

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Получение материала на основе диборида гафния и алюминия</b>

УДК 669.017:[669.297+669.71]

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ8И	Белякович Светлана Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Овечкин Б.Б.	К.Т.Н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Ильин А.П.	д.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Л.Ю.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романцов И. И.	К.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
22.04.01 Материаловедение и технологии материалов	Панин С.В.	к.т.н., доцент		

*Планируемые результаты обучения по ООП 22.04.01*

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения</b> (выпускник должен быть готов)
P1	Осуществлять сбор и критический анализ информации, включая научные публикации, патенты, маркетинговые исследования в области материаловедения и технологии материалов
P2	Управлять научно-исследовательским и производственным проектом, включая критический анализ проблемных ситуаций, оценки потенциала коллектива и самооценки
P3	Способен представлять и защищать результаты своей работы и деятельности коллектива, включая планы научно-исследовательских работ, производственных проектов, научные публикации и доклады с использованием современных коммуникативных технологий, в том числе на иностранном языке.
P4	Руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
P5	Ориентироваться в современных технологиях новых материалов с учетом экономичности, требований готовой продукции и интеллектуального потенциала предприятия, производства или научной группы
P6	Внедрять в производство технологии получения керамических, металлических наноматериалов и изделий, включая эксплуатацию соответствующего оборудования.
P7	Эксплуатировать оборудование и обрабатывать экспериментальные результаты с целью изучения структуры и свойств материалов, диагностики их эксплуатационных характеристик
P8	Разрабатывать новые и модернизировать существующие технологии получения керамических, металлических материалов и изделий, в том числе наноматериалов

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ С.В. Панин  
 (Подпись) (Дата)

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

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

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

Студенту:

Группа	ФИО
4БМ8И	Белякович Светлане Александровне

Тема работы:

Получение материала на основе диборида гафния и алюминия	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № _____ от _____

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Литература по теме исследования.  Порошок диборида гафния ТУ № 6-09-03-418-76. Форма частиц – неправильная; размер частиц – 40 мкм; порошок алюминия АСД–6М производства ООО «СУАЛ-ПМ» (г. Шелехов) среднеповерхностный диаметр частиц порошка – 2,3 мкм, форма частиц близка к сферической.
---------------------------------	--

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Освоение методики приготовления компактных материалов “диборид гафния- алюминий” (расчет масс компонентов, смешение, прессование, спекание); ДТА спеченных образцов; рентгенофазовый анализ спеченных образцов; измерение поглощающей способности $\beta$ -излучения образцами; измерение поглощающей способности $\gamma$ -излучения; измерение поглощающей способности нейтронного излучения; сравнение полученных результатов; разработка рекомендаций по использованию материала.
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация в формате Power Point в количестве - 22 слайдов
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
<i>Финансовый менеджмент</i>	Л.Ю. Спицына, к.э.н., доцент
<i>Социальная ответственность</i>	И. И. Романцов, к.т.н., доцент
<i>Приложение I (английская часть)</i>	А.Н. Панамарёва, к.ф.н., доцент
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Реферат (Abstract)	
1. Способы и материалы для ослабления потоков ионизирующего излучения и нейтронов (Methods and materials for attenuating the flow of ionizing radiation and neutrons)	

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Ильин А.П.	д.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ8И	Белякович С.А.		

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

Школа Инженерная школа новых производственных технологий  
 Направление подготовки (специальность) Материаловедение и технологии материалов  
 Уровень образования Магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение материаловедения  
 Период выполнения (осенний/весенний семестр 2019 /2020 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / Вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
30.09.2020	Глава 1. Способы и материалы для ослабления потоков ионизирующего излучения и нейтронов	10
30.10.2020	Глава 2. Методы исследования и характеристики порошков диборида гафния и алюминия	10
30.12.2020	Глава 3. Предварительные результаты	25
	Глава 4. Экспериментальные данные	30
02.03.2020	Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
02.03.2020	Глава 6. Социальная ответственность	10
1.05.2020	Приложение I. Раздел А (английский язык)	5

#### СОСТАВИЛ:

#### Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Овечкин Б.Б.	к.т.н.		

#### Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Ильин А.П.	д.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Панин С.В.	Д.Т.Н.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 109 с., 27 рис., 25 табл., 66 источников, 1 прил.

**Ключевые слова:** керамика, алюминия, диборид гафния, СВЧ-активирование, твердофазное спекание, жидкофазное спекание, горячее прессование, поглощение ионизирующего излучения, сканирующая микроскопия, рентгенофазовый анализ, спектрофотоскопия.

**Объектом исследования** являются термические и радиационные характеристики диборида гафния в матрице алюминия в зависимости от содержания диборида гафния; фазовый состав и структура композиционного материала: диборид гафния-алюминий.

**Цель работы** – спроектировать материал с оптимальным составом для максимального поглощения ионизирующего излучения.

**В процессе исследования** изготавливались порошковые смеси определенного состава, проводилось их твердофазное и жидкофазное спекание, а также горячее прессование; анализировались их механические характеристики.

**В результате исследования** были получены образцы с оптимальным процентным соотношением компонентов, обладающие удовлетворительными механо-физическими характеристиками и поглощающей способностью.

**Область применения:** медицинская отрасль диагностического и терапевтического назначения, ядерная промышленность.

**Экономическая эффективность/значимость** исследования основана на быстром темпе развития и росте масштабов сферы использования ядерных технологий, что влияет на необходимость создания материалов для защиты от нейтронного и ионизирующего излучения. Применение изотопов и излучений в медицине, как диагностического, так и терапевтического назначения требует защиты персонала. Различные сферы применения диктуют необходимость в изготовлении средств для хранения и транспортирования радионуклидов. Важным критерием создания и дальнейшей реализации радиоактивных изотопов для их транспортирования являются низкие массо-габаритные характеристики получаемых конечных изделий.

**Публикации:** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 печатных работах.

## ABSTRACT

The final qualifying work of the master contains 109 pages, 27 figures, 25 tables, 66 sources, 1 application.

**Keywords:** ceramics, aluminum, hafnium diboride, microwave activation, solid phase sintering, liquid phase sintering, hot pressing, absorption of ionizing radiation, scanning microscopy, x-ray phase analysis, spectroscopy

**The object of the study** is the thermal and radiation characteristics of hafnium diboride in an aluminum matrix depending on the content of hafnium diboride; phase composition and structure of the composite material: hafnium diboride-aluminum.

**The purpose of the work** is to design a material with an optimal composition for maximum absorption of ionizing radiation.

**During the study** powder mixtures of a certain composition were made, their solid-phase and liquid-phase sintering, as well as hot pressing were carried out; analyzed their mechanical characteristics.

**As a result of the study** samples were obtained with an optimal percentage ratio of components that have satisfactory mechano-physical characteristics and absorbency.

**Application areas:** medical industry of diagnostic and therapeutic purposes, nuclear industry.

**Economic efficiency / significance of the study** is due to the existing need to create new materials to protect personnel from ionizing radiation and neutron radiation, which is associated with the development and increase in the use of nuclear technology. The use of isotopes and radiation in medicine, both diagnostic and therapeutic, requires the protection of personnel. Various applications dictate the need for the manufacture of means for storing and transporting radionuclides. An important criterion for the creation and further implementation of radioactive isotopes for their transportation is the low mass and dimensional characteristics of the resulting end products.

**Publications:** The main results of the thesis are published in 4 publications.



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	11
ГЛАВА 1. СПОСОБЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОТОКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И НЕЙТРОНОВ .....	13
1.1 Излучатели элементарных частиц .....	13
1.1.1 Ускорители – циклотроны .....	13
1.1.2 Циклотроны – генераторы нейтронов .....	14
1.2 Материалы, используемые для ослабления потоков $\beta$ -, $\gamma$ -излучений и нейтронов .....	15
1.2.1 Поглощение $\beta$ – излучения .....	15
1.2.2 Поглощение $\gamma$ – излучения .....	16
1.2.3 Материалы для ослабления потоков нейтронов .....	17
1.3 Поглощение нейтронного излучения металлами и сплавами .....	19
1.4 Смачивание керамических материалов алюминием при контакте с расплавами и в композитах .....	21
1.5 Физико-химические свойства гафния и диборида гафния .....	22
1.5.1 Физические свойства .....	22
1.5.2 Химические свойства .....	25
1.6 Действие СВЧ излучения на нанопорошок алюминия .....	27
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКОВ ДИБОРИДА ГАФНИЯ И АЛЮМИНИЯ .....	29
2.1 Дифференциальный термический анализ .....	29
2.2 Рентгенофазовый анализ .....	31
2.3 Электронная микроскопия .....	33
2.4 Методика измерения кажущейся плотности (пористости КМ) .....	34
2.5 Методика СВЧ-активирования порошка алюминия .....	35
2.6 Методика приготовления и спекания образцов .....	36
2.6.1 Твердофазное спекание .....	36
2.6.2 Горячее прессование с предварительным жидкофазным спеканием .....	37
2.6.3 Горячее прессование без предварительного спекания .....	39
2.7 Методика измерения твердости образцов .....	39
2.8 Спектры излучения горящих образцов нанопорошков алюминия .....	40
2.9 Методика измерения поглощающей способности нейтронов и $\gamma$ -излучения .....	41
.....	41
2.10 Структурно – методологическая схема .....	42

ГЛАВА 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....	44
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ .....	50
ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	58
5.1 Оценка коммерческого потенциала исследования.....	58
5.2 Оценка готовности проекта к коммерциализации .....	60
5.3 Разделение выпускной квалификационной работы на этапы.....	61
5.4 SWOT-анализ.....	63
5.5 Определение трудоемкости этапов выпускной квалификационной работы.....	65
5.6 Составление сметы затрат .....	68
5.6.1 Затраты на амортизацию оборудования.....	68
5.6.2 Затраты на основные и вспомогательные материалы.....	69
5.6.3 Затраты на электроэнергию .....	70
5.6.4 Накладные расходы.....	70
5.6.5 Смета затрат на ВКР .....	71
ГЛАВА 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	76
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	76
6.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	76
6.2.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя. .	77
6.2 Профессиональная социальная безопасность.....	78
6.2.1. Анализ вредных и опасных производственных факторов.....	79
6.3 Экологическая безопасность.....	85
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	89
Список публикаций.....	91
Список используемой литературы .....	92
Приложение I .....	97

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие атомной промышленности обуславливает необходимость проектирования новых материалов для защиты от ионизирующего излучения и нейтронов. Необходимо разработать новые материалы, которые могут поглощать или рассеивать ионизирующее излучение, и в то же время иметь низкую плотность и небольшие массогабаритные характеристики конечных изделий. Более того, использование свинцовых экранов и их последующая утилизация является сложной экологической проблемой; следовательно, замена таких экранов новыми материалами позволяет решить не только технические проблемы, но и улучшить экологическую ситуацию.

Диборид гафния ( $\text{HfB}_2$ ) следует рассматривать в качестве перспективного материала из-за его высокого сечения захвата нейтронов и рассеивающих свойств ядра бора. Алюминий имеет относительно низкую плотность и низкую наведенную радиоактивность. Физико-химические и радиационные свойства диборида гафния хорошо изучены. Известно также, что он обладает высокой прочностью ковалентной связи и низким коэффициентом самодиффузии, что указывает на необходимость высоких температур и давления для создания прочной непористой структуры  $\text{HfB}_2$ . Известно, что коротковолновое СВЧ воздействие на металлические порошки приводит к увеличению запасенной энергии порошка и повышению скорости спекания.

Учитывая известные особенности спекания систем: металл-керамика, приводящие к созданию малопрочных систем, чувствительных к растрескиванию за счет влияния различных коэффициентов теплового расширения металлов и керамики, а также термических напряжений на границе раздела металл-керамика, решено создать систему на основе порошка алюминия, активированного СВЧ-излучением. СВЧ – облучение также приводит к увеличению запасенной энергии нанопорошка алюминия, что является результатом образования и стабилизации двойного электрического слоя. Таким образом, короткоимпульсное СВЧ – излучение приводит к изменению субструктурных характеристик металлсодержащих высокоэнергетических материалов и приводит к увеличению микронапряжений в металлическом компоненте частиц алюминия, что способствует спеканию при нагревании.

В работе твердофазное спекание было выбрано в связи с тем, что, кроме требуемых более низких затрат энергии, этот процесс взаимодействия порошков в твердой фазе является процессом взаимной диффузии. Металлический слой, нанесенный на керамику, ча-

стично окисляется со стороны, обращенной к керамике, образуя переходный слой. Кристаллические решетки в поверхностных слоях изменяются: за счёт диффузионного перемешивания формируется плавно меняющийся переходный слой.

# ГЛАВА 1. СПОСОБЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОТОКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И НЕЙТРОНОВ

## 1.1 Излучатели элементарных частиц

### 1.1.1 Ускорители – циклотроны

Циклотрон – циклический ускоритель нерелятивистских тяжёлых заряженных частиц (протонов, ионов), в котором частицы двигаются в постоянном и однородном магнитном поле, а для их ускорения используется высокочастотное электрическое поле неизменной частоты [1].

Схема устройства представлена на рис. 1.1.

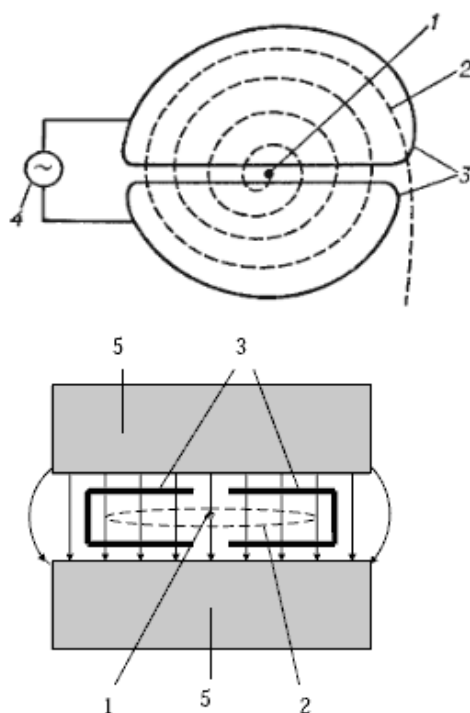


Рисунок 1.1 – Схема циклотрона: вид сверху и сбоку: 1 - источник тяжелых заряженных частиц (протонов, ионов), 2 - орбита ускоряемой частицы, 3 - ускоряющие электроды (дуанты), 4 - генератор ускоряющего поля, 5 – электромагнит [1].

Вблизи центра камеры расположен инжектор, из него заряженные частицы попадают в камеру. К дуантам (ускоряющим электродам) приложено переменное поле фиксированной частоты, которое ускоряет заряженные частицы.

Движение частиц осуществляется в постоянном магнитном поле, направленном пер-

пендикулярно плоскости движения частиц, по раскручивающейся спирали. Заряженные частицы ускоряются импульсным электрическим полем в зазоре между дуантами. На последнем витке спирали включается отклоняющее электрическое поле, выводящее пучок наружу. Непрерывный режим ускорения создается благодаря постоянству магнитного поля и частоты ускоряющего поля.

Недостатком циклотрона является нарушение синхронности ускорения на различных витках из-за отклонения Лоренц – фактора (релятивистского фактора) от единицы, в результате чего, частицы с существенно возросшими энергиями уже не успевают оказаться в зазоре между ускоряющими электродами в нужной для ускорения фазе электрического поля.

Для ускорения тяжёлых частиц в режиме раскручивающейся спирали до энергий в десятки раз больших (вплоть до 1000 МэВ) используют модификацию циклотрона, называемую фазотрон [1].

### 1.1.2 Циклотроны – генераторы нейтронов

В качестве источников нейтронов чаще всего используют циклотроны и ускорители трансформаторного типа (генераторы нейтронов).

На циклотронах нейтроны обычно получают при облучении бериллиевой мишени пучком дейтонов с энергиями в интервале от 8 до 50 МэВ. Спектры получаемых нейтронов приведены на рисунке 1.2.

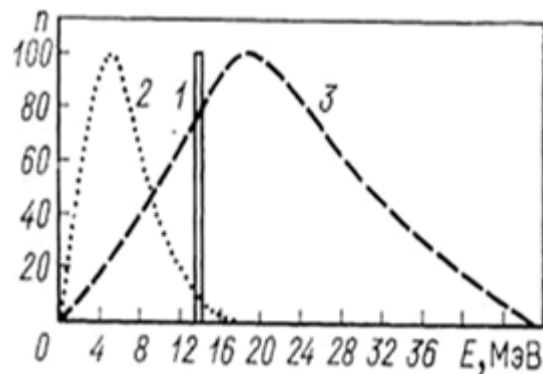


Рисунок 1.2 – Спектры нейтронов, получаемых: 1 – с помощью генератора нейтронов при  $T(d,n)$  – реакции; 2, 3 – с помощью циклотрона при  $Be(d,n)$  – реакции и энергиях дейтонов, соответственно, 16 и 50 МэВ [2].

Из рисунка 1.2 следует, что энергетический спектр нейтронов простирается практически от нуля до энергии, близкой к энергии падающих на мишень дейтонов.

На мишенях из более тяжелых элементов, чем бериллий, выход нейтронов на единицу тока значительно ниже, и использование этих мишеней может быть обусловлено, главным образом, техническими причинами.

Сравнивая циклотроны с генераторами нейтронов, следует отметить, что циклотроны имеют преимущество в отношении достижения больших выходов нейтронов в единице угла. С их помощью можно варьировать энергию, а точнее, энергетический спектр нейтронов. Нейтронный пучок циклотронов обычно стабилен во времени [2].

## 1.2 Материалы, используемые для ослабления потоков $\beta$ -, $\gamma$ -излучений и нейтронов

### 1.2.1 Поглощение $\beta$ – излучения

Бета-распад – разновидность радиоактивного распада, при котором нуклоны атомного ядра самопроизвольно меняют свой тип. Распад происходит при условии энергетической выгоды и сопровождается испусканием электрона или позитрона. Бета-распад может происходить без испускания каких-либо заряженных частиц. Бета частицы радиоактивного вещества имеют непрерывный энергетический спектр.

Для защиты от  $\beta$ -излучения используются материалы с небольшим атомарным номером, что снижает энергию тормозного излучения. В работе [3] описывается поглощение излучения бета – спектра  $^{90}\text{Sr}$  алюминиевым поглотителем различной толщины.

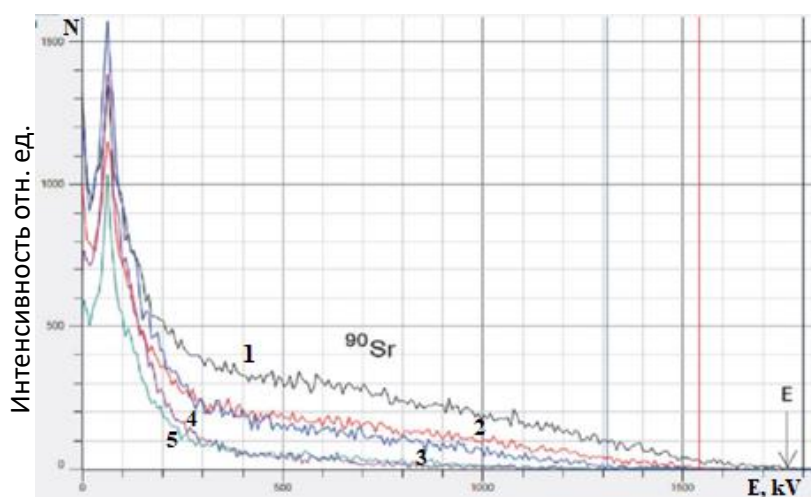


Рисунок 1.3 – Интенсивность излучения изотопа  $^{90}\text{Sr}$  без поглотителя (линия 1) и с алюминиевым поглотителем различной толщины (линии 2,3) [3]

Рисунок 1.3 показывает внешний вид спектра бета-излучения изотопа  $^{90}\text{Sr}$ , полученного с использованием сцинтилляционного детектора. Наблюдается наложение двух характерных распределений бета-излучения по энергии.

### 1.2.2 Поглощение $\gamma$ – излучения

В результате взаимодействия  $\gamma$ -излучения с ядрами атомов вещества происходит ослабление интенсивности пучка  $\gamma$ -кванта. Основными механизмами взаимодействия являются фотоэффект, комптон-эффект и процесс образования пар электрон-позитрон.

Фотоэффект наблюдается, если энергия  $\gamma$ -кванта больше энергии связи электрона оболочки атома с ядром. Это явление состоит в том, что фотон целиком поглощается атомом, а один из электронов атомной оболочки выбрасывается за пределы атома (ионизация).

Комптон эффект представляет собой рассеяние гамма-квантов на коллективизированных электронах. Электрон можно считать условно свободным, если энергия гамма-квантов во много раз превышает энергию связи электрона.

Образование пар электрон – позитрон возможно лишь в кулоновском поле частицы. Порог рождения пар в поле электрона равен  $4m_e c^2$ . Это связано с тем, что энергию отдачи получает электрон, имеющий малую массу, и пренебречь ею уже нельзя. Образование пар в поле электрона характеризуется сравнительно малым сечением.

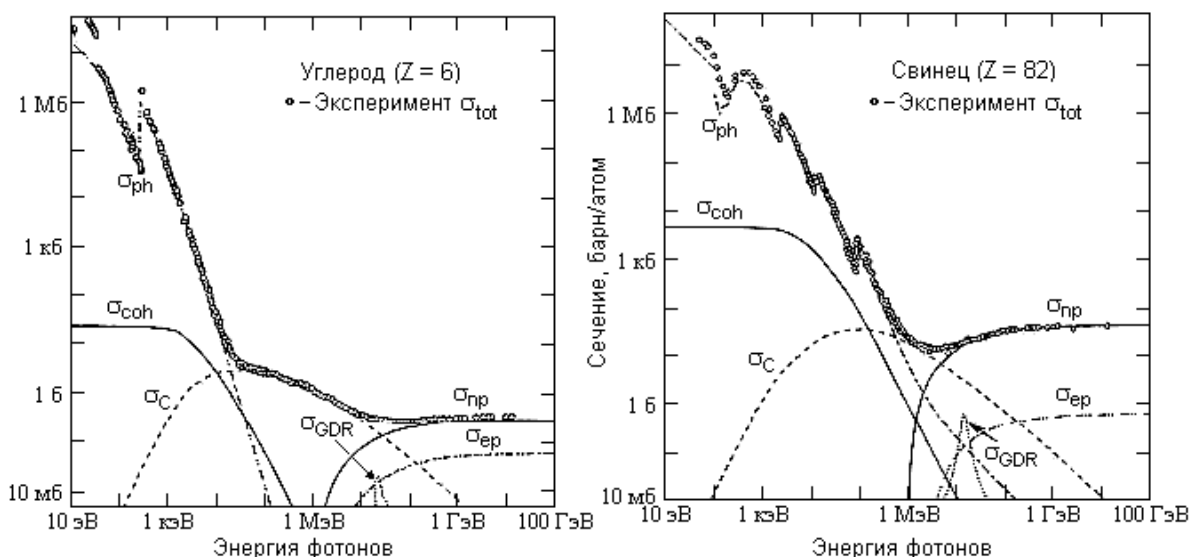


Рисунок 1.4 – Зависимость сечения взаимодействия фотонов с углеродом ( $Z = 6$ ) и свинцом ( $Z = 82$ ) при энергиях фотона от 10 эВ до 100 ГэВ: где  $\sigma_{ph}$  - сечение фотоэффекта,  $\sigma_{coh}$  - сечение релеевского рассеяния,  $\sigma_C$  - сечение комптоновского рассеяния,  $\sigma_{нр}$  - сечение рождения пары в поле ядра,  $\sigma_{ер}$  - сечение образования пар в поле атомных электронов,  $\sigma_{GDR}$  - сечения ядерного фотопоглощения [4]



Следуя из данных на рис. 1.4, эффективное сечение фотоэффекта ( $\sigma_{ph}$ ) на атомах вещества доминирует при энергиях фотонов ниже 0,01 МэВ в углероде и ниже 1 МэВ в свинце. При взаимодействии  $\gamma$ -квантов с энергией в пределах 0,1–10 МэВ с материалами на основе элементов низким атомарным номером преобладает эффект Комптона, при котором  $\gamma$ -квант взаимодействует с электронами и передает им часть своей энергии. Если энергия  $\gamma$ -кванта превышает удвоенную массу электрона, возможно образование пары электрона и позитрона.

На рисунке 1.5 а и 1.5 б показаны зависимости линейного коэффициента поглощения фотонов в алюминии и свинце от энергии фотонов.

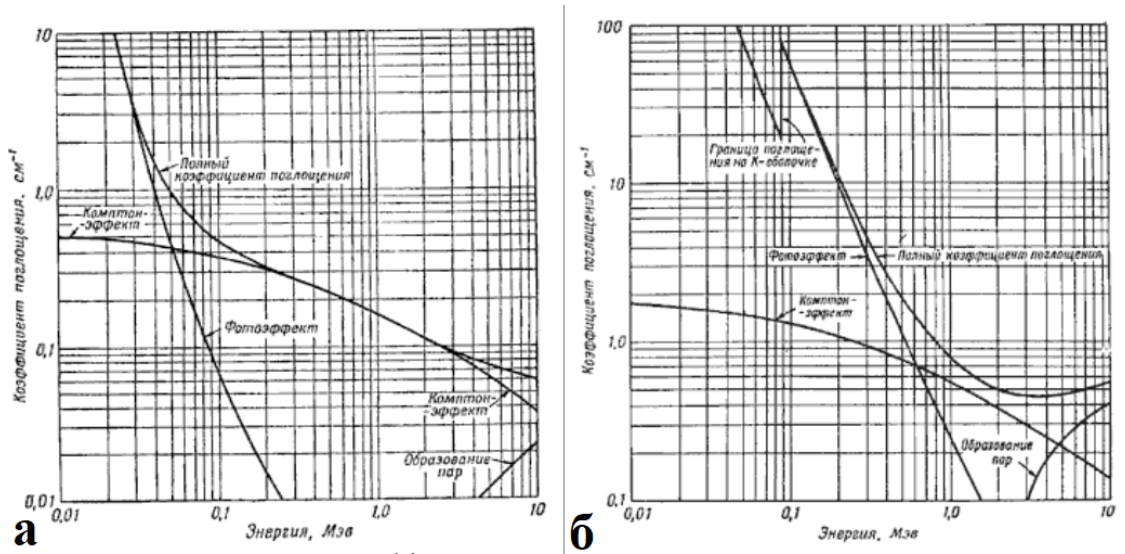


Рисунок 1.5 – Зависимость коэффициента линейного поглощения фотонов в алюминии (а) в свинце (б) от их энергии [4].

### 1.2.3 Материалы для ослабления потоков нейтронов

Подбирая материал для ослабления потока нейтронов необходимо учесть механизмы взаимодействия вещества и нейтрона. Механизмы поглощения различны для тепловых, резонансных и медленных нейтронов, например, быстрые нейтроны должны быть предварительно замедлены [5].

В случае упругого рассеяния, когда процесс замедления нейтронов основан на упругих столкновениях ядер замедлителя и нейтронов, наиболее эффективными являются материалы с легкими ядрами, по массе сравнимыми с массой нейтронов. Этот механизм замедления является основным при сравнительно малых энергиях. В то же время при рассмотрении неупругого рассеяния следует обратить внимание на вещества с тяжелыми ядрами, так как в этом случае энергия налетающего нейтрона должна превышать энергию первого

уровня ядра в меньшее количество раз, чем в случае с лёгким ядром. В этом случае основополагающей реакцией является радиационный захват [5,6].

Необходимо обратить внимание также на то, что тепловые и медленные нейтроны проникают через защиту путем диффузии до момента захвата или выхода из нее. При захвате тепловых нейтронов в большинстве случаев возникает необходимость ослабления вторичного  $\gamma$ -излучения. Следуя этому можно выделить несколько групп материалов, подходящих для замедления и поглощения пучка нейтронов.

Эффективными поглотителями быстрых нейтронов являются вещества с малым атомным номером, в частности водородосодержащие. Ядро атома водорода – протон имеет массу, близкую к массе нейтрона, что позволяет нейтрону рассеивать половину первоначальной энергии при каждом упругом столкновении. При столкновении с атомами водорода быстрые нейтроны замедляются до тепловой энергии и поглощаются средой. Применение водорода для поглощения тепловых нейтронов сопровождается гамма-излучением.

Вода может служить материалом защиты от нейтронного излучения в связи с большой концентрацией атомов водорода в ней. Слой вода толщиной 1 см уменьшает плотность нейтронов в 2,7 раз [7].

Одним из вариантов водородосодержащего соединения также может выступить полиэтилен. Полиэтилен в единице объема содержит большее число атомов водорода по сравнению с водой, помимо этого, ядра кислорода в нем заменены более легкими ядрами углерода. Его можно применять на участках, где температура ниже температуры его размягчения (180–190 °С). В то же время при его использовании следует учитывать высокий коэффициент линейного расширения. Помимо этого, водород входит в состав парафина, пластмасс, гидридов металлов, бетона [5,7].

Защита из бетона применяется как дешевая и эффективная защита из строительного материала для различного вида стационарных реакторов. Выбор типа бетона определяется видом установки и может комбинироваться на различных участках. Согласно источникам [8], наиболее верно в целях экономии применять обычный бетон с плотностью 2200-2400 кг/м<sup>3</sup>, но отдельные участки защиты необходимо локально увеличить за счет использования тяжелых бетонов, плотность которых может достигать 6200 кг/м<sup>3</sup>.

Легкие неводородосодержащие вещества перспективны для ослабления потоков нейтронов, например, графит или карбид бора. Следует учесть, что при длительном облучении потоком нейтронов графит ставится хрупким, самовозгорается [9]. Карбид бора же выделяет литий и гелий в результате ядерной реакции, что сказывается на его коррозионной

стойкости и прочности. Недостатком такой защиты также является ее неспособность защищать от  $\gamma$ -излучения. Дисперсная смесь графита и карбида бора, тем не менее, способна ослабить поток тепловых нейтронов в 400 раз [7,8].

Для ослабления потока нейронного излучения могут использоваться тяжелые металлы или их соединения. Замедление нейтронов в таких средах осуществляется за счет неупругого рассеяния, сечение которого остается постоянным, и, независящим от энергии нейтронов, начиная с энергии 3–4 МэВ [8,10].

Высокоэффективные радиационно-защитные композиции получают при оптимальном сочетании свойств металлов и неметаллов: представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Свойства радиационно-защитных композиций\*

Комбинация материалов	$v$ , %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$N_n$ , 10 <sup>-22</sup> см <sup>-3</sup>	Длина релаксации мощности дозы, см				
				$L_b$	$L_n$	$L_t$	$L_\gamma$	$L$
Fe + полиэтилен (парафин)	66	5500	2,8	6,6	6,6	2,0	6,6	6,6
Co + H <sub>2</sub> O	60	5700	2,7	6,8	6,8	2,0	5,1	6,8
Pd + H <sub>2</sub> O	60	7700	2,7	6,9	6,9	2,0	3,7	6,9
Fe + H <sub>2</sub> O	61	5100	2,6	7,0	7,0	2,0	6,8	7,0
Pb + полиэтилен	21	3100	6,3	8,7	2,9	4,0	8,7	8,7
Тяжелый бетон	100	3800	1,2	9,0	6,0	2,0	9,0	9,0
Pb + H <sub>2</sub> O	71	8400	1,9	9,6	9,6	4,0	3,4	9,6
Обычный бетон	100	2300	1,2	12,0	6,0	3,0	17,0	17,0
H <sub>2</sub> O	100	1000	6,7	10,0	2,6	2,8	39,0	39,0

\* $v$  – объемная доля тяжелой компоненты;  $L_b$ ,  $L_n$ ,  $L_t$ ,  $L_\gamma$ ,  $L$  – длина релаксации быстрых, промежуточных, тепловых нейтронов и гамма-излучения, соответственно;  $L$  – длина релаксации смешанного гамма-нейтронного излучения.

Тяжелые материалы хорошо ослабляют быстрые нейтроны и  $\gamma$ -излучение, но плохо промежуточные, которые в свою очередь хорошо ослабляются водородосодержащими соединениями.

### 1.3 Поглощение нейтронного излучения металлами и сплавами

Двигаясь в металлической среде нейтрон взаимодействует локально с ядрами атомов

и практически не взаимодействует с электронами.

В зависимости от энергии нейтрона могут осуществляться как механизмы упругого взаимодействия, так и неупругого. При упругом столкновении нейтрона и атома последующая динамика зависит от энергии нейтрона, направления движения, симметрии решетки атомной структуры.

Если энергия, переданная атому, меньше пороговой энергии  $E_d$ , то атом смещается и затем возвращается на свое место. Это смещение характеризуется возмущением движения соседних атомов и как следствие возмущением электронной подсистемы с образованием фотона. Если энергия, переданная атому, превышает  $E_d$  в менее, чем в 2,5 раза, то образуется одна устойчивая пара Френкеля и вылетевший междоузельный атом возбуждает кристаллическую решетку с теми же последствиями, что и в первом случае. Когда энергия больше пороговой энергии  $E_d$  в 2,5 раза и более, то в результате образуется каскад смещений, то есть первично выбитый атом обладает достаточной энергией, чтобы самостоятельно выбить другие атомы и как результат образовать область смещенных атомов и вакансий. Один нейтрон может вывести из равновесного состояния таким способом до 300 атомов в алюминии [10,11].

Металлы, подвергнувшиеся такому воздействию, имеют остаточное изменение свойств. Изменению свойств, помимо вышеупомянутого механизма, также способствует образование треков. В результате упругих колебаний отдельных групп атомов происходит локальное увеличение температуры в металле, а затем быстрое рассеивание тепла за счет теплопроводности. В результате такого явления металл получает локальную закалку, сопровождающуюся сильными остаточными изменениями решетки, что усложняет течение металла. Такой эффект называется ядерным упрочнением металла и характеризуется увеличением прочности и снижением пластичности и вязкости. Эффект уменьшается с повышением температуры и исчезает при достижении температуры рекристаллизации.

При воздействии нейтронного излучения на металл имеется вероятность образования атомов новых элементов вследствие захвата нейтрона атомом металла или деления. При достаточно длительном облучении чистый металл может перейти в сплав [11].

Согласно данным работ Кемпера и Келли [12–14], рассматривающих влияние излучения на цирконий и его сплавы, предел текучести и предел прочности холоднодеформированного нелегированного циркония под действием потока дозой  $2,5 \cdot 10^{20}$  нейтрон/см<sup>2</sup> увеличились. Свойства удалось восстановить до значений близких к первоначальным с помощью отжига при температуре 250 °С в течение 200 ч.

Данные также подтверждены в работах Мейкин и Минтер [12], где дозой  $5 \cdot 10^{19}$  нейтрон/см<sup>2</sup> облучался образец сильнодеформированного циркония при температуре 100 °С. В результате было обнаружено незначительное увеличение предела текучести и прочности, а также небольшое изменение пластичности.

В работе Н. Ф. Правдюк и др. [11,15] изучались цирконий и тантал-циркониевые сплавы под воздействием потока  $4 \cdot 10^{19}$  и  $1 \cdot 10^{20}$  нейтрон/см<sup>2</sup> при температурах 80 и 300 °С, соответственно. В результате определено, что облучение при более низких температурах приводит к более серьезным изменениям свойств. Использование циркония ограничивает его низкая прочность при повышенных температурах и слабое сопротивление коррозии.

Согласно исследованиям Вилсдорфа [13,16], которые были проведены на никелевой фольге при облучении дозой  $1 \cdot 10^{19}$  нейтрон/см<sup>2</sup>, повышение предела текучести в облученном металле осуществляется за счет закрепления дислокаций на петлях и узлах, которые образуются на вакансиях.

Никелевые сплавы обладают высокими прочностными свойствами в области температур 650–980 °С, что подтверждено работой Механа [12], где облучались пружины из стеллита и инконеля Х дозой  $1 \cdot 10^{19}$  нейтрон/см<sup>2</sup>.

#### **1.4 Смачивание керамических материалов алюминием при контакте с расплавами и в композитах**

При получении тугоплавких керамических материалов и тепловыделяющих смесей в качестве компонента используются нанопорошки алюминия. На поверхности алюминия формируется рентгеноаморфный слой толщиной 2–10 нм из гидроксидов алюминия. Структура такого слоя в значительной степени определяет адсорбционные свойства на поверхности частиц.

Важным является также адсорбция паров воды на поверхность оксидного слоя и содержащиеся в алюминии примеси. В первом случае образуется первый гидроксидный слой в виде AlOH-групп, дальнейший процесс адсорбции воды из газовой фазы приводит к образованию водородных связей между молекулами воды и образованию второго слоя. Количество адсорбированной фазы будет меняться в зависимости от содержания паров воды в атмосфере и площади поверхности порошков, что в результате будет влиять на основность поверхности частиц. Молекула воды диссоциирует с образованием анионов OH- и катионов H+, последние являются окислителем. А во втором случае – примеси концентрируются в приповерхностном слое частиц алюминия, повышая их устойчивость к окислению [17].

При рассмотрении задачи смачивания керамических материалов алюминием особую важность приобретает вопрос различных характеристик термического расширения у металлов и керамики, что приводит к созданию малопрочных систем, склонных к образованию трещин.

В случае удачного совмещения системы прилегающая к металлу керамика изменяет свои свойства: изменяется цвет керамики, увеличивается микротвердость, механическая прочность. Максимальные термические напряжения наблюдаются на границе керамики и металла. Для упрочнения границы раздела фаз существует несколько методов, например, метод на основе прессованных порошков, где впрессованный в сырую керамику металлический порошок подвергается отжигу в специально подобранной газовой среде. Такой метод успешно применяется в случае необходимости дальнейшей механической обработки детали.

Существует метод с использованием металлизации керамики порошками тугоплавких металлов. В основе данного метода лежит создание дополнительного межфазного слоя на границе керамика–металл. Такая переходная область может образовываться, или за счет диффузии атомов металла в керамику, или за счет более сложных процессов. Со стороны керамики во взаимодействие с окислами алюминия на поверхности его частиц вступают во взаимодействие компоненты с кислотными свойствами. В переходном слое будут образованы соединения металлов.

Таким образом, при пайке керамики с металлом существенную роль играют твердофазные реакции. Процесс твердофазного взаимодействия является диффузионным процессом. Слой металла, нанесенный на керамику, частично окислен со стороны, обращенной к керамике. Кристаллическая решетка металла в поверхностном слое претерпевает изменения, в то же время, химически реорганизованные ячейки не отделены от внутренних ячеек с исходной кристаллической структурой [17].

## **1.5 Физико-химические свойства гафния и диборида гафния**

### **1.5.1 Физические свойства**

Гафний открыт в 1922 году и является ближайшим аналогом циркония, в природных минералах всегда сопутствует цирконию и разделение элементов является трудоемким процессом. Распространенность гафния в земной коре по массе  $3,3 \cdot 10^{-4} \%$  [18].

Гафний находится в IV группе Периодической системы элементов, входит в подгруппу титана, атомный номер 72. Имеет две модификации, температура аллотропического

перехода из гексагональной плотноупакованной решетки в кубическую объемноцентрированную составляет  $1760 \pm 35$  °С. Образует с бором два соединения:  $\text{HfB}$  (температура плавления 2900 °С) и  $\text{HfB}_2$  (температура плавления 3250 °С) [18,19].

Существуют две модификации гафния: при комнатной температуре гафний обладает гексагональной кристаллической решеткой с плотной упаковкой, при нагревании до  $1760 \pm 35$  °С решетка гафния переходит в объемноцентрированную кубическую решетку [20].

В настоящее время гафний получают в виде побочного продукта при производстве циркония. Содержание гафния в цирконовых рудах составляет примерно 0,2–15 % от общего содержания циркония в руде. По физико-химическим свойствам гафний и цирконий близки друг к другу, но тем не менее значительно различаются по ядерным свойствам [19,20].

$\text{HfB}_2$  к диборидам переходных металлов и имеет структуру из слоев атомов металла, чередующихся со слоями атомов бора, образующих графитоподобные плоские сетки, представленные на рисунке 1.3.

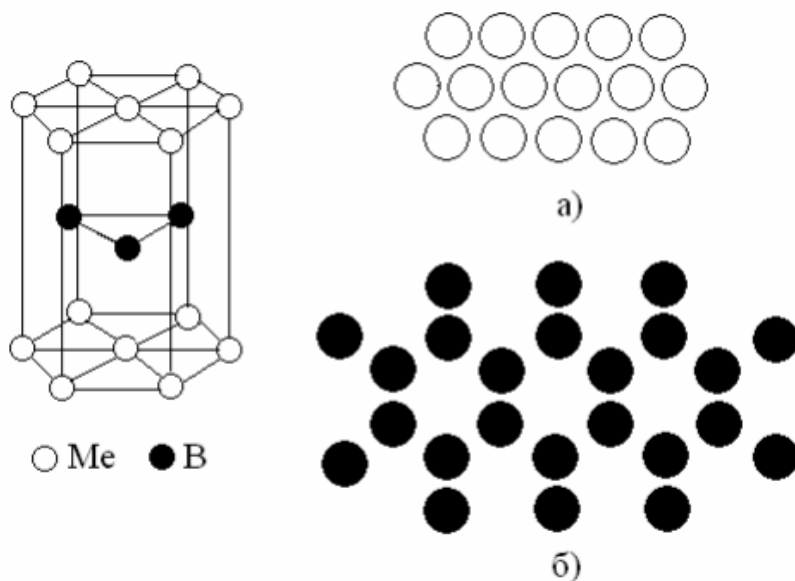


Рисунок 1.3 – Кристаллическая структура  $\text{HfB}_2$ , где: а – слои из металлических атомов в кристалле; б – слои из атомов бора в кристалле [21]

Образование  $2s^1 2p^2$ -конфигурации атомов бора в дибориде гафния определяет наличие в структуре графитоподобных плоских сеток. Связь между слоями атомов бора и атомов металла осуществляется за счет нелокализованных коллективизированных электронов [21].

Бориды переходных металлов представляют собой тугоплавкие соединения, температура плавления которых зачастую выше температуры плавления исходных металлов. Характерным свойством таких боридов является значительная твердость, связанная с высокой энергетической прочностью межатомных связей (в основном это связано с прочной ковалентной связью В-В) [21].

Диборид гафния образуется горячим прессованием смеси порошком гидрида гафния и бора с последующим гомогенизирующим обжигом при 1550 °С в атмосфере аргона или в вакууме при 1250 °С. Существует метод получения диборида гафния путем нагревания смесей стехиометрических количеств порошков металла гафния и бора в вакуумной печи при температуре 1527 °С. Помимо этого имеется способ получения путем осаждения из газовой фазы ( $\text{HfCl}_4 + \text{BBr}_3 + \text{H}_2$ ) или ( $\text{HfCl}_4 + \text{BCl}_3 + \text{H}_2$ ) при температуре 1930–2730 °С. Имеются и другие способы получения [22].

В таблице 1.2 представлены некоторые физические свойства диборида гафния.

Таблица 1.2 – Физические свойства диборида гафния [19,22]

Свойства	Значение
Молекулярный вес	200,11
Плотность, г/см <sup>3</sup>	11,2
Микротвердость, кГ/мм <sup>2</sup> при комнатной температуре нагрузка 30 г нагрузка 50 г при температуре 1625 °С нагрузка 2500 г	2900±500 2230 569
Температура плавления, °С	3250±100
Теплоемкость при 20 °С, Дж/моль·град	0,33
Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, мкОм·см	12
Коэффициент термического линейного расширения, ×10 <sup>6</sup> в интервале 20–1000 °С в град <sup>-1</sup>	5,3–5,7
Работа выхода, эВ	4,1 (2360 °С)
Постоянная Холла ×10 <sup>4</sup> в см <sup>3</sup> /К	–17

Теплоёмкость гафния и диборида гафния с повышением температуры непрерывно возрастает, как и коэффициент термического расширения [22].

Диборид гафния является хорошим проводником электрического тока, его удельное сопротивление ниже, чем удельное сопротивление чистого металла. Это обуславливается тем, что гафний является донором электронов, которые частично захватываются атомами бора, что приводит к усилению локализации электронов в сравнении с чистым металлом и уменьшению электрон-электронного взаимодействия [22].



Основными изотопами гафния являются  $\text{Hf}^{180}$  и  $\text{Hf}^{178}$ . Изотопный состав гафния представлен в таблице 1.3. Гафний имеет большое сечение захвата тепловых нейтронов, что делает возможным его использование в качестве поглотителя нейтронов. Диборид гафния, как естественный, так и обогащенный бором, также имеет высокое значение макроскопического сечения захвата тепловых нейтронов. Ядерные свойства диборида гафния представлены в таблице 1.4 [19].

Таблица 1.3 – Изотопный состав гафния [19]

Изотоп	Стабильность	Содержание в естественной смеси, % (вес.)	Атомный вес	Сечение захвата тепловых нейтронов, барн
Гафний	Естественная смесь	100	178,49	105
$\text{Hf}^{178}$	Стабильный	27,14	177,94	50+30
$\text{Hf}^{180}$	Стабильный	35,24	179,95	10

Таблица 1.4 – Ядерные свойства диборида гафния [19]

Бор в $\text{HfB}_2$	Плотность $\text{HfB}_2$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность $\text{HfB}_2$ по бору, г/см <sup>3</sup>		Ядерная плотность бора в $\text{HfB}_2 \times 10^{22}$ , атом/см <sup>3</sup>		Макроскопическое сечение $\text{HfB}_2$ , см <sup>-1</sup>
		$B_{\text{общ}}$	$B^{10}$	$B_{\text{общ}}$	$B^{10}$	
Естественная смесь	11,2	1,21	0,24	6,75	1,44	56
Обогащенный на 80 % по $B^{10}$	11,2	1,21	0,969	6,75	5,85	229

В атомной промышленности для изготовления тепловыделяющих элементов в реакторах используют особо чистый цирконий с низким сечением захвата нейтронов. Гафний является нежелательной примесью.

### 1.5.2 Химические свойства

При хранении на воздухе поверхность гафния покрывается оксидной пленкой, защищающей его от дальнейшего окисления. При нагревании в среде кислорода гафний сгорает, образуя диоксид гафния  $\text{HfO}_2$ .

Определение стойкости гафния против окисления при высоких температурах определялась на образцах йодидного гафния при нагревании в среде воздуха до 750 °C и 950 °C в течение 2 часов. Увеличение массы образцов при этом: 750 °C – 240 мг/дм<sup>2</sup>, 950 °C – 771 мг/дм<sup>2</sup>. Результаты измерения представлены на рисунке 1.4.

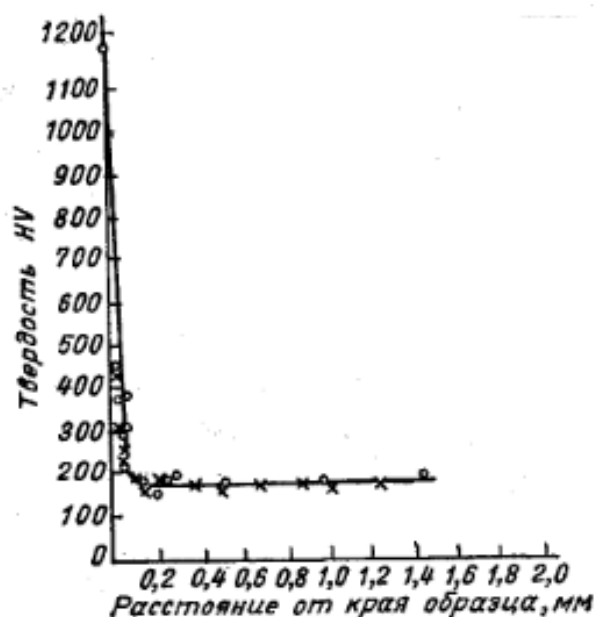


Рисунок 1.4 – Зависимость твердости поверхности гафния от температуры нагрева на воздухе при температурах 750 °С и 950 °С в течение 2 часов: × – 750 °С, O – 950 °С [20]

В целом при нормальных условиях гафний стоек к воздействию щелочей, азотной кислоты, разбавленной соляной кислоты, жидкого натрия. В значительной степени растворяется только в плавиковой кислоте и царской водке [18].

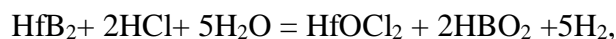
Гафний обладает хорошей коррозионной стойкостью, немного меньшей, чем цирконий в тех же средах. На коррозионную стойкость гафния не влияют небольшие количества примесей, таких как азот. Скорость окисления при нормальных условиях в 10 %-ной  $H_2SO_4$ , 10 %-ной  $HNO_3$  и 10 %-ной  $HCl$  равна  $(8,9-9) \cdot 10^{-3}$  мм/год, 37 %-ной  $HCl$  –  $3,3 \cdot 10^{-2}$  мм/год, 50 %-ной  $NaOH$  –  $4,6 \cdot 10^{-4}$  мм/год, 20 %-ной  $NaCl$  –  $2,2 \cdot 10^{-3}$  мм/год [18,20].

Гафний является полиморфным материалом и образует с рядом элементов твердые растворы. Не образует интерметаллических соединений с металлами более электроположительными, чем он сам [18].

Диборид гафния начинает окисляться в среде воздуха при 700 °С. Образует плотную пленку диоксида кремневого или бело-розового цвета [22].

При комнатной температуре диборид гафния устойчив к кипящей воде. Порошок диборида гафния малоустойчив к агрессивным средам: сравнительно легко разлагается в серной, соляной, хлорной, фосфорной кислотах, полностью разлагается при нагревании в азотной кислоте и царской водке. Введение  $HfB_2$  в раствор водорода, в растворы серной кислоты приводят к разложению боридов. К растворам едкого натра  $HfB_2$  также не устойчив [22].

В разбавленных соляной и серной кислотах разложение протекает согласно следующим уравнениям [18]:



Компактные образцы диборида гафния при пористости 15% более устойчивы и практически не разлагаются в разбавленной серной, соляной и азотной кислотах, а также в растворах гидроксида натрия.

### **1.6 Действие СВЧ излучения на нанопорошок алюминия**

В работе [9] проводилось исследование влияния СВЧ-излучения на термическую устойчивость в воздухе нанопорошка алюминия. Облучали нанопорошок алюминия на подложке из оксида алюминия.

В работе было установлено, что после воздействия СВЧ-излучения на нанопорошки алюминия увеличивается химическая активность нанопорошка алюминия. Было предположено, что это может быть связано с деструкцией двойного электрического слоя (ДЭС) на поверхности частицы, вызванной нагревом в результате воздействия СВЧ-излучения. Это обеспечивает более свободный доступ окислителя (протонов) к металлической составляющей и оксидной оболочки наночастицы, приводящее к увеличению емкости ДЭС на поверхности частицы и к разрыхлению оксидной оболочки. В подтверждение этому установлено, что происходит увеличение теплового эффекта окисления на 35,1 % и уменьшение температуры начала окисления на 40 °С.

Воздействие СВЧ-излучения приводит также к увеличению запасенной в нанопорошке алюминия энергии, что является следствием формирования и стабилизации двойного электрического слоя. Кроме того, СВЧ-излучение приводит к изменению субструктурных характеристик металлсодержащих высокоэнергетических материалов и приводит к росту микронапряжений в металлической составляющей частиц алюминия.

В работе [23] также показано, что воздействие СВЧ-излучения на нанопорошок алюминия приводит к увеличению теплового эффекта окисления в воздухе. Увеличение энергии воздействия приводило к увеличению удельного теплового эффекта окисления.

Дополнительно известно из работы [9], что СВЧ-излучение в присутствии восстановителя приводит к восстановлению металлов из соответствующих оксидах. Известно, что пассивированный в воздухе нанопорошок алюминия покрыт слоем адсорбированной воды

и кислорода. Диссоциация воды и восстановление протонов в порошках приводит к накоплению в небольших количествах водорода, который под воздействием СВЧ-излучения может ускорять восстановление алюминия из оксида.

## ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКОВ ДИБОРИДА ГАФНИЯ И АЛЮМИНИЯ

### 2.1 Дифференциальный термический анализ

Дифференциальный термический анализ (ДТА) относится к термическим методам анализа и основан на регистрации разности температур исследуемого вещества и эталонного образца при их одновременном нагревании или охлаждении [24].

При изменении температуры образца в нем начинают протекать процессы, характеризующиеся изменением энтальпии: плавление, изменение кристаллической структуры, дегидратация, диссоциация, окисление, восстановление и т.д. Такие процессы сопровождаются изменением массы, выделением или поглощением тепла, что приводит к тому, что температуры эталона и образца начинают различаться.

Достоинства метода ДТА [24]:

1) ДТА обладает широкой областью применения и подходит для термодинамических и кинетических исследований. С помощью этого метода можно определить следующие характеристики: теплоты химических и фазовых превращений, теплоемкости веществ; в некоторых случаях возможен кинетический анализ химических реакций; по величине эндоэффектов плавления, полученных с помощью ДТА, определяют содержание примесей в образце.

2) ДТА возможно проводить в широком диапазоне экспериментальных условий с возможностью варьирования скоростей нагрева и параметров давления, проводить измерения в изотермических условиях и менять газовую атмосферу.

3) ДТА является быстрым и информативным методом анализа в сравнении с другими калориметрическими методами.

Основным недостатком данного метода являются «утечки тепла», которые вносят погрешность в измеряемые величины. Они возникают за счет того, что в отличие от идеального калориметра, где тепловой поток от образца проходит по пути, содержащему измерительный датчик, в реальных приборах теплоперенос осуществляется другими не фиксируемыми путями. Это не только привносит погрешность в измерения, но также приводит к необходимости тщательной многократной калибровки прибора.

В работе использовали совмещенный ТГА/ДСК/ДТА анализатор Q600 SDT с термопарой Pt / Pt-Rh (тип R) Научно-аналитического центра Томского политехнического университета. Точность измерения температуры составляет 0,001 °С.

На рис. 2.1 представлены термограммы исходного и активированного СВЧ-излучением микропорошка алюминия АСД-6М.

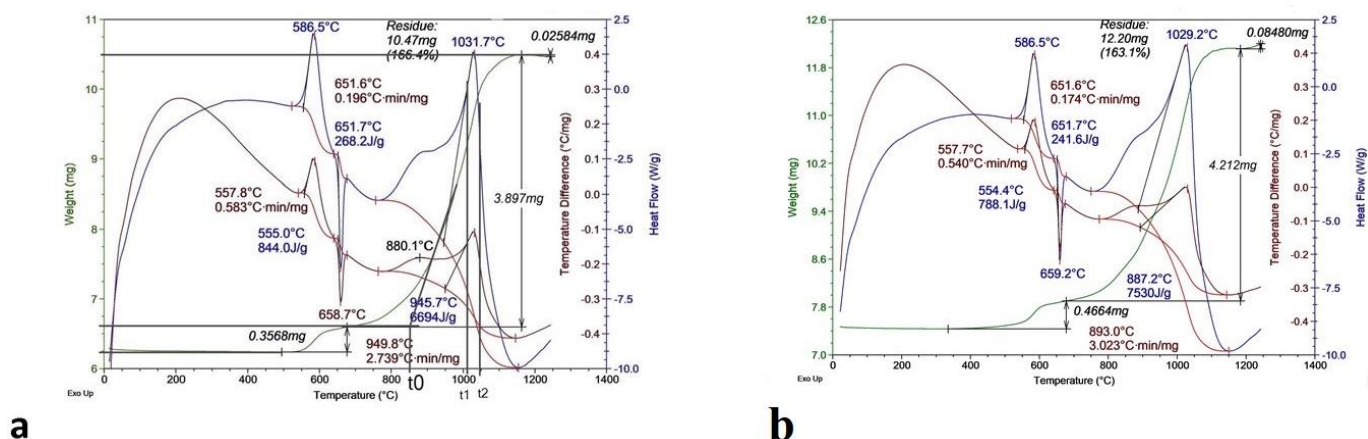


Рисунок 2.1 – Термограммы исходного (а) (масса 6,2900 мг) и СВЧ-активированного (б) (масса 7,4800 мг) порошка алюминия АСД-6М (скорость нагрева 10°/мин, атмосфера воздуха)

На основе данных дифференциального термического анализа рассчитывали 4 параметра химической активности, позволяющие характеризовать свойства порошка [9, 25]. Активностью порошков называется содержание фазы металла в порошке. В грубодисперстных порошках содержание алюминия приближается к 100 %, а в нанодисперстных находится в пределах 88–92 %, поэтому активность НП металлов необходимо определять по 4-м параметрам.

Исходные и СВЧ-активированные порошки были проверены на пирофорность путем определения 4 параметров активности [9]. Определено, что после активирования температура начала окисления порошка снизилась почти на 100 °С, находясь на отметке выше 400 °С. Основываясь на этом, можно сделать вывод, что СВЧ-активирование не придает свойств пирофорности ранее пассивированному порошку [26,27].

Для экспресс-анализа активности порошков использовались следующие параметры: температура начала окисления ( $t_{но}$ , °С), максимальная скорость окисления ( $v_{ок}$ , мг/с), степень превращения (степень окисленности) нанопорошка в определенном температурном интервале ( $\alpha$ , %), удельный тепловой эффект ( $\Delta H/\Delta t$ , кДж/г). Такие параметры для оценки активности порошков получаются при обработке результатов неизотермического окисления в условиях контролируемого нагрева.

Площадь удельной поверхности образцов ( $S_{уд}$ ) определена с использованием метода БЭТ-адсорбции. Содержание алюминия определяли с помощью волюмометрического метода – по объему водорода, выделившегося при взаимодействии нанопорошка алюминия с

10 %-м раствором NaOH [9]. Температуру начала окисления определяли по началу роста массы образца в процессе дифференциального термического анализа; удельный тепловой эффект определяли согласно программе термоанализатора как площадь под максимумом тепловыделения на термограмме. Сопоставимость результатов термического анализа порошков обеспечивается одинаковыми условиями эксперимента: стандартная масса исследуемых образцов составляет примерно  $1 \cdot 10^{-5}$  кг, скорость нагрева  $10$  °C/мин, в атмосфере воздуха.

Дифференциально-термический анализ лежит в основе методики количественной оценки пожаро- и взрывоопасности порошков. Данные ДТА служат для расчета параметров активности порошков и их смесей. В случае хранения или транспортировки, например нанопорошка прилагается его термограмма, записанная при стандартных условиях: масса навески  $5$  мг, скорость нагрева –  $10$  °C/мин, атмосфера – воздух, максимальная температура нагрева –  $800$  ( $1000$ ) °C.

Согласно реакции  $4Al + 3O_2 = 2Al_2O_3$ :

$v_{max}$  – максимальная скорость окисления –  $2,4$  мг/мин.

Количество связанного кислорода:

$$m_{конеч} - m_{исх} = 4,3 \text{ мг},$$

масса окисленного алюминия:

$$x = \frac{4,3 \cdot 4 \cdot 27}{3 \cdot 32} = 4,84 \text{ мг}.$$

$\alpha$  – степень окисленности:

$$\alpha = \frac{m_{окислAl}}{m_{исхAl}} \cdot 100 \% = \frac{4,84}{6,08} \cdot 100 \% = 79,6 \%,$$

$$\Delta H = 6694 \text{ Дж/г}.$$

После СВЧ-активирования  $7530$  Дж/г. Запасенная энергия  $836$  Дж/г.

Параметры активности нанопорошка алюминия, применявшегося в работе [22]:

- $T_{но} = 420$  °C;
- $v_{OK} = 0,19$  мг/с;
- $\alpha = 33,7$  % при нагреве до  $800$  °C;
- $\Delta H/\Delta t = 4,2$  кДж/с.

## 2.2 Рентгенофазовый анализ

В основе рентгенофазового анализа (РФА) лежит явление дифракции, т.е сильное рассеивание волн электромагнитного излучения на периодической решетке рассеивателя при определенных углах падения и длинах волн рентгеновского излучения [28].

Основной задачей рентгенофазового анализа является идентификация различных кристаллических фаз в смеси на основе анализа дифракционной картины исследуемого образца. Основным методом рентгенофазового анализа является метод порошка, который также применяется для определения параметров решетки. Возможно определение кубической, тетрагональной и гексагональной сингоний, но в некоторых случаях возможно определение низших сингоний [28].

Прохождение рентгеновского излучения через вещество сопровождается одним из трех видов взаимодействия лучей и вещества: рассеянием рентгеновского излучения, фотоэлектрическим эффектом и образованием электронно-позитронных пар.

Для исследования кристаллов или поликристаллических образцов требуется рентгеновское излучение от 10 кэВ до 50 кэВ. Его получают как при торможении быстрых электронов в металлических мишенях (тормозное излучение), так и при их неупругом столкновении с внутренними электронами атомов мишени. Тормозное излучение имеет непрерывный спектр, а характеристическое излучение – линейчатый спектр с узкими линиями [29].

Каждая фаза характеризуется своей кристаллической решеткой и характеризуется присутствием ей набором межплоскостных расстояний. Также каждой фазе соответствует собственная дифракционная картина, отображаемая на рентгенограмме. Интенсивность рефлексов каждой фазы будет зависеть от ее количества в образце и степени кристаллизации [30].

Определение фазового состава вещества осуществляют путем сравнения экспериментального набора значений  $2\theta$ ,  $d_{hkl}$  и  $I/I_0$  с табличными значениями, согласно картотеке ASTM (American Society for Testing and Materials) [30].

Начальную информацию о состоянии вещества получают, исходя из внешнего вида дифрактограммы: хорошо окристаллизованный и однородный по параметрам решетки материал дает узкие и интенсивные дифракционные рефлексы; плохо окристаллизованный и неоднородный – широкие и неинтенсивные; аморфный образец характеризуется широким рефлексом с угловой шириной  $2\theta = 10 - 20^\circ$ .

В работе использовали дифрактометр «Дифрей 401» с вертикальным гониометром с анодом из железа, длина волны, соответствующая излучению линии  $Fe_{K\alpha}$ , равна 0,193 нм. Также для уточнения экспериментальных данных использовали дифрактометр ДРОН-3.0 с анодом из меди (длина волны линии  $Cu_{K\alpha}$  0,154 нм). Дифракционные исследования с использованием дифрактометра Shimadzu XRD 7000 (медный анод) проводили в «Лаборатории высокотемпературной сверхпроводимости» Энергетического института Томского по-



литехнического университета. Рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 7000 представляет собой компактный рентгеновский дифрактометр общего назначения с вертикальным гониометром.

Структурный анализ проводили с использованием программного пакета PowderCell 2.4 с использованием рентгеновских параметров из карточек эталонных образцов сравнения базы PDF2+.

На рисунке 2.2 представлена дифрактограмма исходного нанопорошка алюминия.

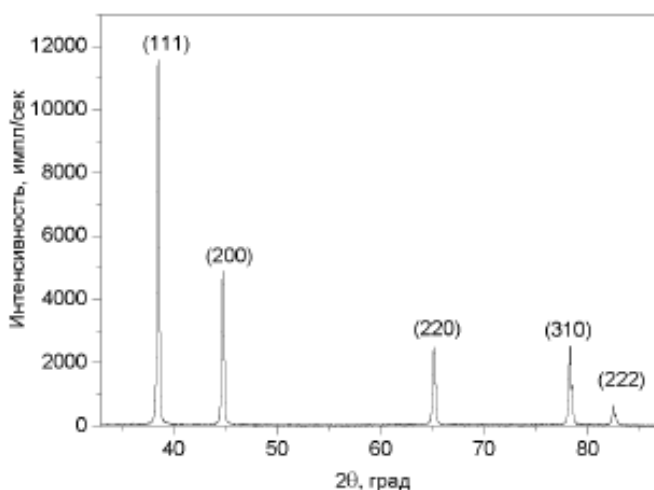


Рисунок 2.2 – Дифрактограмма нанопорошка алюминия (дифрактометр Shimadzu XRD 7000)

Согласно дифрактограмме основной и единственной кристаллической фазой, присутствующей в образце, является фаза металлического алюминия.

### 2.3 Электронная микроскопия

По физическому принципу формирования изображения электронная микроскопия подразделяется на растровую и просвечивающую. В растровой микроскопии изображение формируется из отражённых от объекта электронов, а в просвечивающей – из прошедших электронов. Благодаря существенно более высокой глубине разрешающей способности электронной микроскопии по сравнению с оптической, электронная микроскопия является основным инструментом для наблюдения морфологии и структуры малых частиц.

Для проведения исследований кристаллических структур, образованных при сгорании нанопорошка алюминия в воздухе, в работе использовали растровые электронные микроскопы JSM-840 фирмы «Jeol» и SEM 515 фирмы «Philips».

## 2.4 Методика измерения кажущейся плотности (пористости КМ)

Структура сыпучего материала (СМ) включает частицы СМ и газовую фазу между ними. В результате присутствует твердая и газовая фазы. В результате гетерогенности системы различают несколько видов плотности, представленных на рисунке 2.3.

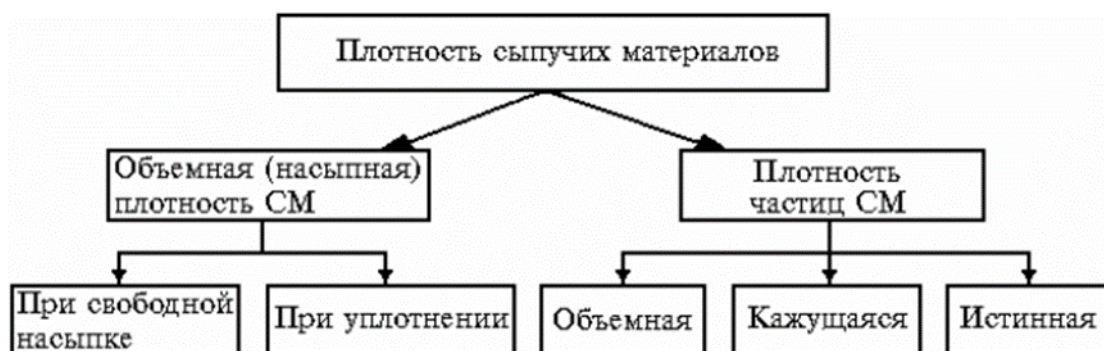


Рисунок 2.3 – Дифференциация видов плотности сыпучего материала с учетом влияния газовой фазы [31]

Согласно стандарту кажущейся плотностью называют отношение массы образца к его объему с учетом закрытых пор, но без учета открытых [32].

Насыпная или объемная плотность (ОП СМ) – масса единицы объема СМ свободно насыпанного в какую-либо емкость непосредственно после ее заполнения. В объем сыпучего материала входят внутренние поры частиц и промежуточное пространство между ними заполненное газом. В ряде случаев объемную плотность определяют после механического уплотнения или встряхивания.

Объемная плотность СМ есть функция следующих переменных:

- объемной плотности частиц СМ;
- величины его частиц и соотношения различных фракций его ситового анализа;
- влажности частиц СМ;
- степени давления вышележащих слоев на нижние.

Для определения насыпной плотности порошком полностью заполняют мерный стакан вместимостью 25 см<sup>3</sup>. Избыточное количество порошка должно быть удалено одноразовым движением пластины из алюминия, повернутой ребром к верхнему торцу стакана. После этого для некоторого уплотнения порошка и предотвращения его рассыпания при взвешивании слегка ударяют пластинкой по стакану. Затем взвешивают стакан с порошком

на весах с погрешностью до 0,05 г. Испытание проводят три раза и берут среднее арифметическое из его результатов. Частное от деления массы порошка в стакане на его известный объем (25 см<sup>3</sup>) выражает насыпную плотность порошка:

$$\rho_{\text{нас}} = (m_2 - m_1) / V,$$

где  $m_2$ ;  $m_1$  – соответственно масса стакана пустого и наполненного, г;  $V$  – объем стакана, см<sup>3</sup>.

Плотность образца определена как отношение его массы к объему, значение которого было получено путем погружения образца в жидкость (воду).

Пористость без учета закрытых и открытых пор была рассчитана на основе измерения изменений геометрических размеров и массы образцов.

## 2.5 Методика СВЧ-активирования порошка алюминия

При СВЧ- активировании обеспечивали следующие параметры излучения: плотность мощности потока – 80 В/см<sup>2</sup>, длительность импульса 3 мкс, частота следования импульсов 400 Гц, несущая частота излучения 9,4 ГГц. Образцы подвергали действию излучения от 5 до 25с с шагом по времени 5с. Для изучения влияния СВЧ-излучения на нанопорошок алюминия в работе [9] был разработан стенд, представленный на рисунке 2.4.

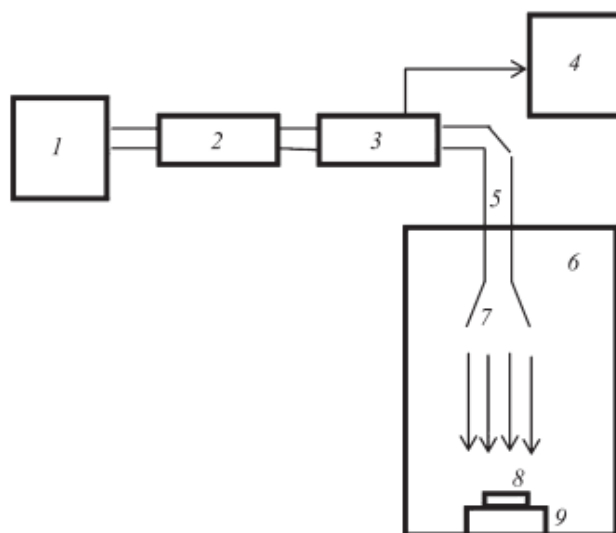


Рисунок 2.4 – Схема экспериментального стенда для изучения действия СВЧ-излучения на нанопорошок алюминия, где: 1 – магнетронный генератор; 2 – ферритовый вентиль; 3 – направленный ответвитель; 4 – осциллограф; 5 – волноводный тракт; 6 – безэховая камера; 7 – рупорная антенна; 8 – облучаемый порошок; 9 – диэлектрическая подложка из оксида алюминия [9]

Облучаемый порошок размещали в виде тонкого слоя (толщиной 2 мм) на диэлектрической подложке из оксида алюминия, являющегося «оптически прозрачным» для СВЧ-излучения на этих частотах.

В таблице 2.1 представлены результаты расчета по данным ДТА основных параметров химической активности нанопорошка алюминия после облучения СВЧ-излучением.

Таблица 2.1 – Параметры активности нанопорошка алюминия после СВЧ-облучения [9]

№	Время облучения, с	Энергия СВЧ-излучения, Дж	Температура начала окисления T, °C	Удельная энтальпия ΔH, Дж/г	Увеличение массы при нагревании до 1250 °C Δm, мас. %	Запасенная энергия, Дж/г
0	0	0	420	6750	53,7	0
1	5	12	390	9122	65,4	2372
2	10	24	370	8375	61,6	1625
3	15	36	400	7649	63,5	899
4	20	48	350	8268	62,2	1518
5	25	60	350	8037	65,2	1287

## 2.6 Методика приготовления и спекания образцов

Схема приготовления образцов для диффузионного спекания включала ряд стадий:

### 2.6.1 Твердофазное спекание

Для приготовления образцов были использованы навески смеси порошков  $\text{HfB}_2$  и Al. Образцы были изготовлены на основе неактивированного и активированного микропорошка алюминия АСД-6М. Информация об исходных материалах приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Информация об исходных материалах

$\text{HfB}_2$	ТУ № 6-09-03-418-76; форма частиц неправильная; средний размер частиц – 40 мкм.
Al	АСД-6М производства ООО «СУАЛ-ПИМ» (г. Шелехов): среднеповерхностный диаметр частиц порошка – 2,3 мкм, форма частиц близка к сферической. Порошок произведен с помощью распыления расплава алюминия в камере со специальной атмосферой [33,34]. Содержание алюминия в порошке – 86 мас. %.

Масса и состав используемых в работе навесок порошков алюминия приведены в табл. 2.3. Навески аналогичные по массе и составу использованы для создания образцов на основе неактивированного микропорошка алюминия, так же, как и на основе СВЧ-

активированного микропорошка алюминия.

Таблица 2.3. Состав смеси порошков HfB<sub>2</sub> и микропорошка Al для твердофазного спекания

№ п/п	HfB <sub>2</sub> содержание, мас. %	Al содержание, мас. %	Добавка микропорошка W содержание, мас. %	Масса смеси, г.
1	90	10	–	5,5
2	50	50	–	10,0
3	10	90	–	9,5
4	50	20	30	8,0

В образец под номером 4 был добавлен микропорошок вольфрама (W) с целью повысить экранирующие свойства образца в связи с тем, что W, являясь тяжёлым металлом, обладает хорошими экранирующими свойствами в сочетании с высокими механическими характеристиками и хорошей обрабатываемостью [35,36].

Навески образцов были изготовлены путем смешивания их на кальке пробкой, обернутой в кальку, до получения однородной окраски. Полученные навески были подвергнуты прессованию в гидравлическом прессе под давлением прессования 1,5 МПа. Спекание спрессованных образцов осуществляли в муфельной печи при температуре 550 °С в атмосфере с ограниченным доступом кислорода в течение 4 часов.

Рентгенофазовый анализ был выполнен с помощью дифрактометра «Дифрей-401» (излучение рентгеновской трубки  $F_{K\alpha}$ ,  $\lambda = 1,93 \text{ \AA}$ ).

### 2.6.2 Горячее прессование с предварительным жидкофазным спеканием

Для приготовления навесок были использованы порошки HfB<sub>2</sub> и Al (табл. 2.1), а также микропорошок алюминия. Аналогично твердофазному спеканию были использованы СВЧ – активированные и неактивированные порошки алюминия.

Масса и состав навесок смесей порошков приведены в таблице 2.4. Одинаковые составы и масса навесок были использованы для создания образцов как на основе СВЧ – активированных порошков Al, так и на основе неактивированных порошков.

Таблица 2.4. Состав смеси порошков HfB<sub>2</sub> и Al для горячего прессования с предварительным спеканием

№ п/п	HfB <sub>2</sub> содержание, мас. %	Al АСД-6М содержание, мас. %	Al микропорошок содержание, мас. %	Масса смеси, г.
1	90	10	–	20
2	80	20	–	20
3	90	–	10	20
4	80	–	20	20

Навески образцов были изготовлены по методике, описанной ранее (см. п. 2.6.1). Полученные навески были подвергнуты прессованию в гидравлическом прессе с давлением прессования 3 МПа. Образцы были подвергнуты предварительному спеканию, при температуре выше температуры плавления матрицы алюминия. Горячее прессование (ГП) производили в графитовой пресс-форме в атмосфере аргона. Горячее прессование в закрытых пресс-формах представляет собой процесс консолидирования порошковых материалов посредством одновременного приложения осевого давления и спекания порошкового тела. Метод горячего прессования эффективен для получения различных типов керамик, в том числе высокотемпературных [37]. Процесс горячего прессования осуществлялся по схеме одностороннего сжатия. Пресс-формы выполнены из графита высокой плотности. Прессование проведено в атмосфере аргона с величиной давления 1 атм при предварительной вакуумизации до 0,1 атм.

Спекание и горячее прессование образцов осуществляли в несколько этапов. Первый этап: жидкофазное спекание в вакуумной печи при температуре 700 °С, время выдержки 60 минут. Затем горячее прессование со следующим температурным режимом: нагрев линейно осуществлялся в течение 15 минут; выдержка в течении 20 минут при температуре ~850 °С; охлаждение в течение 15 минут до температуры около 400 °С; естественное охлаждение в течение 15 минут в рабочей камере. Параллельно выполнен режим прессования: спустя 5 минут после начала нагрева на образец прикладывается возрастающее давление; максимальное давление достигается с ростом температуры нагрева образца, и выдерживается в течение 20 минут; далее происходит снятие нагрузки в течение 5 минут.

Спеченные образцы имеют цилиндрическую форму с диаметром  $1,5 \pm 0,02$  мм. Плотность образцов определяли исходя из формулы:

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где  $m$  – масса цилиндрического образца,  $V$  – объем цилиндрического образца.

Рассчитывали также относительную плотность образцов  $\Theta$  в соответствии с выражением:

$$\theta = \frac{\rho}{\rho_T} \cdot 100 \%,$$

где  $\rho_T$  – теоретическая плотность керамики.

Поверхность образцов была шлифована и полирована с применением алмазных паст

с целью получения поверхностей, обладающих шероховатостью, допустимой для проведения последующего наноиндентирования.

### 2.6.3 Горячее прессование без предварительного спекания

Образцы, состав которых приведен в таблице 2.5, были подвергнуты горячему прессованию без предварительного спекания.

Таблица 2.5. Состав смеси порошков HfB<sub>2</sub> и Al для горячего прессования без предварительного спекания

№ п/п	HfB <sub>2</sub> содержание, мас. %	Al АСД-6М содержание, мас. %	Al нанопорошок содержание, мас. %	Масса смеси, г.
5	90	10	–	20
6	90	–	10	20

Навески образцов были изготовлены по методике, описанной ранее (см. п. 2.6.1). Полученные навески были подвергнуты прессованию в гидравлическом прессе с давлением прессования 3 МПа. Горячее прессование осуществлялось согласно методике, описанной в п. 2.6.2.

Спеченные образцы имели цилиндрическую форму с диаметром  $1,5 \pm 0,02$  мм. Метод измерения плотности образцов был также описан в п. 2.6.2.

### 2.7 Методика измерения твердости образцов

С целью измерения твердость образца было проведено индентирование. Индентирование осуществляли с помощью прибора Nano Indenter G 200. В качестве индентора использовали стандартную пирамиду Берковича, угол между высотой и апофемой пирамиды  $\alpha$  равен  $65,03^\circ$ , нагрузка при вдавливании составляла 500 мН (50 г). Первичные данные – нагрузка и глубина внедрения пирамиды. По диаграмме внедрения прибор автоматически рассчитывал модуль упругости  $E_{IT}$  и твердость  $H_{IT}$ .

По диаграмме определяются следующие величины: пиковая нагрузка и глубина внедрения индентора  $P_{max}$  и  $h_{max}$ , остаточная глубина после разгрузки  $h_f$ , и наклон начальной части кривой разгрузки  $S = dP/dh$ , который характеризует упругую жесткость контакта.

Экспериментальная первичная кривая «нагрузка – внедрение» (диаграмма внедрения), непрерывно получаемая в процессе индентирования, показана на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Кривая «нагрузка – внедрение», получаемая в процессе индентирования

В ходе индентирования рассчитывается два вида твердости  $H_{IT}$  и  $H_M$ . Различие значений твердости  $H_{IT}$  и  $H_{Ms}$  (по Мартенсу) обусловлено разницей их расчета. При подсчете  $H_{IT}$  нагрузка относилась к проекции отпечатка (треугольник), при определении  $H_{Ms}$  – к площади самого отпечатка от трехгранной пирамиды Берковича. Поэтому значения  $H_{Ms}$  сравнимы со значениями твердости по Виккерсу  $HV$ .

## 2.8 Спектры излучения горящих образцов нанопорошков алюминия

Схема эксперимента показана на рис. 2.6. Образец нанопорошка алюминия размером  $20 \times 7 \times 3$  мм<sup>3</sup> и массой  $\sim 3$  г размещали на алюминиевой подложке, которую помещали на платформу. Соосно с образцом на расстоянии 5 см располагали стандартное устройство ввода излучения в световод, излучение с помощью которого передавалось в спектрометр. Чувствительный элемент спектрометра Avantes AvaSpec-ULS2048-USB2 представляет собой ПЗС-линейку, работающую в спектральном диапазоне 200-1100 нм, и позволяет регистрировать спектры с частотой 20 отсчетов в секунду.

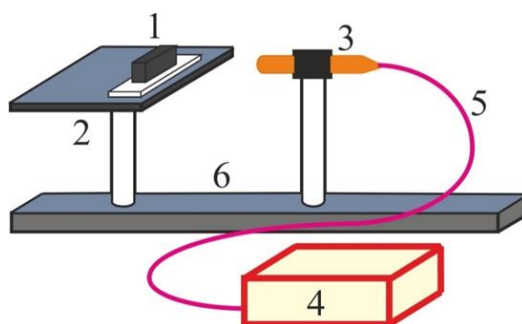


Рисунок 2.6 – Схема установки по измерению спектра излучения при горении нанопорошков: 1 – образец нанопорошка; 2 – столик; 3 – оптическая система для ввода излучения в оптоволокно; 4 – спектрометр; 5 – оптоволокно; 6 – оптический рельс.



## 2.9 Методика измерения поглощающей способности нейтронов и $\gamma$ -излучения

Механизмы регистрации нейтронов в образцах основаны на косвенных методах в связи с тем, что нейтрон, являясь незаряженной частицей, не создаёт ионизацию среды при движении, а возникает она, как вторичный процесс взаимодействия нейтронов с ядрами вещества среды. Регистрация нейтронов начинается при образовании одной или нескольких заряженных частиц в результате взаимодействия нейтронов с ядрами атомов. Электрические сигналы, образованные заряженными частицами, обрабатываются детектирующей системой.

Существуют два основных типа взаимодействия нейтронов с ядрами атомов вещества. Первый тип – взаимодействие с рассеянием нейтрона на ядре атома и передачей ядру части кинетической энергии нейтрона. Такое взаимодействие возможно только для легких ядер (водорода, гелия). Второй тип – взаимодействие с ядерной реакцией, где детектором регистрируются продукты такой реакции: протоны, фотоны, альфа-частицы, гамма-излучение и т.д.

Детекторы могут иметь твердое, жидкое или газообразное наполнение. Последние широко используются в практике регистрации нейтронов. По конструктивному исполнению детекторы представляют собой цилиндры из нержавеющей стали или алюминия с толщиной стенки 0,5 мм. Центральная нить детектора изготавливают из позолоченного вольфрама, что обеспечивает ее прочность на растяжение и хорошую электропроводность, толщина нити 0,03 мм. На рисунке 2.7 представлено изображение газонаполненного детектора [38,39].



Рисунок 2.7 – Газонаполненный детектор нейтронов [38]

Детекторы могут быть заполнены различными газами под давлением от 1 до 20 атм.:  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $\text{BF}_3$  или  $\text{CH}_4$ .

Для определения коэффициента ослабления мощности нейтронного и гамма-излучения материалом используется «мокрый» канал водно-водяного реактора. Методика измерения

ния поглощающей способности гамма-излучения описана в работах [40,41], где для облучения использовались две ячейки активной зоны реактора, а в качестве источников ионизирующего излучения использовались активационные детекторы. Между источником излучения и регистрирующим прибором (дозиметром) устанавливается защитный материал. Проводятся замеры фонового значения мощности дозы, мощность дозы источника излучения, мощность дозы излучения источника, закрытого защитным материалом.

## 2.10 Структурно – методологическая схема

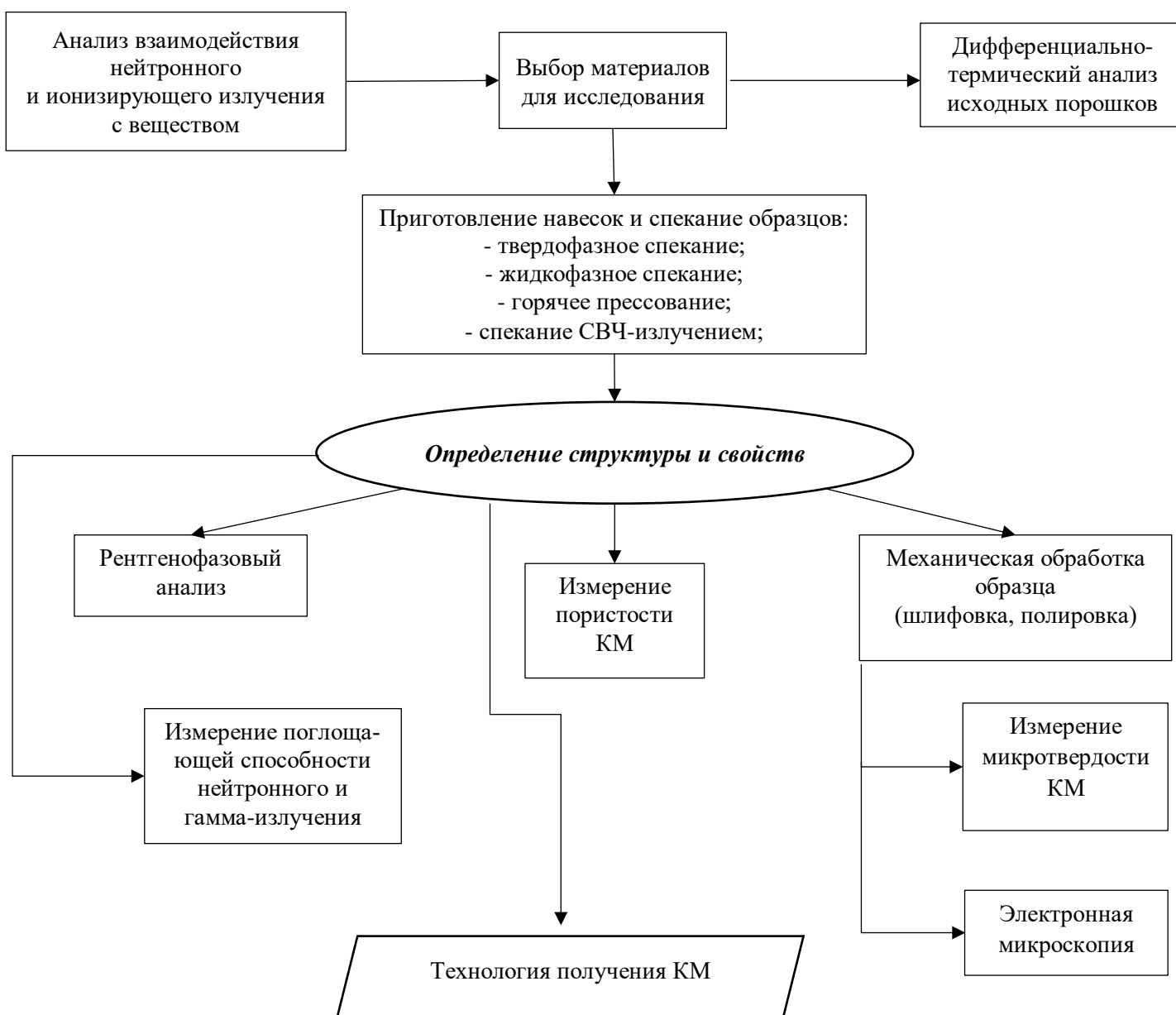


Рисунок 2.8 – Структурно-методологическая схема исследования

Выполнение работы проводилось согласно разработанной структурно-методологической схеме (рис 2.8). Согласно схеме, начальной стадией исследования являлся анализ взаимодействия нейтронного и ионизирующего излучения с веществом, в результате которого было принято решение о компонентном составе материала, на основании того, что диборид гафния обладает высоким сечением захвата нейтронов и рассеивающих свойств ядра бора, а алюминий обладает низкой индуцированной радиоактивностью.

Следующим этапом было проведение ДТА анализа исходных порошков, информация, полученная в результате проведения анализа, определила термическую устойчивость изготавливаемого материала. Дальнейший ход работы предполагал изготовление навесок порошков и их последующие спекание представленными методами (рис. 2.5). В начале был опробован метод твердофазного спекания при температуре ниже температуры плавления алюминия.

Была определена структура и свойства спеченного материала. Исследование структуры и свойств проводили параллельно. На основании полученных данных был определен предпочтительный метод изготовления и его параметры и разработана технологическая схема получения защитного материала.

### ГЛАВА 3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

К поисковым результатам отнесены исследования образцов, полученных в условиях диффузионного спекания. Фотографии полученных спеченных образцов представлены на рисунке 3.1. На фотографиях видно, что образцы, изготовленные на основе неактивированного алюминия, имеют трещины и сколы, их вид является неудовлетворительным. Образцы, изготовленные на основе СВЧ-активированного алюминия, сохранили форму и механическую прочность после спекания.

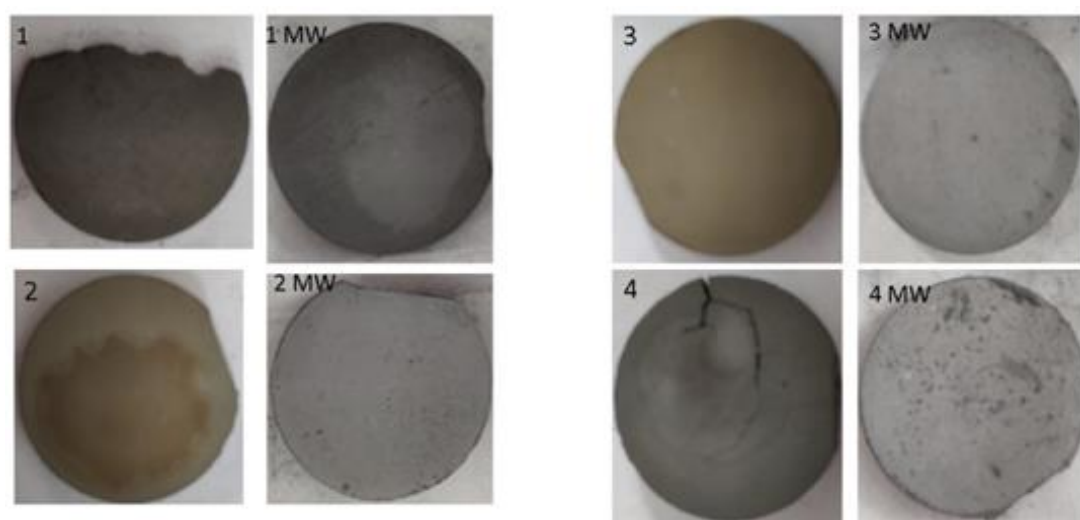


Рисунок 3.1 – Фотографии образцов: 1,2,3,4 - образцы соответствующего состава на основе исходного порошка алюминия и 1 MW (microwave), 2 MW (microwave), 3 MW (microwave), 4 MW (microwave) - образцы соответствующего состава на основе СВЧ-активированного алюминия

Согласно полученным результатам, фазовый состав спеченных образцов соответствует концепции аддитивности. Результаты РФА приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1. Фазовый состав (по данным РФА) спеченных образцов материала на основе HfB<sub>2</sub> и необлученного алюминия

№ п/п	Содержание HfB <sub>2</sub> , отн. %	Содержание Al, отн. %	Содержание продуктов спекания, отн. %
1	96	4	0
2	71	29	0
3	11	89	0
4	84	12	4 (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )

Таблица 3.2. Фазовый состав (по данным РФА) спеченных образцов материала на основе HfB<sub>2</sub> и облученного алюминия

№ п/п	Содержание HfB <sub>2</sub> , отн. %	Содержание Al, отн. %	Содержание продуктов спекания, отн. %
1	97	3	0
2	75	25	0
3	48	52	0
4	68	13	18 (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )

На поверхности образца обнаружен бор, окисленный до B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Но Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на поверхности как продукт окисления Al не был обнаружен.

Имеются значимые отличия в результатах РФА для образцов под номерами 3 и 4 (таблица 3.1 и 3.2).

В первом случае, для образца 3, это может быть объяснено несовершенством однородности структуры, когда большая часть алюминия оказалась в поверхностном слое образца. Для образца 4 различие в содержании продуктов спекания связано с возможностью окисления добавки (нанопорошка W) при наличии повреждения образца, отмеченного для образцов с необлученным алюминием (имеется скол и трещина в объеме образца) [16].

Была определена кажущаяся плотность образцов без учета закрытых и открытых пор. Кажущаяся плотность исходных образцов на основе Al приведена в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Кажущаяся плотность образцов HfB<sub>2</sub> и исходного порошка Al

Характеристика	№ п/п (tab. 2)			
	1	2	3	4
Плотность ρ, г/см <sup>3</sup>	1.97	2.05	2.36	2.79
Усадка, %	-0.41	-0.23	-0.50	-3.95

Для образцов на основе Al, активированных СВЧ – излучением, кажущаяся плотность приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Кажущаяся плотность образцов HfB<sub>2</sub> и СВЧ–активированного порошка Al

Характеристика	№ п/п (tab. 2)			
	1	2	3	4
Плотность ρ, г/см <sup>3</sup>	3.98	1.94	1.97	3.14
Усадка, %	-0.31	-0.35	-0.35	-0.31

Наблюдается высокая пористость и отрицательная усадка (разбухание) всех образцов, что указывает на процессы окисления. В то же время, сравнивая полученные данные, можно отметить, что структура образцов на основе Al, активированного СВЧ – излучением, более стабильна.

На рис.3.2 показаны снимки, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

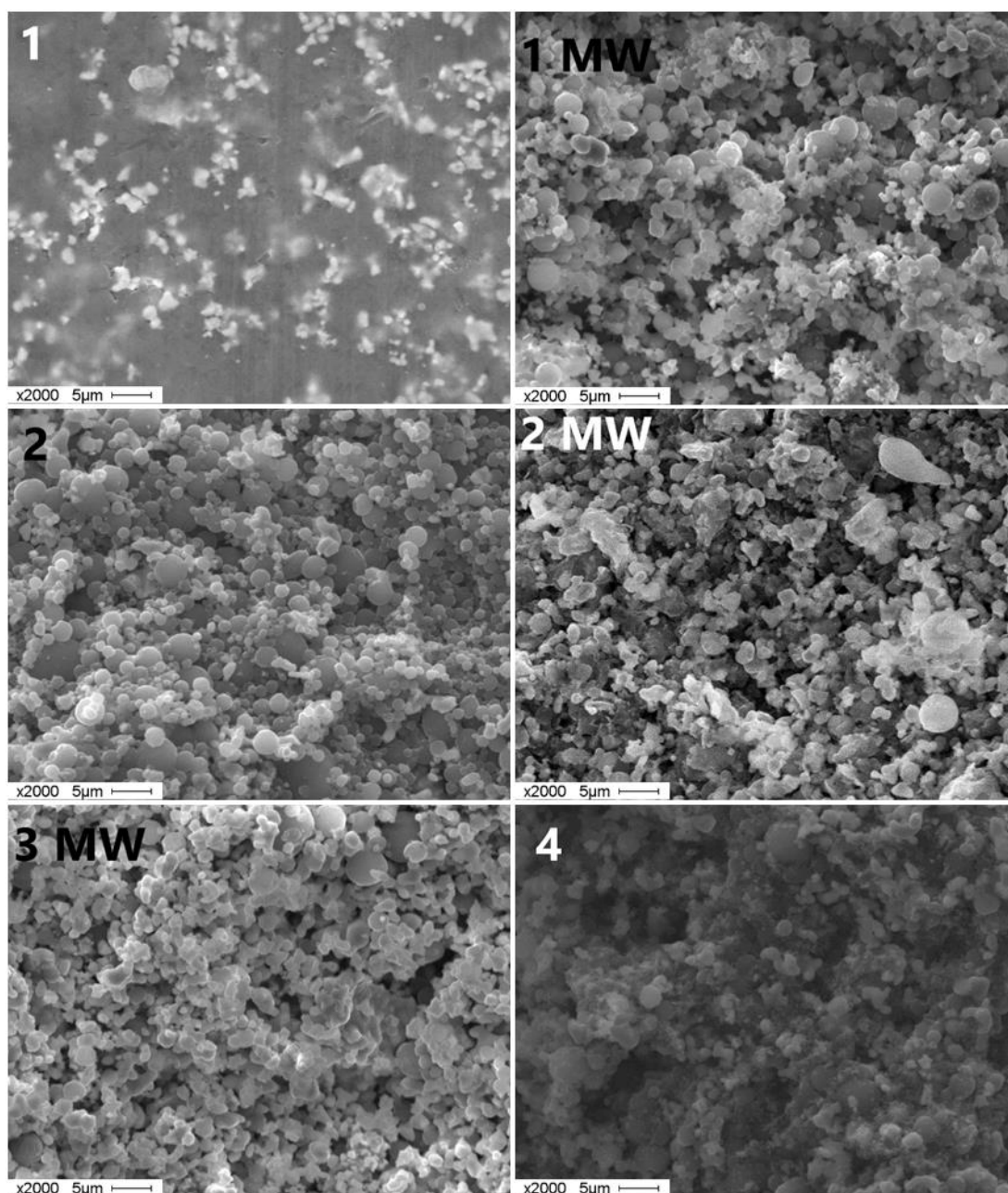


Рисунок 3.2. Фотографии образцов, полученных с помощью диффузионного спекания: 1,2,4 – фотографии образцов на основе исходного порошка алюминия соответственно; и 1 MW (microwave), 2 MW (microwave), 3 MW (microwave) – фотографии образцов на основе порошка алюминия, активированного СВЧ – излучением, соответственно

На фото 1 (рис. 3.2) наблюдаются частицы сферической формы со средним размером 2,1 мкм, в то время как на фото 1 MW конкретной геометрической формы не наблюдается, а размер частиц составляет около 2,5 мкм. Области более высокой освещенности представляют собой частицы диборида гафния, характеризующиеся более высокой плотностью и занимающие около 11 % объема на фотографии 1 и около 28 % на фотографии 1 MW. Фрагменты объединены в агломераты, что указывает на частичное спекание. Согласно микроанализу, в образце 1 есть атомы алюминия при их массовом соотношении 74,01 %, и атомы гафния в массовом соотношении 25,99 %. В образце 1 MW присутствуют атомы алюминия при их массовом соотношении 79,47 %, и атомы гафния в массовом соотношении 20,53 %. Атомы бора не были обнаружены, так как его содержание в образце ниже предела чувствительности дифрактометра. Для образцов 2 и 2 MW средний размер агломератов составляет 2,1 и 2,6 мкм, соответственно. Массовое соотношение алюминия и гафния в образце 2 составляет 61,92 % и 38,02 %, соответственно. Для образца 2 MW составляет 67,05 % и 32,95 %. Атомы бора также не обнаружены. В образце 3 MW средний размер агломератов составляет 2,5 мкм, массовая доля алюминия составляет 28,40 %, массовая доля гафния составляет 71,61 %. Содержание вольфрама определено как 26,11 мас. % в образце 4, содержание гафния составляет 40,84 мас. %. Полученные изображения определяют структуру образцов как пористые.

В соответствии с дополнительно проведенными экспериментами с помощью спектрометра Avantes AvaSpec-ULS2048-USB2 были записаны спектры излучения горящих образцов нанопорошков алюминия. Спектры эмиссии горящих нанопорошков представлены на рис. 5 для исходного нанопорошка алюминия и нанопорошка алюминия, облученного СВЧ и гамма-излучением.

Разностный спектр [1,2] горения СВЧ – активированного и исходного нанопорошков алюминия приведен на рис. 3.3 (спектр 5). Облученный гамма-излучением нанопорошок алюминия имеет дополнительную полосу испускания в диапазоне 600–950 нм (разностные спектры 6 и 7), что существенно улучшает характеристики горения такого порошка алюминия по сравнению с необлученными порошками [2,44].

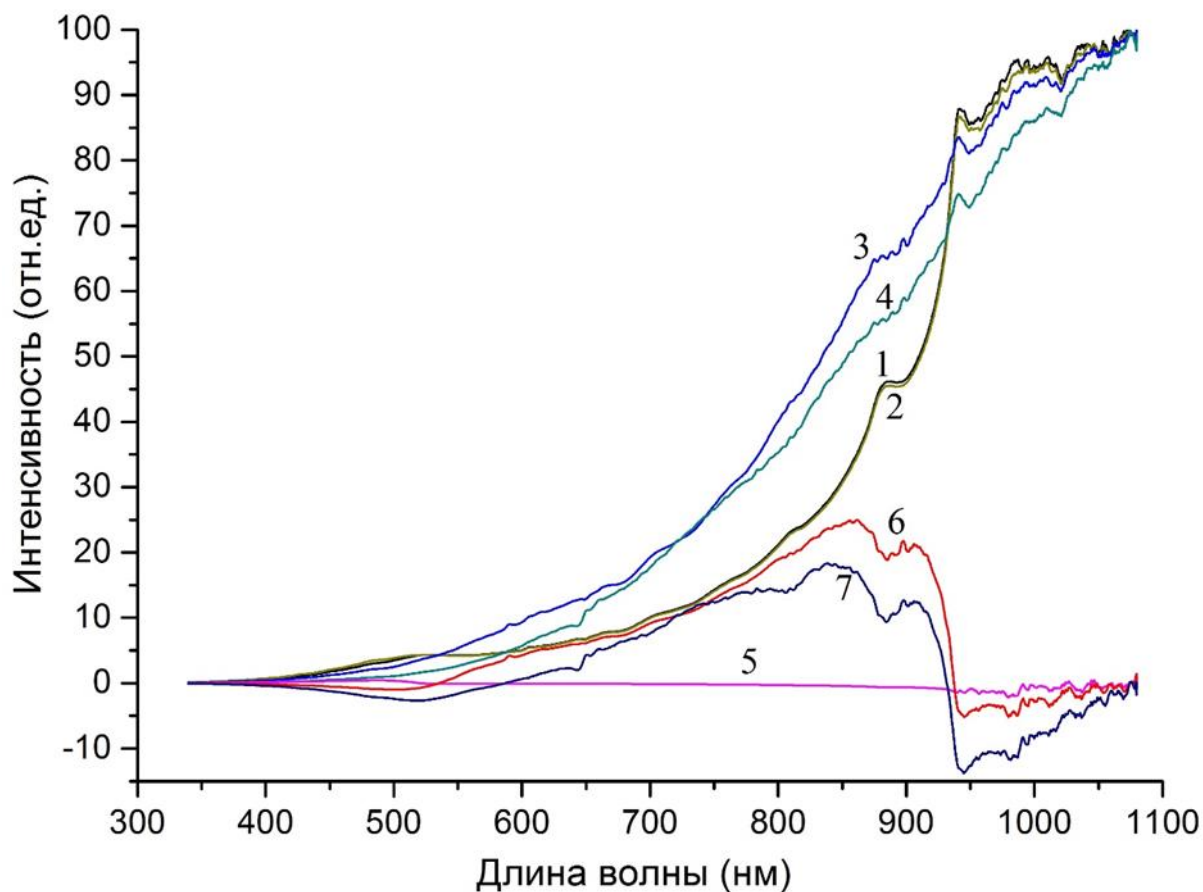


Рисунок 3.3 – Спектры эмиссии излучения горящих алюминиевых порошков: 1 - исходный нанопорошок алюминия; 2 – СВЧ-активированный алюминиевый порошок; 3 – порошок, облученный  $\gamma$ -излучением 4 МэВ (доза 31 рентген); 4 – нанопорошок, облученный  $\gamma$ -излучением 7 МэВ (доза 100 рентген); Разностные спектры: 5 - нанопорошок алюминия, активированный СВЧ-излучением, и исходный нанопорошок алюминия; 6 - облученный  $\gamma$ -излучением (доза 31 рентген) нанопорошок алюминия и исходный нанопорошок алюминия; 7 - облученный  $\gamma$ -излучением (доза 100 рентген) нанопорошок алюминия и исходный нанопорошок алюминия

## Выводы

1. В данной главе был использован метод диффузионного спекания для получения металлокерамического материала с алюминиевой матрицей. Свойства полученных образцов не соответствуют требуемым прочностным свойствам материала. Тем не менее, следует отметить, что образцы на основе алюминия, активированные СВЧ – излучением, имеют в целом лучшие характеристики.

2. Для получения материала на основе  $\text{HfB}_2$  и  $\text{Al}$  с улучшенными характеристиками необходимы более жесткие условия спекания: повышенная температура и давление.



3. Из-за недостаточной твердости полученных компактных образцов метод спекания рекомендован для изготовления наполнителя, используемого для заполнения пустотелых защитных перегородок.

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4БМ8И	Белякович Светлана Александровна

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Материаловедение</b>
<b>Уровень образования</b>	<b>Магистратура</b>	<b>Направление/специальность</b>	<b>Материаловедение и технологии материалов</b>

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Бюджет проекта не более 30 тыс. рублей; Задействованные лица: научный руководитель проекта, инженер-исследователь.</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов»:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• анализ условий расхода и потребления материалов;</li> <li>• нормирование расхода материалов в соответствии с исследовательским обоснованием;</li> </ul> <i>По уровню технологических отходов проект относится к малоотходной категории (1,5–10 %).</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления по страховым взносам – 30 % от ФОТ.</i>

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

<i>1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Оценка коммерческого потенциала проекта с анализом потенциальных потребителей.</i>
<i>2. Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Составление матрицы SWOT проекта с выявлением сильных и слабых сторон</i>
<i>3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Разработка календарного плана реализации этапов проекта с разделением обязанностей исполнителей. Расчет общего бюджета проекта, в т. ч. расходы на материалы, оборудование, электроэнергию и прочие расходы.</i>
<i>4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проекта.</i>

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

- 1. Структура работ с распределением обязанностей;*
- 2. Матрица SWOT;*
- 3. Диаграмма Ганта;*
- 4. Смета затрат на НИР.*

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Л.Ю.	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ8И	Белякович С.А.		

## **ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Настоящая работа направлена на проектирование материала с оптимальным составом для максимального поглощения ионизирующего излучения. Объектом являются термические и радиационные характеристики диборида гафния в матрице алюминия в зависимости от содержания диборида гафния, а также фазовый состав и структура композиционного материала:  $\text{HfB}_2\text{--Al}$ . Предметом исследования в настоящей работе является порошкообразный диборид гафния и материал на основе диборида гафния в матрице алюминия.

Настоящая научно-исследовательская работа является:

- по источникам финансирования - госбюджетная;
- по характеру получаемых результатов - поисковая.

### **5.1 Оценка коммерческого потенциала исследования**

В качестве потенциальных потребителей результатов настоящего исследования могут выступать как гражданская сфера, так и военная. Основным потребителем среди гражданской отрасли является ядерная медицина: транспортировка и перевозка радиофармацевтических (радионуклидных) препаратов для диагностики и лечения онкологических заболеваний. Актуальность исследования обусловлена существующей необходимостью создания новых материалов для защиты персонала от ионизирующего излучения и нейтронного излучения, что связано с развитием и увеличением масштабов использования ядерных технологий. Применение изотопов и излучений в медицине, как диагностического, так и терапевтического назначения требует защиты персонала.

Единственным аналогом настоящего проекта являются свинцовые перегородки и кейсы. Несмотря на то, что закупочная стоимость порошка свинца ниже закупочной стоимости порошков данного проекта (средняя стоимость порошка свинца 800 руб./кг.), использование в настоящее время свинцовых контейнеров не эффективно: плотность свинца составляет  $11,3 \text{ г/см}^3$  (плотность материала настоящего проекта в зависимости от процентного состава варьируется от  $3,48 \text{ г/см}^3$  до  $4,26 \text{ г/см}^3$ ), и вес контейнера существенно повышает цену перевозки изотопа, особенно, авиатранспортом. Различные сферы применения диктуют необходимость в изготовлении средств для хранения и транспортирования радионуклидов. Важным критерием создания и дальнейшей реализации радиоактивных изотопов для их транспортирования являются низкие массогабаритные характеристики получаемых

конечных изделий. Выбор диборида гафния в качестве защитного вещества обусловлен следующими характеристиками: гафний имеет высокое значение сечения захвата нейтронов, равное 115 Барн, легкое ядро бора хорошо рассеивает также нейтроны. В то же время гафний является тяжелым элементом ( $Z=72$ ) и его ядра хорошо ослабляют  $\gamma$ -излучение. Алюминий легкий и легкоплавкий металл (660 °С) предлагается использовать в качестве металла связки в разрабатываемом материале. Помимо этого, материал для изготовления кейсов переноски может использоваться для транспортировки любых нестабильных изотопов с радиоактивными свойствами.

Для оценки эффективности научного проекта проведен анализ конкурентных решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Оценочная карта для научного проекта (н. п.) и аналога из свинца (свинц.) приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Оценочная карта

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б н.п.	Б свинц.	К н.п.	К свинц.
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,11	5	2	0,55	0,22
2. Удобство эксплуатации	0,05	5	2	0,25	0,10
3. Надежность	0,05	4	4	0,20	0,20
4. Экологическая безопасность	0,07	4	1	0,28	0,07
5. Простота эксплуатации	0,05	5	4	0,25	0,20
6. Массо-габаритные характеристики	0,11	5	1	0,55	0,11
7. Простота изготовления	0,07	3	3	0,21	0,21
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>					
1. Конкурентоспособность продукта	0,11	4	2	0,44	0,22
2. Уровень проникновения на рынок	0,06	4	5	0,24	0,30
3. Цена	0,06	4	3	0,24	0,18
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,04	5	5	0,20	0,20
5. Послепродажное обслуживание	0,04	5	5	0,20	0,20
6. Финансирование научной разработки	0,08	4	4	0,32	0,32
7. Срок выхода на рынок	0,05	3	5	0,15	0,25
8. Наличие сертификации разработки	0,05	4	5	0,20	0,25
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>1,99</b>	<b>1,92</b>

Исходя из данных, представленных в таблице 5.1, можно выявить основные уязвимости и слабые стороны проекта-конкурента, а именно:

1. Материал свинцовых кейсов обладает большей плотностью, что сказывается на значительном повышении цены доставки не только самого кейса до потребителя, но и на цене дальнейших перевозок радиофармацевтических препаратов. Эти факты приводят к понижению производительности труда пользователя и, как следствие, повышает цену на его услуги и продукты. Факт большого веса контейнера также снижает удобство эксплуатации оборудования.

2. Свинец негативно воздействует на здоровье обслуживающего персонала, что создает дополнительные трудности при его эксплуатации. К тому же, экологически чистая утилизация этого материала в настоящий момент крайне трудоемка и многозатратна.

Перечисленные выше факторы значительно снижают конкурентоспособность аналога проекта, несмотря на возможно более низкую стоимость таких кейсов. Настоящий проект разработан с учетом недостатков аналога: конечное изделие обладает сравнительно низкой массой, не нуждается в сложной переработки, не имеет негативного воздействия на здоровье персонала. Эти ключевые черты продукта позволят занять ему большую долю рынка транспортировки радионуклидов.

## 5.2 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На данной стадии научного проекта существует необходимость оценки степени ее готовности к коммерциализации. Бланк оценки степени готовности проекта к коммерциализации приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Бланк оценки степени готовности проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	5	5
3	Определены отрасли и технологии для предложения на рынке	5	5
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынке	4	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	4	4

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	4	4
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	4	4
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	4	4
10	Разработана стратегия реализации научной разработки	4	4
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	4	4
12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	4	4
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	4	4
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	4
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
<b>Итого</b>		<b>63</b>	<b>63</b>

Итоговое число баллов входит в диапазон от 75 до 60, что означает, что проект является перспективным, а знаний разработчиков достаточно для коммерциализации. В связи с этим, можно говорить о привлекательности проекта для инвестирования.

Для успешного выхода на рынок возможно привлечения в команду разработчиков маркетолога, для более детальной проработки вопросов международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок, а также получения услуг инфраструктуры и привлечения дополнительных инвестиций.

### 5.3 Разделение выпускной квалификационной работы на этапы

Для рационального планирования, расчета финансовой части работы и определения ее трудоемкости ВКР была разбита на этапы. ВКР имеет:

1. Подготовительный этап. Включает сбор информации, изучение, анализ полученных сведений. Определение состава руководителей и исполнителей, согласование календарного плана работ.
2. Разработка теоретической части. Формулирование цели работы, направлений исследования, подбор материалов, выбор методов.

3. Экспериментальный этап. Проведение экспериментальных работ согласно теоретическим разделам.

4. Испытания. Испытания и анализ свойств полученных образцов.

5. Корректировка в методы разработки и испытаний.

6. Подведение итогов, обобщение результатов.

7. Завершающий этап. Рассмотрение итогов работы на научно-техническом совете.

Подготовка отчетной документации.

Работу выполняли 2 сотрудника: научный руководитель (науч. рук.) и инженер-дипломник (инж.), перечень работ приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы работы	№ работ	Содержание работ	Исполнитель
Выдача задания	1	Выбор темы ВКР	науч. рук.
Подготовительный этап	2	Поиск и изучение теоретических материалов	науч. рук. инж.
	3	Выбор направления исследования	науч. рук.
	4	Календарное планирование работ	науч. рук.
Разработка теоретической части	5	Формулирование цели работы, направлений исследования, подбор материалов, выбор методов.	науч. рук. инж.
Экспериментальный этап	6	Подготовка навесок порошков	инж.
	7	Прессование порошков	инж.
	8	Спекание порошков	инж.
Испытания	9	Испытания физико-механических свойств	инж.
Корректировка в методы разработки и испытаний	10	Обработка данных	инж.
Подведение итогов, обобщение результатов	11	Научное обоснование результатов	науч. рук. инж.
Завершающий этап	12	Оформление отчетной документации	инж.



## 5.4 SWOT-анализ

SWOT (Strengths – Сильные стороны, Weakness – Слабые стороны, Opportunities – Возможности, Threats – Угрозы) – комплексный анализ исследования внешней и внутренней среды научно- исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Матрица SWOT-анализа приведена в таблице 5.4.

Таблица 5.4. – Матрица SWOT

	<p><b>Сильные стороны:</b>  С1. Актуальность разработки;  С2.Перспективность исследования свойств металлокерамики;  С3.Ресурсоэффективность полученной методики;  С4.Невысокие массо-габаритные характеристики изделий;  С5.Экологическая безопасность полученной методики;  С6.Высокий уровень квалификации руководителя и консультантов проекта</p>	<p><b>Слабые стороны:</b>  Сл1.Отсутствие прототипа научной разработки;  Сл2.Многостадийность методики;  Сл3.Ограниченное время разработки проекта;</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1. Использование во многих отраслях;  В2. Выход на зарубежный рынок;  В3. Малое количество аналогов разработки.  В4. Имеется тенденция к развитию ядерной медицины.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Тенденция к развитию ядерной медицины делает актуальность разработки еще более значимой.</li> <li>- Сфера применения продукта не ограничивается одной областью.</li> <li>- Ресурсоэффективность разработки на фоне малого числа конкурентов делает разработку более привлекательной для потребителя.</li> <li>- В настоящем проекте устранен основной недостаток конкурентного продукта.</li> <li>- Экологическая безопасность упрощает выход на зарубежный рынок.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Малое число аналогов позволяет с легкостью преодолевать конкуренцию другого продукта.</li> <li>-Заинтересованность различных отраслей в продукте оправдывает многостадийность и сложность его изготовления.</li> <li>- Заинтересованность потребителей и возможность выхода на зарубежный рынок позволяет финансировать дальнейшую оптимизацию проекта и методики, несмотря на ограниченное время разработки проекта.</li> </ul>
<p><b>Угрозы:</b>  У1. Возможность возникновения аналогов;  У2. Ограничение в использовании наноматериалов;  У3. Возможный запрет на использование радионуклидов в медицине.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Имеется необходимость в постоянной оптимизации состава и методики изготовления материала для поддержания конкуренции с возможными аналогами.</li> <li>-Стоит уделить большее внимание процессу утилизации продукта и получения сертификатов безопасности использования наноматериалов.</li> <li>-Расширение рынка сбыта и круга потребителей поможет минимизировать потери при запрете радионуклидов в медицине.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Необходимо упростить методику изготовления продукта.</li> <li>- Необходимо создать несколько вариаций продукта с различным составом для различных областей, где прототипом служит оригинальный проект.</li> </ul>

На основании SWOT-анализа следующие сильные стороны проекта:

1. В связи с развитием ядерной промышленности и, в частности, ядерной медицины существует необходимость транспортирования продуктов реализации, с чем и связана актуальность проекта. Помимо этого, в мировой промышленности замечен большой всплеск интереса к свойствам и возможностям применения металлокерамических композиционных материалов. Данный факт может означать, что настоящий проект способен заинтересовать большее число потребителей, нежели только одну сферу ядерной медицины.

2. Бюджет данного проекта не превосходит 30 тыс. рублей, а в дальнейшем, при возможной автоматизации производства имеется тенденция к снижению затрат. Это говорит об успешно подобранной оптимальной методике изготовления продукта.

3. И все же, основной сильной стороной проекта является устранение основных недостатков, имеющих у проекта-аналога. В настоящем проекте удалость снизить массогабаритные характеристики изделия за счет снижения плотности материала. А также полностью устранить негативное воздействие испарений свинца на здоровье обслуживающего персонала. Представленный проект является полностью экологически безопасным.

Тем не менее, настоящий научный проект имеет и несколько слабых сторон:

1. На длительность и трудоемкость разработки проекта сказалось отсутствие металлокерамического прототипа подобного изделия. В связи с чем разработчикам пришлось в первые столкнуться с вопросами оптимизации компонентного состава исходных материалов.

2. В связи с отсутствием прототипа металло-керамического изделия разработчики столкнулись с необходимостью создания совершенно новой методики изготовления продукта. Разработанная методика является уникальной и многостадийной, что значительно усложняет ее применение в промышленном масштабе.

На территории г. Томск имеются несколько предприятий, способных реализовать данный проект в промышленном масштабе, и возможно в нем заинтересованных:

1. ГК «СИГМА.инновации» осуществляет проекты, в том числе связанные с нанотехнологиями, в следующих областях: новые материалы, электроника и ИТ, приборостроение, биотехнологии и фармакология и т.д.

2. ООО «НИОСТ» осуществляет проекты, направленные на получение высокоэффективных катализаторов различных модификаций для производства полимеров и мономеров; получение новых мономеров и процессинговых добавок (модификаторы, пластификаторы, компатибилизаторы, стабилизаторы, антиоксиданты); полимеризация и получение востребованных продуктов нефтехимии; разработка новых композиционных материалов; идентификация и контроль качества полимерных компаундов.

Угрозы предприятий, приведенные в матрице SWOT с учетом влияния внутренней среды (сильных и слабых сторон) можно минимизировать.

Для успешной реализации и долгой жизни продукта на рынке необходим постоянный поток вложений на дальнейшую оптимизации состава и методики. Разработчикам видится вариант создания большего количества компонентных составов материала для различных сфера применения, что позволит значительно расширить потребительский круг и минимизировать потери при возможном запрете рынка радиофармацевтических препаратов. Упрощение методики изготовления позволит успешнее реализовать производство и в будущем снизить себестоимость продукта.

В настоящее время мировая общественность и производители особое внимание уделяют сфере экологической безопасности продукта и утилизации изделий. Поэтому для выхода как на зарубежный рынок, так и на рынок нашей страны необходимо получить сертификаты экологической безопасности, что сделает продукт еще более конкурентоспособным.

Предприятие, в свою очередь, получает малоотходный проект с небольшим бюджетом и большой сферой реализации как на территории РФ, так и зарубежом.

### **5.5 Определение трудоемкости этапов выпускной квалификационной работы**

В связи с тем, что разработка настоящего проекта проводится впервые и утвержденные нормативы отсутствуют, то согласно ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» трудоемкость отдельных этапов может быть рассчитана опытно-статическим путем. Указанный метод может быть реализован двумя способами:

1. Путем анализа, когда необходимые трудовые запасы определяются по работам, проведенным данным коллективом ранее.

2. Вероятным методом.

При первом способе опытно-статистического метода используют отчетные данные фактической трудоемкости работ, осуществляемых ранее. В отсутствии аналогичных работ определяют вероятным методом непосредственно их продолжительность на основе системы оценок. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$ , используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5},$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{min i}$ , – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.;

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{ч_i};$$

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

$t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

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

Для наглядности представления данных используют ленточный график проведения научных работ в форме диаграммы Ганта. Диаграмма Ганта представляет собой горизонтальный ленточный график, на котором работы представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

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

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

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

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

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}};$$

где  $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{366}{366 - 300} = 1,22.$$

Временные показатели проведения данного научного исследования представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5. – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работы						Исполнители		T <sub>pi</sub> , дни		T <sub>ki</sub> , дни	
	t <sub>min i</sub> , чел-дни		t <sub>max i</sub> , чел-дни		t <sub>ож i</sub> , чел-дни		науч. рук.	инж.	науч. рук.	инж.	науч. рук.	инж.
	науч. рук.	инж.	науч. рук.	инж.	науч. рук.	инж.						
1. Выбор темы ВКР	7	-	15	-	11	-	+	-	11	-	14	-
2. Подбор и изучение материалов	20	20	30	30	24	24	+	+	12	12	15	15
3. Выбор направления исследования	7	-	15	-	11	-	+	-	11	-	14	-
4. Календарное планирование	7	-	15	-	11	-	+	-	11	-	14	-
5. Подготовка порошков	-	3	-	10	-	6	-	+	-	6	-	8
6. Прессование порошков	-	2	-	8	-	5	-	+	-	5	-	7
7. Спекание порошков	-	2	-	8	-	5	-	+	-	5	-	7
8. Испытания физ.-мех. свойств	-	10	-	20	-	14	-	+	-	14	-	17
9. Корректировка метода	10	10	20	20	14	14	+	+	7	7	9	9
10. Обоснование итогов	7	7	10	10	9	9	+	+	5	5	7	7
11. Оформление отчета	-	10	-	15	-	12	-	+	-	12	-	15
12. Защита ВКР							-	+	-	1	-	1

На основе данных таблицы 5.5, а также расчетов по формулам, представленным выше, была построена диаграмма Ганта. Диаграмма приведена на рисунке 5.1.

№ работ	Исполнители	$T_{ki}$ , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ														
			январь			февраль			март			апрель			май		
			2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	науч.рук	14	■	■													
2	науч.рук инж.	15		■	■	■	■										
3	науч.рук	14		■	■	■	■										
4	науч.рук	14				■	■	■									
5	инж.	8						■	■								
6	инж.	7							■	■							
7	инж.	7								■	■						
8	инж.	17									■	■	■				
9	науч.рук инж.	9										■	■				
10	науч.рук инж.	7											■	■			
11	инж.	15												■	■	■	
12	инж.	1															■

Рисунок 5.1 – Диаграмма Ганта

## 5.6 Составление сметы затрат

Настоящая работа направлена на проектирование материала с оптимальным составом для максимального поглощения ионизирующего излучения. Проводилось спекание образцов в муфельной печи. Для исследования было взято 100 грамм микропорошка алюминия АСД-6М, 50 грамм нанодисперсного порошка алюминия, 100 грамм нанодисперсного порошка диборида гафния, 5 грамм нанодисперсного порошка вольфрама.

Задачами настоящего исследования являлись: анализ литературы; исследование влияния активированного спекания на физические и механические свойства материала.

Смета затрат будет составлена по следующим статьям:

1. Амортизация оборудования;
2. Основные и вспомогательные материалы;
3. Электроэнергия;
4. Накладные расходы.

### 5.6.1 Затраты на амортизацию оборудования

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$Z_{об} = (Ц \cdot F_{ф}) / (F_{н} \cdot F_{сс}),$$

где Ц – цена оборудования, р.;

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

$F_{сс}$  – срок службы оборудования, год;

$F_{ф}$  – фактическое время занятости оборудования в выпускной квалификационной работе, ч.

$F_{н} = 365 - 104 - 11 = 250$  дней = 2000 ч.

Вычисленная амортизация оборудования представлена в таблице 5.6.

Таблица 5.6. – Затраты на амортизацию оборудования

Оборудование	Цена, руб.	$F_{сс}$ , год	$F_{ф}$ , часы	$Z_{об}$ , руб.
Универсальная электропечь SNOL 15/1200	361 200,00	12	50	800
Пресс гидравлический Matrix-12	11 400,00	10	200	1 200
Весы фасовочные высоточные ВСП-1	21 300,00	5	400	1 200
Дифрактометр настольный рентгеновский Дифрей-401	5 000 000,00	15	20	3 380
Наноиндентер MicroMaterial NaNoTest Vantage	15 000 000,00	15	10	5 060
Микроскоп YaXun-AK01	69 900,00	5	10	70
Компьютер	62 500,00	3	500	5 500
ИТОГО:				17 210

### 5.6.2 Затраты на основные и вспомогательные материалы

Порошки для выполнения ВКР были закуплены отделением естественных наук. К вспомогательным материалам относится калька, алмазная паста, фотобумага и т.д. Перечень вспомогательных материалов приведен в таблице 5.7. Данные взяты из смет кафедры.

Таблица 5.7. – Перечень вспомогательных материалов

№	Материал	Цена, руб/кг	Кол-во, гр	Затраты, руб.
1	97% АСД-6М (Al)	1 550	100	155
2	95% НП Al	1 380	50	69
3	100% HfB <sub>2</sub>	17 500	100	1 750
4	100 % W	5 350	5	26
5	Вспомогательные материалы			1 000
ИТОГО:				3 000
Неучтенные расходы 1 %:				30
Всего:				3 030

### 5.6.3 Затраты на электроэнергию

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E} = \mathcal{C} \cdot N \cdot n \cdot t_{\text{зан.ч.}};$$

где  $\mathcal{C}$  — стоимость 1 кВт/ч электроэнергии, р.;

$N$  — мощность оборудования, кВт;

$n$  — количество единиц оборудования одного вида, ед.;

$t_{\text{зан.ч}}$  — время занятости оборудования, ч.

Вычисленные затраты на электроэнергию представлены в таблице 5.8.

Таблица 5.8. – Затраты на электроэнергию

Оборудование	Ц, руб.	N, кВт	t <sub>зан.</sub> ч	n	Затраты, руб.
Универсальная электропечь SNOL 15/1200	5,786	6	50	1	1 736
Весы фасовочные высоточные ВСП-1	5,786	0,04	400	1	93
Дифрактометр настольный рентгеновский Дифрей-401	5,786	0,5	20	1	58
Наноиндентер MicroMaterial NaNoTest Vantage	5,786	0,6	10	1	35
Микроскоп YaXun-AK01	5,786	0,4	10	1	23
Компьютер	5,786	0,3	500	1	868
ИТОГО:					2 812

### 5.6.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей}) \cdot k_{\text{нр}};$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы (16 %).

$$Z_{\text{накл}} = (17210+3030+2812) \cdot 0,16 = 3\,688 \text{ руб.}$$

Согласно ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» производство относится к малоотходному, т.е технологические отходы составляют от 1,5 до 10 %. При расчете был взят максимальный процент отходов.

$$Z_{\text{тех.от.}} = (17210+3030+2812) \cdot 0,10 = 2\,305 \text{ руб.}$$



Суммарные затраты накладных расходов и технологических отходов:

$$Z_{\text{накл. и тех. от.}} = 5\,993 \text{ руб.}$$

### 5.6.5 Смета затрат на ВКР

В таблице 5.9 представлена итоговая смета затрат на выпускную квалификационную работу.

Таблица 5.9. – Смета затрат на ВКР

№	Элемента затрат	Сумма, руб.	%
1	Амортизация оборудования	17 210	64,4
2	Вспомогательные материалы	3 030	11,3
3	Электроэнергия	2 812	10,5
4	Накладные расходы	5 993	13,8
ИТОГО:		29 045	100,0

#### Выводы по разделу

1. Произведена оценка коммерческого потенциала исследования и составлена матрица SWOT-анализа проекта, позволяющая выявить сильные и слабые стороны исследования.
2. Выполнено планирование и составлена диаграмма Ганта.
3. Рассчитана смета затрат на разработку проекта. Бюджет проекта составляет 29 045 рублей. Реализация проекта является экономически целесообразной.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4БМ8И	Белякович Светлана Александровна

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	Материаловедение
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

Тема ВКР:

Получение материала на основе диборида гафния и алюминия	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p><b>Объект исследования</b> – термические и радиационные характеристики диборида гафния в матрице алюминия в зависимости от содержания диборида гафния, а также фазовый состав и структура композиционного материала: диборид гафния-алюминий. Целью работы являлось проектирование материала с оптимальным составом для максимального поглощения ионизирующего излучения.</p> <p><b>Рабочая зона</b> – помещение научной лаборатории отделения естественных наук (НИ ТПУ корпус №2). Рабочей зоной являлось помещение лаборатории площадью 24 м<sup>2</sup>. Технологический процесс включает в себя следующие виды работ: смешивание навесок порошков, прессование порошков, спекание образцов. Используемые приборы: весы аналитические, пресс гидравлический, печь муфельная.</p> <p><b>Область применения</b> – сфера ядерной медицины.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	

<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p><i>Правовое обеспечение и организационные мероприятия согласно ТК РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 16.12.2019):</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• режим рабочего времени, отдыха, технического перерыва;</li> <li>• обеспечение работников средствами индивидуальной защиты.</li> </ul> <p><i>Законодательные и нормативные документы по теме:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ.</li> <li>2.ГОСТ 12.2.091-2012.</li> <li>3.СНиП 41-01-2003.</li> <li>4. СНиП 21-01-97.</li> <li>5.ГОСТ 12.0.004-90.</li> <li>6.ГОСТ 12.0.003-2015.</li> <li>7.СанПиН 2.2.4.548-96.</li> <li>8.СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03.</li> <li>9.ГОСТ 12.1.005-88.</li> <li>10.ГОСТ 12.1.030-81.</li> <li>11.ГОСТ Р 12.1.019-2009.</li> <li>12. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123–ФЗ.</li> <li>13. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03.</li> <li>14.СанПиН 2.6.1.2523-09.</li> <li>15. СН 2.2.4/2.1.8.566-96</li> <li>16. ГОСТ 12.1.003-2014</li> <li>17. ГОСТ Р 12.2.143-2009</li> </ol>
<p><b>2. Производственная безопасность:</b></p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p><i>Выявить вредные факторы в химической лаборатории (при проведении научного исследования): микроклимат; недостаточная освещенность рабочей зоны; шум на рабочем месте; психофизические факторы; вредные вещества в воздухе рабочей зоны, воздействие неионизирующего излучения, воздействие ионизирующего излучения.</i></p> <p><i>Рассмотреть:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• требования к технике безопасности при работе с вредными веществами;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>предлагаемые средства защиты для работы в химической лаборатории: коллективная защита (вытяжные шкафы, вентиляция); индивидуальные средства защиты (перчатки, спецодежда, респираторы, маски, очки).</li> </ul> <p>Выявить опасные факторы: статическое электричество; короткое замыкание. Предлагаемые средства защиты: перчатки, ухваты, спецодежда.</p>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	<p>Рассмотреть:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>необходимость применения санитарно-защитной зоны вследствие выбросов вредных веществ, отходов, облучения;</li> <li>выбросы вредных веществ в атмосферу: пыль, нанопорошки;</li> <li>загрязнение водотоков в результате отмыwania отходов производства в канализационную сеть;</li> </ul>
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<p>Определить перечень возможных ЧС: пожар, взрыв, разрушение зданий в результате разрядов атмосферного электричества, ураган, землетрясение.</p> <p>Наиболее актуальная ЧС – возникновение пожара;</p> <p>Рассмотреть профилактические мероприятия, требования к безопасности и меры по ликвидации её последствий:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>использование огнетушителя, песка, автоматических средств пожаротушения;</li> <li>обеспечение средствами индивидуальной защиты;</li> <li>организационная эвакуация работников.</li> </ol>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	<b>02.03.2020</b>
---	-------------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романцов И. И.	к.т.н.		02.03.2020

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4БМ8И	Белякович С.А.		02.03.2020

## ГЛАВА 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Развитие атомной промышленности обуславливает необходимость проектирования новых материалов для защиты от ионизирующего излучения и нейтронов. Необходимо разработать новые материалы, которые могут поглощать или рассеивать ионизирующее излучение, и в то же время иметь низкую плотность и небольшие массогабаритные характеристики конечных изделий. Более того, использование свинцовых экранов и их последующая утилизация является сложной экологической проблемой; следовательно, замена таких экранов новыми материалами позволяет решить не только технические проблемы, но и улучшить экологическую ситуацию.

Настоящая работа направлена на проектирование материала с оптимальным составом для максимального поглощения ионизирующего излучения. Объектом являются термические и радиационные характеристики диборида гафния в матрице алюминия в зависимости от содержания диборида гафния, а также фазовый состав и структура композиционного материала:  $\text{HfB}_2\text{-Al}$ . Предметом исследования в настоящей работе является порошкообразный диборид гафния и материал на основе диборида гафния в матрице алюминия. Порошок произведен с помощью распыления расплава алюминия в специальной атмосфере [34]. Содержание алюминия в порошке – 97 мас. %. Облучение порошка проводили согласно параметрам и методике, описанным в [9]. Полученные смеси прессовали с помощью гидравлического пресса. Спекание прессованных таблеток осуществляли в муфельной печи в условиях ограниченного доступа кислорода.

Экспериментальные работы проходили в лаборатории ТПУ корпуса №2. Лаборатория отделения естественных наук, Школа базовой инженерной подготовки Томского политехнического университета (НИ ШБИП ТПУ), г. Томск;

### **6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **6.1.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Согласно гос. сан. врача РФ №54 от 23.07.2007 г. [45] нано- и микропорошки не относятся к опасным веществам. Важнейшим критерием оценки риска, связанного с наноматериалами, является использование наночастиц и наноматериалов в окружающую среду в процессе их производства. Исследуемые порошки диборида гафния и алюминия относятся к нетоксичным наночастицам, и по методам использования и анализа не представляют опасности для человека.

Согласно Трудовому кодексу РФ [46] работодатель обязан привести обучение лиц, поступающих на работу с вредными и (или) опасными условиями труда, безопасным методам и приемам выполнения работ. Инструктаж ответственных лиц проводится в соответствии с ГОСТ 12.0.004-90 «Организация обучения по сохранности труда. Общие положения» [47]. При работе с наночастицами и наноструктурными материалами все работники должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты [48]. Контроль за исполнением требований законодательной базы осуществляется Федеральной инспекцией труда при Министерстве труда и социальной защиты Российской Федерации.

### **6.2.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.**

Эргономические требования к рабочим местам при выполнении работ в положении стоя регламентируются ГОСТ 12.2.033-78 [49] согласно которому, рабочее место должно обеспечивать выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля. Конструкция оборудования должна обеспечивать оптимальное положение работающего путем регулирования высоты рабочей поверхности.

Нормы безопасности электрического измерительного оборудования установлены в ГОСТ 12.2.091-2012 [50]. Согласно ГОСТ 12.2.091-2012 перед применением электрическое измерительное лабораторное оборудование должно быть испытано в рабочем составе на соответствие требованиям данного стандарта. На каждое электрическое измерительное оборудование должна быть составлена инструкция по эксплуатации, где должны быть указаны следующие пункты: а) указания по идентификации рабочих органов управления и их применения во всех рабочих режимах; б) указание о размещении оборудования таким образом, чтобы не было трудностей с его отключением; в) инструкции по взаимному соединению вспомогательного и другого оборудования, включая указания по применению принадлежностей, съемных частей и любых специальных материалов; г) подробное изложение ограничений при периодической работе; д) пояснение символов, относящихся к безопасности, которые нанесены на оборудовании; е) инструкции по замене расходных материалов; ж) инструкции по очистке и дезактивации; и) перечисление всех потенциально ядовитых и вредных газов, которые могут выделяться при работе оборудования, и их возможные количества; к) подробные инструкции о процедурах, уменьшающих риск, при обращении с огнеопасными жидкостями. В инструкции должно быть указано, что в случае нарушения правил эксплуатации оборудования, установленных изготовителем, может ухудшаться защита, примененная в данном оборудовании. Соответствие проверяют осмотром.

В оборудовании должна быть обеспечена защита от поражения электрическим током в нормальных условиях и в условиях единичной неисправности. Доступные части оборудования не должны быть опасными для жизни.

## 6.2 Профессиональная социальная безопасность

Согласно ГОСТ 12.0.003-2015 неблагоприятные производственные факторы подразделяются на: вредные производственные факторы, то есть факторы, приводящие к заболеванию, в том числе усугубляющие уже имеющиеся заболевания; опасные производственные факторы, то есть факторы, приводящие к травме, в том числе смертельной. На практике граница между вредными и опасными факторами условна и предполагает возможность перехода фактора из одной категории в другую.

Опасные и вредные производственные факторы по характеру своего происхождения подразделяют на: физические; химические; психофизиологические; биологические. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности
2. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+		
3. Шум и вибрации		+		
4. Вредные вещества в воздухе рабочей зоны	+	+		
5. Электрический ток		+		
6. Воздействие не ионизирующего излучения		+		
7. Воздействие ионизирующего излучения			+	



				<p>ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.</p> <p>ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.</p> <p>ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты</p> <p>Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.</p> <p>СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов.</p> <p>СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009.</p>
--	--	--	--	--

### 6.2.1. Анализ вредных и опасных производственных факторов

#### Отклонение показателей микроклимата

Микроклимат в производственных помещениях характеризуется следующими параметрами: температура воздуха; температура поверхностей (стены, потолок, пол, оборудование и т.п.); относительная влажность воздуха; скорость движения воздуха; интенсивность теплового облучения.

Оптимальные условия микроклимата обусловлены критериями оптимального функционирования человека, а именно высокий уровень работоспособности, отсутствие отклонений в состоянии здоровья и тепловой комфорт в течение рабочей смены.

Оптимальные параметры микроклимата представлены в таблице 6.2 [51].

Таблица 6.2. Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %
Холодный	21-23	20-24	60-40
Теплый	22-24	21-25	60-40

Согласно показаниям термометра, установленного в помещении лаборатории, средняя температура воздуха 22 °С при относительной влажности воздуха 58-60 %. Из чего следует, что рабочая зона соответствует критериям оптимальных условий микроклимата.

### **Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [52] помещение постоянного пребывания людей должно иметь естественное освещение, которое разделяется на боковое, верхнее и комбинированное. Помимо естественного освещения лабораторное помещение должно быть оснащено искусственным освещением. Норма освещенности для научно-технических лабораторий для естественного бокового освещения КЕО = 1,2 %, для совмещенного освещения КЕО = 2,1 %. Для искусственного освещения при общем освещении норма 300 лк, при коэффициенте пульсации не более 10%.

### **Расчет соответствия системы искусственного освещения на рабочем месте**

Расчет соответствия системы искусственного освещения проводится для прямоугольного помещения площадью 24 м<sup>2</sup>, размерами 6х4 метра, высотой потолка 4 метра, количество ламп 6 штук.

Вычисления произведены по методу светового потока, предназначенного для расчета освещенности общего равномерного освещения горизонтальных поверхностей. Согласно отраслевым нормам освещенности уровень рабочей поверхности над полом составляет 0,8 метра и установлена минимальная норма освещенности (Е) 300 лк. Световой поток лампы накаливания или группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z \cdot 100}{n \cdot \eta},$$

где  $E_n$  – нормируемая минимальная освещённость согласно СНиП 23-05-2010, лк;

$S$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>;

$K_z$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (рекомендуется 1,5);

$Z$  – коэффициент неравномерности освещения (для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным  $Z = 1,1$ );

$n$  – число светильников;

$\eta$  – коэффициент использования светового потока, %;

$\Phi$  – световой поток, излучаемый светильником.

Коэффициент использования светового потока  $\eta$  зависит от индекса помещения  $i$ , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью  $h$  и коэффициентов отражения стен ( $\rho_{ст}$ ) и потолка ( $\rho_{п}$ ). Коэффициенты отражения оцениваются субъективно.

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A+B)},$$

где  $S$  – площадь помещения,  $m^2$ ;

$A$  – ширина помещения,  $m$ ;

$B$  – длина помещения,  $m$ .

$$i = \frac{24}{3,2 \cdot (6+4)} = 0,75.$$

Найдем коэффициенты отражения поверхностей стен, пола и потолка. Так как поверхность стен окрашена в серый цвет, свежепобеленные с окнами без штор, то коэффициент отражения поверхности стен  $P_{ст} = 50\%$ . Так как поверхность потолка светлый окрашенный, то коэффициент отражения поверхности потолка  $P_{п} = 70\%$ . Светильники типа ОД (открытые дневного света).

Учитывая коэффициенты отражения поверхностей стен, потолка и индекс помещения  $i$ , определяем значение коэффициента  $\eta$ , согласно таблице норм,  $\eta = 42\%$ .

Подставив все значения в формулу, по которой рассчитывается световой поток одного источника света, получаем:

$$\Phi = \frac{300 \cdot 24 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{6 \cdot 0,42} = 4714 \text{ лм.}$$

По полученному световому потоку подбираем лампу, наиболее подходящей является лампа ЛБ со световым потоком 5000 лм.

Выразим  $E$ :

$$E = \frac{\Phi \cdot n \cdot \eta}{S \cdot K_3 \cdot Z} = 311 \text{ лк.}$$

Из расчета следует, что минимальная освещенность в помещении лаборатории находится в пределах нормы и, следовательно, нормы безопасности по искусственному освещению соблюдены.

### **Шум и вибрации**

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности,

способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания. Длительное воздействие шума влечет тугоухость работника вплоть до его полной глухоты. Уровень шума регламентируется ГОСТ 12.1.003-2014 [53].

Допустимый уровень вибрации в общественных зданиях – это уровень фактора, который не вызывает у человека значительного беспокойства и существенных изменений показателей функционального состояния систем и анализаторов, чувствительных к вибрационному воздействию. Регламентируется согласно СН 2.2.4/2.1.8.566-96 [54].

Вибраций и шумов, связанных с оборудованием, используемым в настоящем проекте, не наблюдается. Тем не менее, имеется вибрационное воздействие со стороны вытяжной вентиляции. За отсутствием аппаратуры для измерения уровня шума и вибрации в лаборатории, с точностью судить о данных показателях не имеется возможным. Тем не менее, основываясь на субъективных ощущениях персонала лаборатории и отсутствии дискомфорта во время работы, можно прийти к выводу о соответствии рабочей зоны.

### **Вредные вещества в воздухе рабочей зоны**

Несмотря на то, что диборид гафния ( $\text{HfB}_2$ ) и алюминий (Al) не являются вредными веществами, работа с нано- и микропорошками данных веществ влечет их распыление в воздухе рабочей зоны и, как следствие, вдыхание порошков персоналом. Во избежание попадания порошков в дыхательные пути, работа с навесками порошков должна производиться в вытяжном шкафу, оборудованном согласно СНиП 41-01-2003 [55].

Предельно допустимое содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны регламентируется ГОСТ 12.1.005-88 [56]. Содержание вредных веществ не должно превышать предельно допустимых концентраций, определяемых в [56]. Контроль содержания вредных веществ проводится не менее трех раз за смену не позднее, чем через 30 мин. после работы с веществом.

Помещение лаборатории оборудовано вытяжными шкафами, соответствующими СНиП 41-01-2003, в количестве 2 штук. Работа с порошками осуществляется исключительно внутри вытяжного шкафа. Рабочая зона соответствует нормам безопасности.

### **Электрический ток**

Так как муфельная печь для спекания образцов и установка для СВЧ-облучения порошков подключены к электрической сети, должно быть организовано защитное заземление или зануление для защиты людей от поражающего воздействия электрического тока согласно ГОСТ 12.1.030-81 [57].

Степень опасных воздействий на человека электрического тока зависит от: рода и величины напряжения и тока; частоты электрического тока; пути прохождения тока через тело человека; продолжительности воздействия на организм человека; условий внешней среды.

Основными мероприятиями по защите от электропоражения являются: обеспечение недоступности токоведущих частей путем использования изоляции в корпусах оборудования; применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током; защитного заземления, зануления; защитного отключения; использование устройств бесперебойного питания [57].

Согласно ГОСТ Р 12.1.019-2009 [58] электробезопасность обеспечивается: конструкцией электроустановок; техническими способами и средствами защиты; организационными и техническими мероприятиями.

В помещении лаборатории располагается современная муфельная печь с изоляцией в корпусе и защитным заземлением. Персональный компьютер оборудован устройством бесперебойного питания. В лаборатории имеется устройство дифференцированного тока. Таким образом, помещение соответствует требуемым нормам безопасности.

### **Психофизические факторы**

Для предупреждения утомления при работе на производстве необходимо нормализовать активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха согласно СанПиНу 2.2.2/2.4.1340-03.

Существуют следующие меры по снижению влияния монотонности:

- необходимо применять оптимальные режимы труда и отдыха в течение рабочего дня;
- соблюдать эстетичность производства.

Оборудованная рабочая зона частично соответствует нормативу. Экран монитора персонального компьютера находится на расстоянии 600 мм от глаз пользователя под углом наклона 15° от нормали. Тем не менее, конструкция рабочего стула не регулируется под антропометрические данные оператора и представляет собой офисный стул с жестким каркасом. Такой вариант рабочей мебели приводит к быстрому утомлению и должен быть замещен в соответствии с требованиями СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

Для уменьшения физических нагрузок организма во время работы рекомендуется использовать специальную мебель с возможностью регулировки под конкретные антропометрические данные. Конструкция рабочего стула должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

### **Воздействие не ионизирующего излучения**

Настоящая работа включает в себя воздействие на порошки алюминия СВЧ излучением (СВЧ–активирование) с заданными параметрами активирования. Процесс облучения порошков проводили на основании работы [9] с параметрами излучения в области размещения образца: поток с плотностью мощности 0,8 Вт/м<sup>2</sup>, длительность импульса 3 мкс, частота следования импульсов 400 Гц, несущая частота излучения 9.4 ГГц. Образцы подвергали действию излучения от 5 до 25 с, шаг по времени составлял 5 с, интегральное значение энергии, излученной в виде СВЧ–излучения антенным рупором на образец, лежало в диапазоне от 12 до 60 Дж.

Санитарно-гигиенические требования, а также предельно допустимые уровни воздействия регламентируются СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 [59]. Так как мощность установки не превышает 10 Вт при максимальной частоте излучения 9,4 ГГц получение санитарно-эпидемиологического заключения на размещение и ввод в эксплуатацию не требуется.

Согласно [59] для контроля уровня излучения вокруг прибора используются расчетные и инструментальные методы в соответствии с методическими указаниями, утвержденными в установленном порядке. Инструментальный контроль проводится при вводе в эксплуатацию установки; при необходимости продления (переоформления) санитарно-эпидемиологического заключения; при изменении режима работы установки; при аттестации рабочих мест; при профилактических проверках (не реже одного раза в три года).

Мероприятия по профилактике неблагоприятного воздействия на человека электромагнитных полей проводятся согласно [59] и заключаются в выборе рациональных режимов работы установки, в ограничении пребывания персонала в условиях воздействия электромагнитного поля, в установке правил безопасности эксплуатации источников и их выполнении.

## **Воздействие ионизирующего излучения**

Разрабатываемый в настоящей работе материал будет использован в качестве защитной оболочки при переносе радиофармацевтических препаратов, характеризующихся ионизированным и (или) нейтронным излучением. Защитный материал имеет своей целью предохранение людей от вредного воздействия радиации, а также снижение фоновых показаний измерительных приборов, регистрирующих ионизирующее излучение [60].

В процессе эксплуатации материала персонал подвергается воздействию ионизирующего излучения, в связи с чем обеспечение безопасности персонала должно быть организовано в соответствии с СанПиН 2.6.1.2523-09 [61]. Обеспечение радиационной безопасности при эксплуатации источников обуславливается принципом нормирования: когда персонал, работающий непосредственно с источником получает эффективную дозу не более 20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет; персонал группы Б, находящийся в сфере действия источника получает эффективную дозу не более 1 мЗв в год.

В процессе разработки материала источники ионизирующего излучения не применялись. Оценка соответствия степени поглощения ионизирующего и нейтронного излучения проводилась на исследовательском ядерном реакторе типа БР без участия инженера-исследователя проекта.

### **6.3 Экологическая безопасность**

Основной характеристикой наноразмерных материалов является малый размер частиц, что, безусловно, оказывает негативное воздействие на окружающую среду. Тем не менее, оценить риск и последствия такого воздействия не представляется возможным. Следует учесть, что сами по себе представленные порошки не являются токсичными и наибольший вред приносят примеси, содержащиеся в нанопорошках, в том числе из-за высоких адсорбционных свойств наночастиц. На сегодняшний день сформированы пять основных шагов для определения рисков, связанных с повсеместным применением наноматериалов [62]:

1. составить программу систематических исследований, ориентированных на определение возможного риска, связанного с наночастицами;
2. разработать методы обнаружения наночастиц в воздухе и воде;
3. создать методы определения возможной токсичности наноматериалов;
4. сформировать модели, способные предсказать возможное воздействие наноматериалов на окружающую среду и здоровье человека;

5. изыскать способ оценки воздействия наночастиц на окружающую среду и здоровье.

Для удаления примесей наноматериалов в воздухе лаборатории применяют вытяжную вентиляцию, для снижения выбросов веществ в атмосферу применяют рукавные фильтры типа ФТНС. Следуя санитарно-гигиеническим нормам, работники лаборатории используют туалетные раковины, что вызывает образование жидких отходов, для удаления которых используют канализацию.

В процессе разработки материала образуются твердые отходы (отходы шлифования и обтирания), которые собираются и хранятся в специально отведенных местах. При удалении отходов с территории им присваиваются 4 категории опасности, они вывозятся на соответствующие полигоны (промышленных отходов, токсичных отходов и т.д.).

Образующиеся в процессе работы отходы бумажной макулатуры (калька, конверты для хранения и т.п.) подвергаются утилизации согласно ГОСТ 10700-97 Макулатура бумажная и картонная [63]. Услуги по вывозу макулатуры для последующей утилизации на территории г. Томска оказывает компания ООО «Чистый мир».

Оборудование, используемое в настоящем исследовании (весы, муфельная печь, микроскоп, персональный компьютер и т.д.) подключено к электрической сети или является ручным (гидравлический пресс), что исключает необходимость сбора и утилизации батареек.

#### **6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

В процессе работы с печным оборудованием, а также с оборудованием, подключенным к электросети, имеется риск возгорания. В связи с этим лаборатория должна быть оборудована средствами пожаротушения согласно Федеральным законам от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

В лаборатории, содержащей электроустановки, велика вероятность пожара класса Е.

Лаборатория должна быть оснащена системами автоматического пожаротушения и пожарной сигнализации (включая ручные пожарные извещатели), а также первичными средствами тушения пожаров и возгораний: огнетушители, сухой песок. Требования к проектированию автоматических установок пожаротушения и автоматической пожарной сигнализации устанавливаются [64] и (или) нормативными документами по пожарной безопасности [65].

Для предотвращения возникновения пожара необходимо:



1. Обеспечить соблюдение установленного противопожарного режима в лабораториях (помещениях);
2. Следить за исправностью системы отопления, вентиляции, электроустановок, технологического оборудования и принимать немедленные меры к устранению обнаруженных неисправностей, могущих привести к пожару;
3. Следить за тем, чтобы после окончания работы и занятий проводилась уборка рабочих мест и помещений, отключалась электросеть, за исключением дежурного освещения электроустановок, которые по условиям технологического процесса производства должны работать круглосуточно;
4. Обеспечить содержание в исправности и постоянной готовности к действию имеющихся средств и установок пожаротушения, связи и сигнализации;
5. Допускать к работе лиц, прошедших противопожарный инструктаж под роспись в журнале регистрации инструктажа на рабочем месте;
6. Сотрудники, студенты и преподаватели, работающие в лаборатории (помещении), обязаны соблюдать пожарную безопасность при работе, строго соблюдать установленные правила и требования настоящей инструкции, не допускать действий, которые могут привести к пожару;
7. Знать местонахождение средств пожаротушения и уметь ими пользоваться.

Помещение лаборатории оборудовано пожарным извещением, которое позволяет оповестить персонал о возгорании. В качестве пожарного извещения в помещении установлены дымовые фотоэлектрические детекторы типа ИДФ-1 или ДИП-1. Выведение людей из зоны пожара производится по плану эвакуации. Лаборатория содержит два пути эвакуации, оборудованных охранно-пожарными световыми оповещателями. Разработанный план эвакуации регламентирован ГОСТ Р 12.2.143-2009 [66]. Следуя Правилам пожарной безопасности, в РФ ППБ 01-2003 (п. 16), разработаны и вывешены на видных местах планы (схемы) эвакуации людей в случае пожара.

### **Выводы по разделу**

В главе рассмотрены основные требования для обеспечения безопасности персонала в течение различных этапов разработки, производства и эксплуатации изделия. Главным направлением обеспечения экологической безопасности нанотехнологий и наноматериалов является жесткий контроль нанопродуктов и их производных на всех стадиях жизненного цикла: от разработки и изучения в лаборатории до полной утилизации.

Установлены вредные и опасные факторы. Произведен анализ факторов и приведены нормы для регулирования данных факторов. Установлено, что рабочая зона соответствует нормам безопасности, воздействие вредных факторов сведено к минимуму. В качестве наиболее вероятного ЧП указано возгорание. Рабочая зона оборудована средствами эвакуации и пожаротушения. На основании этого, можно утверждать, что рабочая зона лаборатории соответствует нормам трудового законодательства.

Организация работы по представленным протоколам также является основным минимумом для перехода от лабораторного производства к опытному, а затем и к массовому производству и использованию предложенных в работе идей в промышленности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были проанализированы свойства и характеристики композиционного материала на основе диборида гафния и алюминия. Были рассмотрены несколько компонентных составов материала, опробованы несколько термических режимов изготовления образцов. В работе был использован рентгенофазовый анализ, были получены снимки с помощью сканирующей электронной микроскопии, были рассмотрены спектры эмиссии излучения горящих алюминиевых порошков, была измерена плотность образцов, произведено наноидентифицирование. По итогам работы были сделаны следующие выводы:

1. Проведена поисковая работа для апробации метода твердофазного спекания, в результате чего было установлено, что спекание при температуре ниже температуры плавления алюминиевой матрицы позволяет получить материал, обладающий неудовлетворительными физико-механическими характеристиками. В главе 3 также был рассмотрен широкий диапазон значений процентного содержания порошка алюминия в материале, на основании чего, в дальнейшей работе было решено исследовать материалы, содержащие 10 и 20 % порошка алюминия. По итогам поисковой работы было отмечено, что более высокими прочностными качествами и лучшими внешними характеристиками обладают образцы, изготовленные на основе СВЧ-активированного алюминия.

2. В работе были опробовано предварительное жидкофазное спекание с последующим горячим прессованием, а также горячее прессование без предварительного спекания. В большинстве случаев образцы, полученные методом предварительного спекания с последующим горячим прессованием, обладали более высокими характеристиками. На основании этого, можно сделать вывод, что такой метод изготовления образцов является оптимальным.

3. В качестве материала матрицы образцов были использованы два вида порошков алюминия в различных процентных соотношениях: АСД-6М и нанопорошок алюминия. Образцы, содержащие порошок алюминия АСД-6М, в целом, имели более высокие показатели свойств. На данном этапе работы вновь было отмечено, что образцы, содержащие СВЧ-активированные порошки алюминия, превосходили в свойствах аналоги на основе неактивированного порошка.

4. Единственного образца, обладающего самыми высокими значениями свойств, обнаружено не было, тем не менее, в совокупности проведенных исследований, среди полу-

ченых образцов можно выделить образец, содержащий 20 % СВЧ-активированного порошка алюминия АСД-6М, полученный методом предварительного спекания с последующим горячим прессованием.

## Список публикаций

1. Белякович С.А. Состав и структура спеченного материала на основе диборида гафния и алюминия// Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XX Международной научно-практической конференции имени профессора Л.П. Кулёва студентов и молодых ученых (Томск, 20–23 мая 2019 г.) /Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – С. 39-41
2. Белякович С.А. Диффузионное спекание диборида гафния с микропорошком алюминия.// Актуальные проблемы современной науки: материалы VIII Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Омск, 26 апр. 2019 г.) / Минобрнауки России, ОмГТУ, каф. «Физика». – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. – С.4–6
3. Белякович С. А., Мостовщиков А. В., Ильин А. П. Получение металлокерамического материала на основе диборида гафния и микропорошков алюминия.// VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы» (VIII Ставеровские чтения) . – С. 12-16.
4. Belyakovich S.A., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Gubarev F. A. // 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2019), Tomsk: TPU Publishing House, 2019. – С. 36-41.

### Список используемой литературы

1. Циклотрон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/accelerators/ciclotron.htm>.
2. Anand Bellam Balajia, Chantara Thevy Ratnam, Mohammad Khalid R. Effect of electron beam irradiation on thermal and crystallization behavior of PP/EPDM blend // Radiation. Physics&Chemistry. – Vol. 141. – P. 179–189.
3. Дулов Е.Н. Бета-Спектроскопия: Регистрация Спектров Бета-Частиц Прохождение Бета-Частиц Через Вещество. – Казань, 2013. – 16 с.
4. Ишханова Б.С. Взаимодействие гамма-квантов с веществом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/partmat/pm03.htm>.
5. Козлов А.В. Справочник по радиационной безопасности. – М: Энергоатомиздат, 1991. – 541 с.
6. Бродер Д.Л. Бетон в защите ядерных установок. – М: Атомиздат, 1960. – 33 с.
7. Козлов А.В. Действие нейтронного облучения на металлы при различных температурах и возможность самоорганизации протекающих при этом процессов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. –Т. 4. – С. 42
8. Иванов Л.И., Платов Ю.М. Радиационная физика металлов и ее приложения.– М: Интерконта, 2002. – 300 с.
9. Мостовщиков А.В., Ильин А.П., Чумерин П.Ю. Влияние СВЧ-излучения на термическую стабильность нанопорошка алюминия // Письма в Журнал Технической Физики. – Т. 42,– № 7. – С. 17–22.
10. Кирсанов В.В. ЭВМ-эксперимент в атомном материаловедении. – М: Энергоатом, 1990. – 304 с.
11. Гуляев А.П. Металловедение. – М: Металлургия, 1986. – 544 с.
12. John F., Bowman E. Effects of radiation on materials and components. – California: Reinhold, 1964. – 604 p.
13. Hunks C.L., Hunzmun D.J. radiation effects information center aeronautics administration // Security. – Vol. 2018. – № 1.– P. 144-186.
14. Pfaff E., Shelton R.R. Effects on nuclear radiation on electronic. – Chicago: Admiral co., 1958. – 354 p.
15. Primak W., Fuchs L.H., Day P. Radiation damage in insulators // Physics Revolution journals Arch. – Vol. 92. – P. 1064.

16. Harrison N. Handbook of nuclear radiation effects. – California: Riverside, 1956. – 122 p.
17. Радишевская Н.И. Состав и структура защитной оксидно-гидроксидной оболочки на частицах нанопорошка алюминия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – Vol. 3. – P. 19–23.
18. Дрица М.Е. Свойства элементов. Москва: Металлургия, 1985. – 672 с.
19. Туманова А.Т., Портной К.И. Тугоплавкие соединения. Москва: Машиностроение, 1967. – С. 392.
20. Филянд М.А., Семенова Е.И. Свойства редких элементов. Москва: Металлургия, 1964. – 899 с.
21. Иванцов А.Е. Бориды: Тематическая консультация для студентов механических специальностей. Казань: Казан. гос. технол. ун-т., 2006. – 19 p.
22. Шека И.А., Карлышева К.Ф. Химия гафния. Киев: Наукова думка, 1973. – С. 459.
23. Ильин А.П., Роот Л.О. М.А.. Повышение запасенной энергии в нанопорошках металлов // Журнал технической физики. – Т. 82, – № 8. – С. 140–142.
24. Шаталова Т., Шляхтин О., Веряева Е. Методы Термического Анализа. Москва: МГУ, 2011. – С. 72.
25. Ильин А.П. Развитие электровзрывной технологии получения нанопорошков в нии высоких напряжений при томском политехническом университете // Известия Томского политехнического университета. – Т. 306, – № 1. – С. 133–139.
26. Demirskyi D. Microstructure and flexural strength of hafnium diboride via flash and conventional spark plasma sintering // Journal of European Ceramics Society. – Vol. 39, – № 4. – С. 898–906.
27. Musa C. Optical characterization of hafnium boride and hafnium carbide-based ceramics for solar energy receivers // Sol. Energy. Elsevier Ltd. – Vol. 169. – С. 111–119.
28. Ковба Л.М., Трунов В.К. Рентгенофазовый анализ (Глава 1). Москва, 1976. – 10 с.
29. Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. Москва: Физматлит, 2007. – 672 с.
30. Курзина И.А. Рентгенофазовый анализ нанопорошков. Томск: ТПУ, 2010. – 14 с.
31. Мордасов Д.М., Мордасов М.М. Технические Измерения Плотности Сыпучих Материалов . М: Уч.Пособие, 2004. – 80 с.
32. ГОСТ Р 57844-2017. Композиты. Определение плотности методом замещения – кажущаяся плотность, определенная газовой пикнометрией, от 26 октября 2017 года.
33. TU-1791-007-49421776-2011. Powder aluminum ASD.

34. Способ получения металлических порошков путем распыления расплавов: пат. 2559080 Рос. Федерация, № 2014109340/02; заявл. 03.11.2014; опубл. 08.10.2015. Бюл. № 4. – 5 с.
35. Khan I., Saeed K., Khan I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities // *Arabian Journal of Chemistry*. – Vol. 3. – P.45-59.
36. Zhang G.J. Inherent anisotropy in transition metal diborides and microstructure/property tailoring in ultra-high temperature ceramics // *Journal of the European Ceramic Society*. – Vol. 38, – № 2. – P. 371–389.
37. Хасанов О.Л. Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий. Томск: ТПУ, 2008. – 212 с.
38. Бойко В.И., Силаева М.Е. Методы и приборы для измерения ядерных и других радиоактивных материалов. 2013. – 137-284 с.
39. Горбунов В.В. Измерение уровней гамма-нейтронного воздействия при длительных статических облучениях на реакторах. Саров: РФЯЦ, 2015. – 1-28 с.
40. Tashlykov O.L., Shscklein S.E., Chomjakov A.P. Numerical and experimental research of homogenous protection against gamma radiation // *Nucl. Radiat. Saf.* – Vol. 3, – № 77. – С. 1–8.
41. Ташлыков О.Л. Экспериментальное исследование защит от гамма-излучения органико-металлических композиций // *Глобальная ядерная безопасность*. – Vol. 2, – № 15. – С. 49–55.
42. Gurung M.D., Ariyasinghe W.M. Total electron scattering cross sections of some important biomolecules at 0.2–6.0 keV energies // *Radiat. Phys. Chem. Elsevier Ltd.* – Vol. 141. – С. 1–7.
43. Mangiarotti A., Martins M.N. A review of electron–nucleus bremsstrahlung cross sections between 1 and 10 MeV // *Radiation Physics and Chemistry. Elsevier Ltd.* – Vol. 141. – С. 312–338.
44. Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P. Smirnov A., Gubarev F.A. Optical system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2020. – V. 69. – № 2. – P. 457–468.
45. Постановление главного государственного санитарного врача РФ от 23 июля 2007 года №54. “О надзоре за продукцией, полученной с использованием нанотехнологий и содержащей наноматериалы.”
46. ТК РФ Статья 225. Обучение в области охраны труда.
47. ГОСТ 12.0.004-90 «Организация обучения по сохранности труда. Общие положения.



48. ТК РФ. Охрана труда. Требования охраны труда. Статья 212. Обязанности работодателя по обеспечению безопасных условий и охраны труда.
49. ГОСТ 12.2.033-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.
50. ГОСТ 12.2.091-2012 Безопасность электрического оборудования для измерения, управления и лабораторного применения. .
51. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
52. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
53. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда. Шум. .
54. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.
55. СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование.
56. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны .
57. ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, от 15 мая 1981 года .
58. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты, от 10 декабря 2009 года .
59. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов, О введении в действие санитарных правил и нормативов - СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03, Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 09 июня 2003 года №135, СанПиН от 09 июня 2003 года №2.1.8/2.2.4.1383-03.
60. ОФС.1.11.0001.15 Радиофармацевтические лекарственные препараты .
61. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
62. Трифонова Т.А., Ширкин Л.А. Экологическая безопасность наночастиц, наноматериалов и нанотехнологий. 2009. – 89 с.
63. ГОСТ 10700-97 Макулатура бумажная и картонная. Технические условия.
64. Федеральный закон “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” от 22.07.2008 N 123-ФЗ .

65. СП 5.13130.2009. Свод правил. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования".
66. ГОСТ Р 12.2.143-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы фотолюминесцентные эвакуационные. Требования и методы контроля.

## Приложение I

### Раздел А (английский язык)

---

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4БМ8И	Белякович С.А.		

Консультант школы отделения (НОЦ) ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Ильин А.П.	д.ф-м.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Панамарёва А.Н.	к.ф.н.		

# 1. METHODS AND MATERIALS FOR ATTENUATING THE FLOW OF IONIZING RADIATION AND NEUTRONS

## 1.1 Particle emitters

### 1.1.1 Accelerators – cyclotrons

A cyclotron is a cyclic accelerator of nonrelativistic heavy charged particles (protons, ions). In a cyclotron particles move in a constant and uniform magnetic field, and a high-frequency electric field of constant frequency is used to accelerate them. The device diagram is shown in Fig. 1.1.

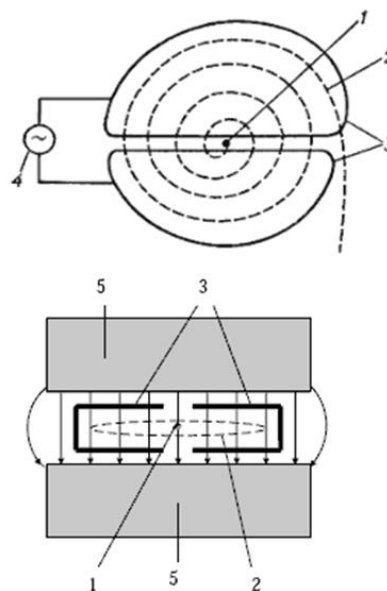


Figure 1.1 - Cyclotron diagram: top and side views: 1 - source of heavy charged particles (protons, ions), 2 - orbit of an accelerated particle, 3 - accelerating electrodes (duants), 4 - accelerating field generator, 5 - electromagnet.

Charged particles enter the chamber from the injector, which is located near the center of the chamber. Particles are accelerated by an alternating field of a fixed frequency applied to accelerating electrodes (duants). The movement of particles is carried out in a constant magnetic field directed perpendicular to the plane of motion of the particles. In the gap between the accelerating electrodes, the particles are accelerated by a pulsed electric field, as a result of which the energy and radius of the orbit increase. At the last turn of the spiral, a deflecting electric field is turned

on, leading the beam out. A continuous acceleration mode is created due to the constancy of the magnetic field and the frequency of the accelerating field.

To accelerate heavy particles in a spinning spiral mode to energies tens of times higher (up to 1000 MeV), a cyclotron modification called a phasotron is used.

### 1.1.2 Cyclotrons as neutron generators

Cyclotrons and transformer-type accelerators (neutron generators) are most often used as neutron sources.

Comparing cyclotrons with neutron generators, it should be noted that cyclotrons have an advantage in achieving large neutron yields per unit angle. With their help, the energy can be varied, or rather, the energy spectrum of neutrons. The neutron beam of cyclotrons is usually stable in time.

## 1.2 Materials used to attenuate $\beta$ -, $\gamma$ -radiation and neutron fluxes

### 1.2.1 Beta – absorption

Beta decay is a type of radioactive decay in which the nucleons of an atomic nucleus spontaneously change their type. Decay occurs under the condition of energy gain and is accompanied by the emission of an electron or positron. Beta decay can occur without the emission of any charged particles. Beta particles of a radioactive substance have a continuous energy spectrum.

To protect against  $\beta$ -radiation, materials with a small atomic number are used, they reduce the energy of bremsstrahlung. The absorption of  $^{90}\text{Sr}$  beta spectrum by an aluminum absorber of various thicknesses is described.

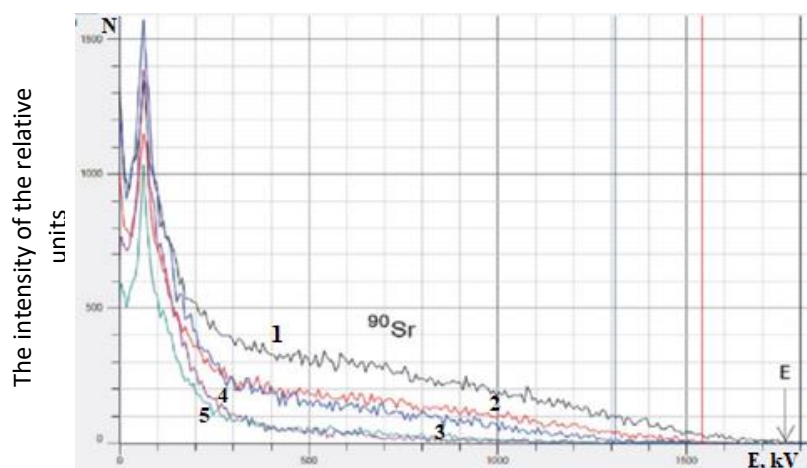


Figure 1.3 – The radiation intensity of the  $^{90}\text{Sr}$  isotope without an absorber (line 1) and with an aluminum absorber of various thicknesses (lines 2,3)

Figure 1.3 shows the appearance of the beta radiation spectrum of the  $^{90}\text{Sr}$  isotope obtained using a scintillation detector. The superposition of two characteristic distributions of beta radiation in energy is observed.

### 1.2.2 Gamma-absorption

As a result of the interaction of gamma radiation with the nuclei, the intensity of the gamma-ray beam is weakened. The main mechanisms of interaction are the photoelectric effect, the Compton effect, and the process of formation of electron-positron pairs.

The photoelectric effect is observed if the  $\gamma$ -quantum energy is greater than the binding energy of the electron shell of the atom with the nucleus. This phenomenon consists in the fact that the photon is completely absorbed by the atom, and one of the electrons in the atomic shell is ejected outside the atom (ionization).

The Compton effect is the scattering of gamma rays by collectivized electrons. An electron can be considered conditionally free if the energy of gamma rays is many times higher than the electron binding energy.

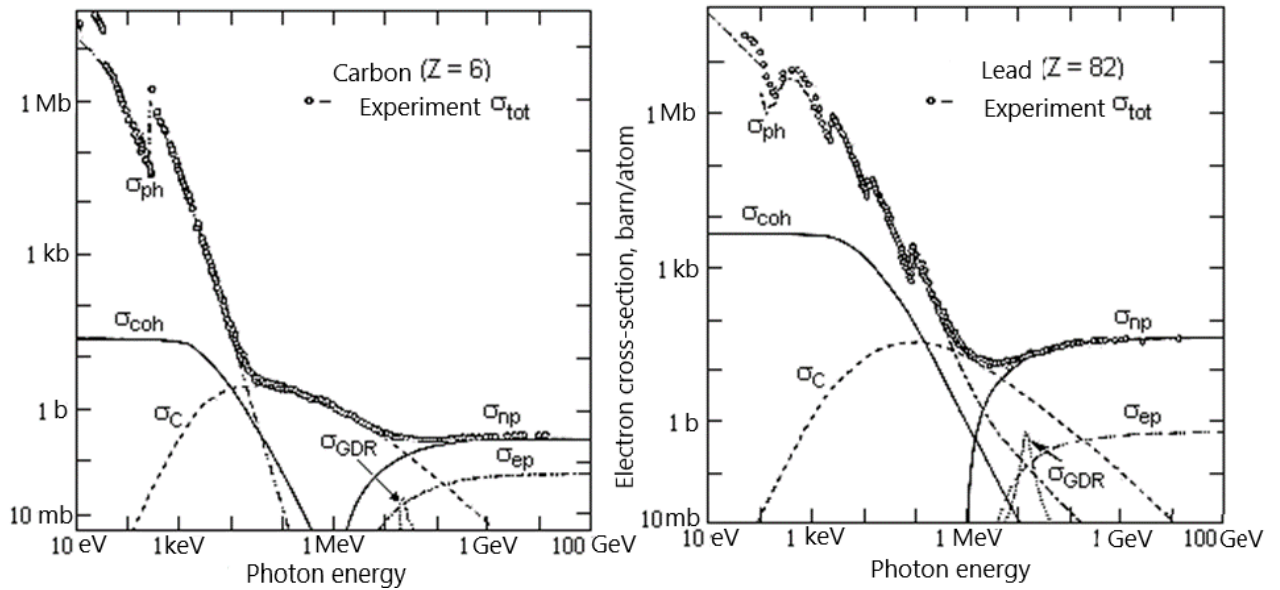


Figure 1.4 - Dependence of the cross section for the interaction of photons with carbon ( $Z = 6$ ) and lead ( $Z = 82$ ) at photon energies from 10 eV to 100 GeV: where  $\sigma_{\text{ph}}$  is the photoelectric effect cross section,  $\sigma_{\text{coh}}$  is the Rayleigh scattering cross section,  $\sigma_{\text{C}}$  is the Compton scattering cross section,  $\sigma_{\text{np}}$  is the cross section for pair production in the field of the nucleus,  $\sigma_{\text{ep}}$  is the cross section for pair production in the field of atomic electrons,  $\sigma_{\text{GDR}}$  is the cross section for nuclear photoabsorption

Following from the data in fig. 1.4, the effective photoelectric effect cross section ( $\sigma_{ph}$ ) at the atoms of a substance dominates at photon energies below 0.01 MeV in carbon and below 1 MeV in lead. In the interaction of  $\gamma$ -quanta with energies within 0.1–10 MeV with element-based materials with a low atomic number, the Compton effect prevails, in which the  $\gamma$ -quantum interacts with electrons and transfers part of its energy to them. If the energy of the  $\gamma$ -quantum exceeds the doubled mass of the electron, the formation of a pair of electron and positron is possible.

The formation of electron – positron pairs is possible only in the Coulomb field of the particle. The threshold for pair production in the electron field is  $4 m_e c^2$ . This is due to the fact that the electron having a small mass receives the recoil energy, and it can no longer be neglected. The formation of pairs in the electron field is characterized by a relatively small cross section.

Figures 1.5 a and 1.5 b show the dependences of the linear photon absorption coefficient in aluminum and lead on the photon energy.

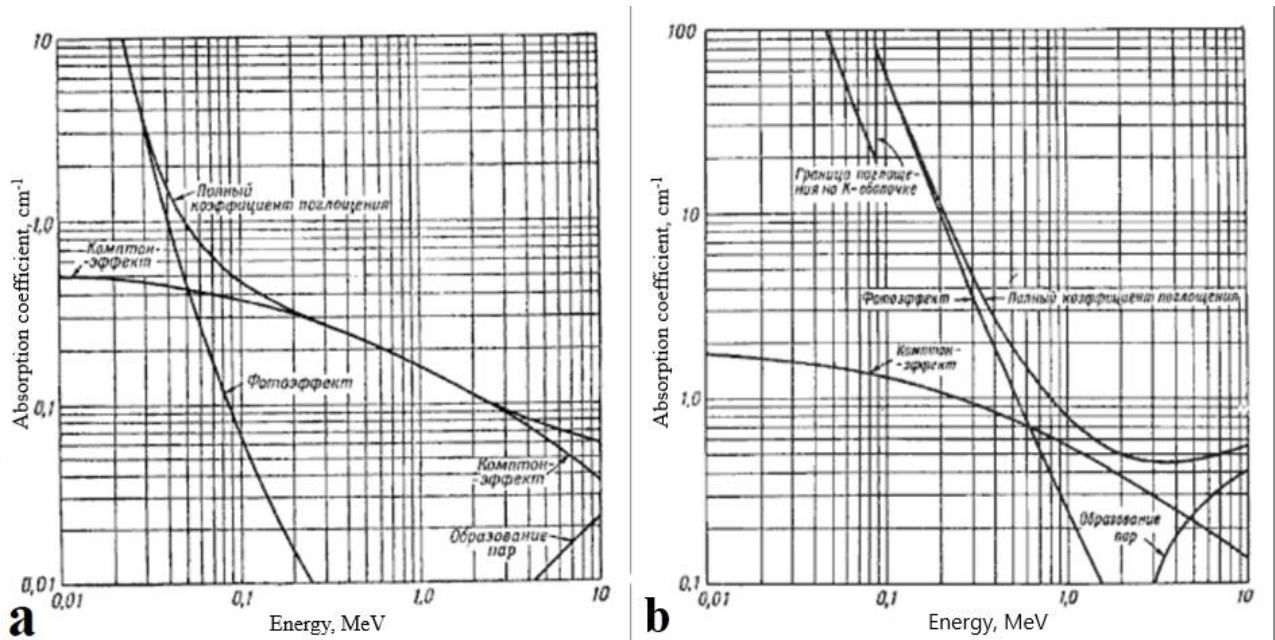


Figure 1.5 - The dependence of the linear absorption coefficient of photons in aluminum (a) in lead (b) on their energy.

### 1.2.3 Materials for attenuating neutron fluxes

Choosing material to attenuate the neutron flux, it is necessary to take into account the mechanisms of interaction between matter and the neutron. The absorption mechanisms are different for thermal, resonant, and slow neutrons; for example, fast neutrons must be preliminarily slowed down.

In the case of elastic scattering, materials with light nuclei that are comparable in mass to the mass of neutrons are the most effective. This slowdown mechanism is fundamental at relatively low energies. At the same time, when considering inelastic scattering, it is supposed to pay attention to substances with heavy nuclei. In this case, the fundamental reaction is radiation capture.

In most cases there is a need to attenuate secondary  $\gamma$ -radiation when capturing thermal neutrons. Following this, several groups of materials suitable for moderation and absorption of a neutron beam can be distinguished.

Effective fast neutron absorbers are substances with a small atomic number, in particular hydrogen-containing ones. The use of hydrogen to absorb thermal neutrons is accompanied by gamma radiation.

Water can serve as a material for protection against neutron radiation due to the high concentration of hydrogen atoms in it. A layer of water 1 cm thick reduces the neutron density by 2.7 times.

One of the options for the hydrogen-containing compounds may also be polyethylene. It can be used in areas where the temperature is lower than its softening temperature (180–190 °C). At the same time, when using it, one should take into account the high coefficient of linear expansion. In addition, hydrogen is part of paraffin, plastics, metal hydrides, and concrete.

Light non-hydrogen-containing substances are promising for attenuating neutron fluxes, for example, graphite or boron carbide.

Heavy metals or their compounds can be used to attenuate the flow of neural radiation. The slowing down of neutrons in such media is due to inelastic scattering, the cross section of which remains constant, and independent of the neutron energy, starting with an energy of 3-4 MeV.

Highly effective radiation protective compositions are obtained with the optimal combination of the properties of metals and non-metals: are presented in table 1.1.

Table 1.1 - Properties of radiation protective compositions \*

Combination of materials	v, %	Density, kg/m <sup>3</sup>	Nn, 10 <sup>-22</sup> cm <sup>-3</sup>	The length of the dose rate relaxation, cm				
				Lf	Li	Lt	L $\gamma$	L
Fe + polyethylene (paraffin)	66	5500	2,8	6,6	6,6	2,0	6,6	6,6
Co + H <sub>2</sub> O	60	5700	2,7	6,8	6,8	2,0	5,1	6,8
Pd + H <sub>2</sub> O	60	7700	2,7	6,9	6,9	2,0	3,7	6,9
Fe + H <sub>2</sub> O	61	5100	2,6	7,0	7,0	2,0	6,8	7,0
Pb + polyethylene	21	3100	6,3	8,7	2,9	4,0	8,7	8,7
Heavy concrete	100	3800	1,2	9,0	6,0	2,0	9,0	9,0
Pb + H <sub>2</sub> O	71	8400	1,9	9,6	9,6	4,0	3,4	9,6



Combination of materials	v, %	Density, kg/m <sup>3</sup>	Nn, 10 <sup>-22</sup> cm <sup>-3</sup>	The length of the dose rate relaxation, cm				
				Lf	Li	Lt	L <sub>γ</sub>	L
Concrete	100	2300	1,2	12,0	6,0	3,0	17,0	17,0
H <sub>2</sub> O	100	1000	6,7	10,0	2,6	2,8	39,0	39,0

\* v is the volume fraction of the heavy component; Lf, Li, Lt, L<sub>γ</sub>, L - relaxation length of fast, intermediate, thermal neutrons and gamma radiation, respectively; L is the relaxation length of mixed gamma-neutron radiation.

Heavy materials attenuate fast neutrons and  $\gamma$ -radiation well, but poorly intermediate neutrons, which in turn are well attenuated by hydrogen-containing compounds.

### 1.3 Absorption of neutron radiation by metals and alloys

Moving in a metallic medium, a neutron interacts locally with the nuclei of atoms and practically does not interact with electrons.

Depending on the neutron energy, both elastic and inelastic mechanisms of interaction can be realized. In an elastic collision of a neutron and an atom, subsequent dynamics depend on the neutron energy, direction of motion, and lattice symmetry of the atomic structure.

If the energy transferred to the atom is less than the threshold energy  $E_d$ , the atom shifts and then returns to its place. If the energy transferred to the atom exceeds  $E_d$  by less than 2.5 times, one stable Frenkel pair is formed. When the energy exceeds the threshold energy  $E_d$  by 2.5 times or more, a cascade of displacements is formed as a result.

Metals exposed to this effect have a residual change in properties. In addition to the aforementioned mechanism, the formation of tracks also contributes to a change in properties. As a result of elastic vibrations of individual groups of atoms, a local temperature increase occurs in the metal, and then rapid heat dissipation due to thermal conductivity. As a result of this phenomenon, the metal receives local hardening, accompanied by strong residual lattice changes, which complicates the flow of metal. This effect is called nuclear hardening of the metal and characterized by an increase in strength and a decrease in ductility and viscosity. The effect decreases with increasing temperature and disappears when the temperature of recrystallization is reached.

Under the influence of neutron radiation on a metal, there is a probability of the formation of atoms of new elements due to neutron capture by a metal atom or fission. With a sufficiently long exposure, pure metal can go into the alloy.

## **1.4 Wetting ceramic materials with aluminum in contact with melts and in composites**

An X-ray amorphous layer 2–10 nm thick of aluminum hydroxides is formed on the aluminum surface. The structure of such a layer largely determines the adsorption properties on the surface of the particles.

When considering the problem of wetting ceramic materials with aluminum, the issue of various characteristics of thermal expansion in metals and ceramics becomes especially important; this leads to the creation of low-strength systems that are prone to cracking.

If the system is successfully combined, the ceramics adjacent to the metal changes their properties: the color of the ceramics changes, the microhardness, and mechanical strength increase. Maximum thermal stresses are observed at the boundary of ceramics and metal. To strengthen the phase boundary, there are several methods. For example, a method based on pressed powders, where a metal powder pressed into a raw ceramic is annealed in a specially selected gaseous medium. There is a method using metallization of ceramics with refractory metal powders. The basis of this method is the creation of an additional interfacial layer at the ceramic – metal interface.

Thus, when soldering ceramics with metal, an essential role is played by solid-phase reactions. The process of solid-phase interaction is a diffusion process. The metal layer deposited on the ceramic is partially oxidized from the side facing the ceramic. The metal crystal lattice in the surface layer undergoes changes; at the same time, chemically reorganized cells are not separated from internal cells with the initial crystal structure.

## **1.5 Physical and chemical properties of hafnium and hafnium diboride**

### **1.5.1 Physical properties**

Hafnium is discovered in 1922 and is the closest analogue of zirconium. Hafnium is in group IV of the Periodic system of elements, is a member of the titanium subgroup, atomic number 72. It has two modifications, the temperature of the allotropic transition from the hexagonal close-packed lattice to the cubic body-centered lattice is  $1760 \pm 35$  °C. It forms two compounds with boron: HfB (melting point 2900 °C) and HfB<sub>2</sub> (melting point 3250 °C).

There are two modifications of hafnium: at room temperature, hafnium has a tightly packed hexagonal crystal lattice; when heated to  $1760 \pm 35$  °C, the hafnium lattice transforms into a body-centered cubic lattice.

HfB<sub>2</sub> is a transition metal diboride and has a structure of metal atom layers alternating with layers of boron atoms forming graphite-like flat networks shown in figure 1.3.

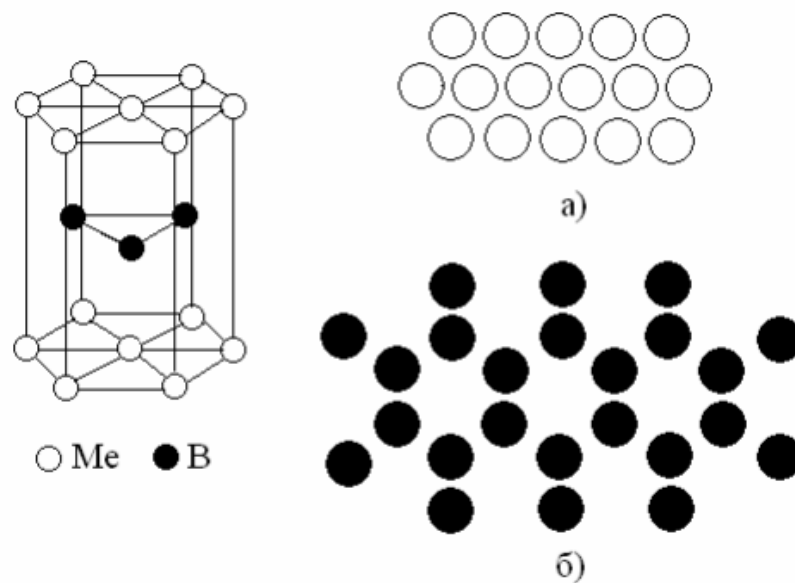


Figure 1.3 - The crystal structure of  $\text{HfB}_2$ , where: a - layers of metal atoms in the crystal;  
b - layers of boron atoms in the crystal

Borides of transition metals are refractory compounds, the melting point of which is often higher than the melting temperature of the starting metals. A characteristic property of such borides is the significant hardness associated with the high energy strength of the interatomic bonds (this is mainly due to the strong covalent bond B-B).

Table 1.2 presents some physical properties of hafnium diboride.

Table 1.2 - Physical properties of hafnium diboride

Properties	
Molecular weight	200,11
Density, $\text{g/cm}^3$	11,2
Microhardness, $\text{g/mm}^2$ at room temperature load 30 g load 50 g at temperature of $1625\text{ }^\circ\text{C}$ load 2500 g	2900±500 2230 569
Melting point, $^\circ\text{C}$	3250±100
Heat capacity at $20\text{ }^\circ\text{C}$ , $\text{J/mol} \cdot \text{deg}$	0,33
Electrical resistivity at $20\text{ }^\circ\text{C}$ , $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	12
The coefficient of thermal linear expansion, $\times 10^6$ in the range of $20\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$ in $\text{deg}^{-1}$	5,3–5,7
Work function, eV	4,1 ( $2360\text{ }^\circ\text{C}$ )
Hall constant $\times 10^4$ in $\text{cm}^3/\text{K}$	–17

The heat capacity of hafnium and hafnium diboride increases continuously with increasing temperature, as does the coefficient of thermal expansion.

Hafnium diboride is a good conductor of electric current, its resistivity is lower than the resistivity of pure metal. This is due to the fact that hafnium is a donor of electrons, which are partially captured by boron atoms, which leads to increased localization of electrons in comparison with pure metal and a decrease in electron-electron interaction.

The main isotopes of hafnium are  $\text{Hf}^{180}$  and  $\text{Hf}^{178}$ . The hafnium isotopic composition is presented in table 1.3. Hafnium has a large capture cross section of thermal neutrons, which makes it possible to use it as a neutron absorber. Hafnium diboride, both natural and enriched in boron, also has a high macroscopic cross section for thermal neutron capture. The nuclear properties of hafnium diboride are presented in table 1.4.

Table 1.3 - The isotopic composition of hafnium

Isotope	Stability	The content in the natural mixture, % (wt.)	Atomic weight	Thermal neutron capture cross section, barn
Hafnium	Natural blend	100	178,49	105
$\text{Hf}^{178}$	Stable	27,14	177,94	50+30
$\text{Hf}^{180}$	Stable	35,24	179,95	10

Table 1.4 - Nuclear properties of hafnium diboride

Boron in $\text{HfB}_2$	Density $\text{HfB}_2$ , $\text{g/cm}^3$	Boron density $\text{HfB}_2$ , $\text{g/cm}^3$		Nuclear boron density in $\text{HfB}_2$ $\times 10^{22}$ , $\text{atom/cm}^3$		Macroscopic section of $\text{HfB}_2$ , $\text{cm}^{-1}$
		B	$\text{B}^{10}$	B	$\text{B}^{10}$	
Natural blend	11,2	1,21	0,24	6,75	1,44	56
80% enriched in $\text{B}^{10}$	11,2	1,21	0,969	6,75	5,85	229

In the nuclear industry for the manufacture of fuel elements in reactors pure zirconium with a low neutron capture cross section is used. Hafnium is an undesirable impurity.

### 1.5.2 Chemical properties

When stored in air, the surface of the hafnium is covered with an oxide film that protects it from further oxidation. When heated in an oxygen environment, hafnium burns out, forming hafnium dioxide  $\text{HfO}_2$ .

Determination of the hafnium resistance to oxidation at high temperatures was determined on hafnium iodide samples when heated in air to  $750^\circ\text{C}$  and  $950^\circ\text{C}$  for 2 hours. The increase in mass of the samples in this case:  $750^\circ\text{C}$  – 240  $\text{mg/dm}^2$ ,  $950^\circ\text{C}$  – 771  $\text{mg/dm}^2$ . The measurement results are presented in figure 1.4.

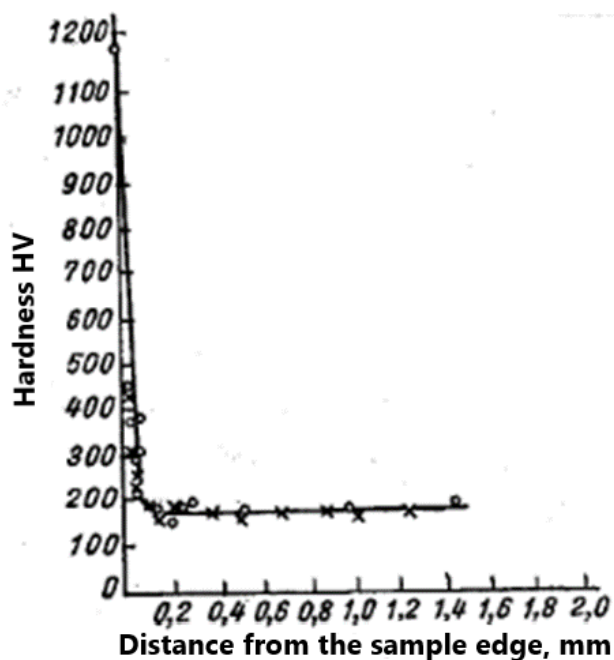


Figure 1.4 - Dependence of the surface hardness of hafnium on the temperature of heating in air at temperatures of 750 °C and 950 °C for 2 hours: × –750 °C, O – 950 °C

In general, under normal conditions, hafnium is resistant to alkalis, nitric acid, dilute hydrochloric acid, and liquid sodium. It is significantly soluble only in hydrofluoric acid and aqua regia.

Hafnium is a polymorphic material and forms solid solutions with a number of elements. Does not form intermetallic compounds with metals more electropositive than himself.

Hafnium diboride begins to oxidize in air at 700 °C. It forms a dense film of cream or white-pink dioxide. At room temperature, hafnium diboride is resistant to boiling water. The hafnium diboride powder is unstable to aggressive environments: it decomposes relatively easily in sulfuric, hydrochloric, perchloric, and forfor acids, and completely decomposes when heated in nitric acid and aqua regia. The introduction of  $\text{HfB}_2$  in a hydrogen solution, in sulfuric acid solutions leads to the decomposition of boride.  $\text{HfB}_2$  is also not resistant to caustic soda solutions.

Compact samples of hafnium diboride at a porosity of 15% are more stable and practically do not decompose in dilute sulfuric, hydrochloric and nitric acids, as well as in sodium hydroxide solutions.

## 1.6 The action of microwave radiation on aluminum nanopowder

In the work by Mostovshchikov A.V. and et al. the effect of microwave radiation on the thermal stability in air of aluminum nanopowder was studied. Aluminum nanopowder was irradiated on an alumina substrate. In this case, the following radiation parameters were provided: flux

power density –  $80 \text{ W/cm}^2$ , pulse duration  $3 \mu\text{s}$ , pulse repetition rate 400 Hz, carrier radiation frequency 9.4 GHz. Samples were exposed to radiation from 5 to 25s in steps of 5s. To study the effect of microwave radiation on aluminum nanopowder, a developed stand is shown in Figure 1.5.

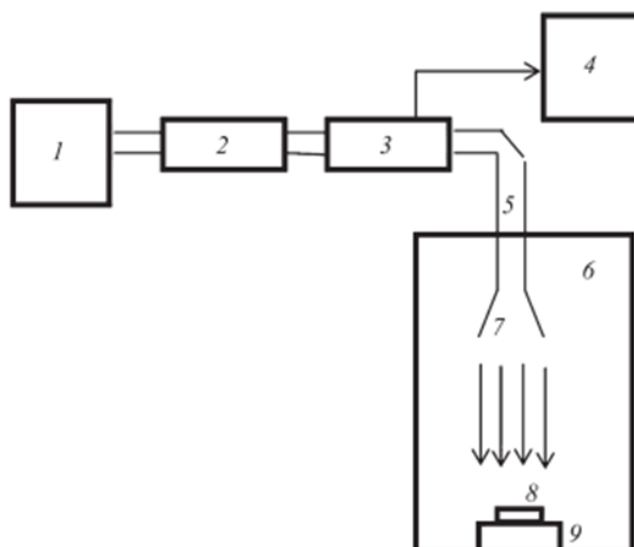


Figure 1.5 - Scheme of an experimental bench for studying the action of microwave radiation on aluminum nanopowder, where: 1 – magnetron generator; 2 – ferrite valve; 3 – directional coupler; 4 – oscilloscope; 5 – waveguide path; 6 – anechoic chamber; 7 – horn antenna; 8 – irradiated powder; 9 – dielectric substrate of aluminum oxide

Table 1.5 presents the results of calculation according to Differential thermal analysis (DTA) of the main parameters of the chemical activity of aluminum nanopowder after irradiation with microwave radiation.

Table 1.5– Parameters of activity of aluminum nanopowder after microwave irradiation

№	Irradiation time, s	The energy of microwave radiation, J	The temperature of the onset of oxidation T, °C	Specific Enthalpy $\Delta H$ , J/g	The increase in mass when heated to 1250 °C $\Delta m$ , wt. %
0	0	0	420	6750	53,7
1	5	12	390	9122	65,4
2	10	24	370	8375	61,6
3	15	36	400	7649	63,5
4	20	48	350	8268	62,2
5	25	60	350	8037	65,2

It was found that after the action of microwave radiation on aluminum nanopowder the chemical activity of aluminum nanopowder increased. It was suggested that this might be due to the destruction of DEL (double electrical layer) on the particle surface, which provides a freer access of the oxidizer (protons) to the metal component.

A possible mechanism of the microwave radiation action is the thermal interaction between the metal component and the oxide shell of the nanoparticle, which leads to an increase in the DEL capacitance on the particle surface and to the loosening of the oxide shell.

The influence of microwave radiation also leads to an increase in the energy stored in the aluminum nanopowder, which is a consequence of the formation and stabilization of the double electric layer. In addition, microwave radiation leads to a change in the substructural characteristics of metal-containing high-energy materials and leads to an increase in microstresses in the metal component of aluminum particles.

It was also shown that the action of microwave radiation on aluminum nanopowder lead to an increase in the thermal effect of oxidation in air. An increase in the exposure energy led to an increase in the specific thermal effect of oxidation.