18$$

Рентабельность производства

$$РП = \frac{\text{ЧПР}}{\Sigma И_{\text{работы}}} = \frac{10208194,74}{42534144,77} = 0,24$$

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.

4.3 Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности

Разработаем инвестиционный план проекта

К числу основных финансовых показателей относят:

1. ЧДД (NPV) – чистый дисконтированный доход

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{ЧД_i}{(1+r)^i} - \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{(1+r)^i} = \frac{10208,19}{(1+0,1)^1} + \frac{11074,18}{(1+0,1)^2} + \frac{11507,17}{(1+0,1)^3} + \frac{11950,48}{(1+0,1)^4} + \frac{12373,16}{(1+0,1)^5} + \frac{12806,15}{(1+0,1)^6} - \frac{45927}{(1+0,1)^0} = 4225 \text{ тыс.руб.}$$

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

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{ЧД_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{(1+r)^i}}$$

$$PI = \frac{\frac{10208,19}{(1+0,1)^1} + \frac{11074,18}{(1+0,1)^2} + \frac{11507,17}{(1+0,1)^3} + \frac{11950,48}{(1+0,1)^4} + \frac{12373,16}{(1+0,1)^5} + \frac{12806,15}{(1+0,1)^6}}{\frac{45927}{(1+0,1)^0}} = 1,092$$

3. T_{ок} – дисконтируемый срок окупаемости

$$NPV_0 = \frac{-45927}{(1+0,1)^0} = -45927 \text{ тыс.руб.};$$

$$NPV_1 = \frac{10208,19}{(1+0,1)^1} - \frac{45927}{(1+0,1)^0} = -36650 \text{ тыс.руб.};$$

$$NPV_2 = \frac{10208,19}{(1+0,1)^1} + \frac{11074,18}{(1+0,1)^2} - \frac{45927}{(1+0,1)^0} = -27490 \text{ тыс.руб.};$$

$$NPV_3 = \frac{10208,19}{(1+0,1)^1} + \frac{11074,18}{(1+0,1)^2} + \frac{11507,17}{(1+0,1)^3} - \frac{45927}{(1+0,1)^0} = -18850 \text{ тыс.руб.};$$

$$NPV_4 = \frac{10208,19}{(1+0,1)^1} + \frac{11074,18}{(1+0,1)^2} + \frac{11507,17}{(1+0,1)^3} + \frac{11950,48}{(1+0,1)^4} - \frac{45927}{(1+0,1)^0} = -10690 \text{ тыс.руб.}$$

$$NPV_5 = \frac{10208,19}{(1+0,1)^1} + \frac{11074,18}{(1+0,1)^2} + \frac{11507,17}{(1+0,1)^3} + \frac{11950,48}{(1+0,1)^4} + \frac{12373,16}{(1+0,1)^5} - \frac{45927}{(1+0,1)^0} = -3004 \text{ тыс.руб.}$$

$$NPV_6 = \frac{10208,19}{(1+0,1)^1} + \frac{11074,18}{(1+0,1)^2} + \frac{11507,17}{(1+0,1)^3} + \frac{11950,48}{(1+0,1)^4} + \frac{12373,16}{(1+0,1)^5} + \frac{12806,15}{(1+0,1)^6} - \frac{45927}{(1+0,1)^0} = 4225 \text{ тыс.руб.}$$

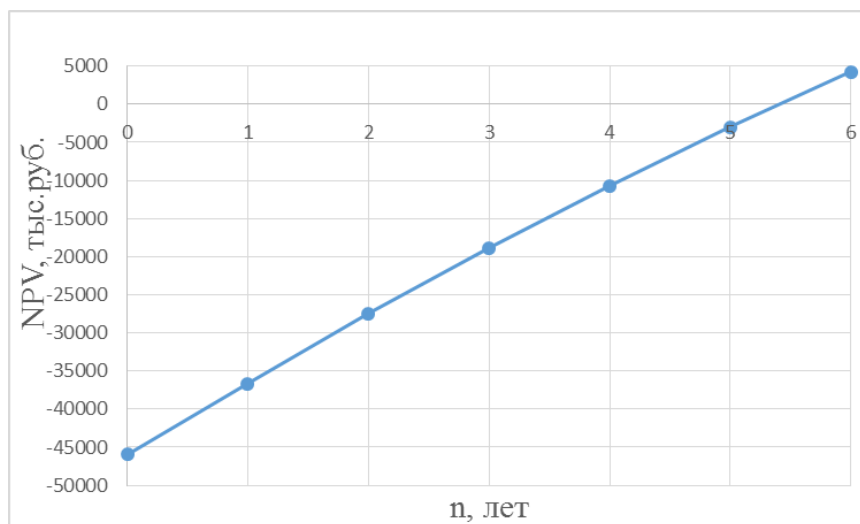


Рисунок 4.4 – График NPV(t)

Дисконтируемый срок окупаемости 6 лет.

4. ВНД (IRR) – внутренняя норма доходности:

$$IRR = r \text{ при } NPV = 0;$$

$$NPV_{r=0,1} = 4225 \text{ тыс.руб.};$$

$$NPV_{r=0,2} = -8046 \text{ тыс.руб.};$$

$$NPV_{r=0,3} = -16110 \text{ тыс.руб.};$$

$$NPV_{r=0,5} = -25680 \text{ тыс.руб.};$$

$$NPV_{r=0,7} = -30920 \text{ тыс.руб.};$$

$$NPV_{r=0,8} = -32690 \text{ тыс.руб.};$$

$$NPV_{r=1,0} = -35280 \text{ тыс.руб.}$$

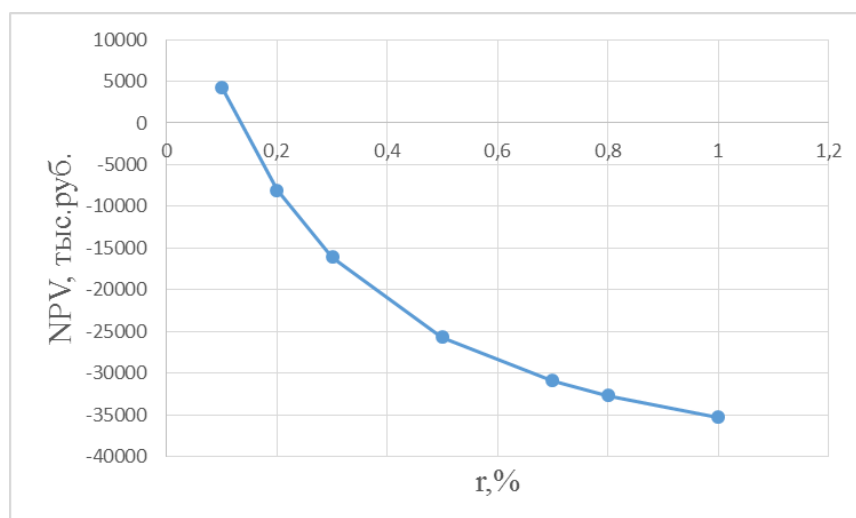


Рисунок 4.5 – График NPV(r)

По расчетам получено $IRR=12,96\%$.

Далее производится оценка важности рисков, классификация которых представлена в табл. Б.5. 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 табл. Б.6.

Далее производится расчет общих рисков (табл. Б.7), 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 этапе ОКР, чтобы по возможности снизить их отрицательное влияние.

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

Заключение по разделу

В ходе разработки настоящей главы ВКР были решены следующие задачи: определена концепция проекта, факторы микро- и макросреды, проанализирован рынок продукта, проведена экспертная оценка эффективности, SWOT-анализ, разработан календарный, производственный и финансовый план, рассчитан бюджет проекта, разработан инвестиционный план и проведена оценка рисков. Следует отметить важность для проекта в целом проведенных в данной главе исследований, которые позволили объективно оценить эффективность проводимых научно-технических исследований.

Список публикаций студента

1 Изучение влияния параметров искрового плазменного спекания на физико-механические свойства керамики $\text{NiO} - \text{ZrO}_2: \text{Y}_2\text{O}_3$ // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы XVII Международной научно-технической конференции – Томск, 14-16 октября 2015 г./ Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015 – С. 292-295.