

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

---

Институт Физико-технический  
Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии  
Кафедра Физико-энергетические установки

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Определение содержания углерода в пенах для сухого хранения ОЯТ посредством ультразвукового метода контроля</b>

УДК 621.039.74:546.26:621.179.16

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Катаева Ольга Игоревна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ ФТИ	Седнев Д.А.	К.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	К.Ф.-М.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	Долматов О.Ю.	К.Ф.-М.Н., доцент		

Томск – 2017 г.

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<b><i>Общекультурные компетенции</i></b>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

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

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Кафедра Физико-энергетические установки

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

О. Ю. Долматов

(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5B	Катаева Ольга Игоревна

Тема работы:

Определение содержания углерода в пеналах для сухого хранения ОЯТ посредством ультразвукового метода контроля

Утверждена приказом директора (дата, номер)

6.02.17 №959/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

08.06.2017

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– объектом исследования являются графитовые включения в металлической основе ковкого чугуна: три образца ВЧШГ;</li> <li>– метод исследования: измерение обратного рассеяния посредством ультразвукового метода неразрушающего контроля на специализированном оборудовании. Использование металлографии в качестве референтного метода контроля.</li> </ul>
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ конструкционного материала ВЧШГ, используемого для производства ТУК и исследование его микроструктуры;</li> <li>– изучение существующих методов контроля качества микроструктуры корпусов ТУК;</li> <li>– анализ теоретических основ ультразвукового метода неразрушающего контроля для обоснования применимости метода обратного рассеяния;</li> <li>– разработка и апробирование метода обратного</li> </ul>

	рассеяния для оценки качества микроструктуры изделий из ВЧШГ посредством специализированного оборудования.
<b>Перечень графического материала</b>	ФЮРА. 14.04.02.161.СБ (кол-во листов 2) Презентация (PowerPoint 2007) (кол-во слайдов: 20)
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская М. В.
Социальная ответственность	Гоголева Т. С.
Иностранный язык	Александров О. А.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Введение	
Экспериментальная часть – исследование микроструктуры ВЧШГ	
Этапы экспериментальных исследований	
Описание оборудования	
Стратегия развития дальнейшей научной деятельности	
Заключение	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	13.03.2017
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ	Седнев Д.А.	к.т.н.		13.03.2017

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ5Б	Катаева Ольга Игоревна		13.03.2017

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5B	Катаевой Ольге Игоревне

Институт	Физико-технический	Кафедра	Физико-энергетические установки
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

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

– Стоимость ресурсов научного исследования (НИ):	– материально-технических; – энергетических; – информационных; – человеческих.
– Нормы и нормативы расходования ресурсов	– электроэнергии.
– Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений для:	– преподавателей и студентов университета.

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

– Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ;	– составление карты сегментирования рынка; – формирование оценочной карты для сравнения конкурентных технических решений.
– Планирование и формирование бюджета НИ;	– представление плана НИ; – формирование бюджета затрат НИ.
– Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности НИ.	– расчет интегрального финансового показателя, интегрального показателя ресурсоэффективности, интегрального показателя экономической эффективности.

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

1. Сегментирование рынка
2. Иерархическая структура работ
3. План и бюджет проекта
4. Матрица SWOT
5. Определение ресурсоэффективности проекта

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М. В.	к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Катаева Ольга Игоревна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ5Б	Катаевой Ольге Игоревне

Институт	Физико-технический	Кафедра	Физико-энергетические установки
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, ультразвук, электромагнитные поля, ионизирующее излучение);</li> <li>– опасных факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).</li> </ul>
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожаробезопасность;</li> <li>– требования охраны труда при работе на ПЭВМ и ультразвуковой установке.</li> </ul>

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

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

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

### Задание выдал консультант:

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

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ5Б	Катаева Ольга Игоревна		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 136 страниц, 28 рисунок, 30 таблиц, 52 источника, 4 приложения.

Ключевые слова: транспортно-упаковочный комплект, механические и литейные свойства корпусов ТУК, высокопрочный чугун с шаровидным графитом, дефекты микроструктура ВЧШГ, ультразвуковой контроль, метод обработка сигнала.

Объектом исследования являются графитовые включения в металлической основе ковкого чугуна: три образца ВЧШГ.

Цель работы – определение возможностей применения метода ультразвукового неразрушающего контроля, используя метод обратного рассеивания, для контроля микроструктуры корпусов ТУК.

В процессе выполнения работы проведен анализ конструкционного материала ВЧШГ, используемого для производства ТУК и исследование его микроструктуры. Изучены существующие методы контроля качества корпусов ТУК. Проанализированы теоретические основы ультразвукового метода неразрушающего контроля. Обосновано применение метода обратного рассеивания для контроля графитовых включений. Подготовлены экспериментальные образцы отливки из ВЧШГ. Ультразвуковой метод неразрушающего контроля являлся основным методом исследования. Референтный метод контроля – металлография.

В результате исследования разработана и апробирована методика оценки качества микроструктуры изделий на основе ультразвукового методов неразрушающего контроля посредством специализированного оборудования.

Область применения результатов выпускной квалификационной работы – контроль качества корпусов ТУК в процессе их изготовления и проектного срока эксплуатации.

## Определения, сокращения и нормативные ссылки

В данной работе использованы следующие нормативные документы:

ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов;

ГОСТ 12.0.003–74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы;

ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования;

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

СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение;

СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки;

В данной работе использовались следующие определения:

дефект: каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям;

литейные свойства: совокупность физико-химических свойств металлов, характеризующих их поведение в разных условиях изготовления отливок;

механические свойства: совокупность показателей, характеризующих сопротивление материала воздействию на него нагрузке, его способность деформироваться при этом, а также особенности его поведения в процессе разрушения;

предел прочности: механическое напряжение, выше которого происходит разрушение материала. Иначе говоря, это пороговая величина, превышая которую механическое напряжение разрушит некое тело из конкретного материала;

предел текучести: механическая характеристика материала, характеризующая напряжение, при котором деформации продолжают расти без увеличения нагрузки.



относительное удлинение: отношение абсолютного удлинения или уменьшения, т. е. приращения длины линейного элемента или образца или части их при растяжении, к их первоначальной длине.

надежность: свойство элемента сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования;

металлографические исследования: комплект испытаний и аналитических мероприятий направленных на изучение макро- и микроструктуры металлов.

В данной работе использовались следующие сокращения:

АЭС – атомная станция;

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;

ВЧ – высокопрочный чугун;

ВЧШГ – высокопрочный чугун с шаровидным графитом;

ГЦК – гранецентрированная кубическая решетка;

МАГАТЭ – Международное Агентство по Атомной Энергии;

МНОЛ НК – международная научно-образовательная лаборатория неразрушающего контроля;

НК – неразрушающий контроль;

НП – нормы и правила;

ОК – объект контроля;

ОТВС – облучённые тепловыделяющие сборки

ОЦК – объемцентрированная кубическая решетка;

ОЯТ – отработавшее ядерное топливо;

ПНАЭ – правила и нормы в атомной энергетике;

ПАВ – поверхностные акустические волны;

РВ – радиоактивные вещества;

СТО – стандарт организации;

ТУК – транспортно-упаковочный комплект;

ХТО – химико-термической обработка;

УЗ – ультразвук;

УЗК – ультразвуковой контроль;

ХТО – химико-термической обработка;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

IAEA– International Atomic Energy Agency;

ASTM - American Society for Testing and Materials;

DIN - Deutsches Institut für Normung.

## Содержание

Реферат .....	7
Определения, сокращения и нормативные ссылки .....	8
Введение.....	14
1 Высокопрочный чугун с шаровидным графитом.....	17
1.1 Сравнение конструкционных материалов: чугун, сталь, бетон .....	17
1.2 Содержание углерода в чугуне .....	21
1.3 Микроструктура чугуна с шаровидным графитом .....	24
1.4 Изготовление корпусов контейнера из ВЧШГ .....	27
2 Неразрушающие методы контроля для оценки качества микроструктуры ВЧШГ .....	32
2.1 Магнитный метод контроля микроструктуры ВЧШГ .....	33
2.2 Основные положения методики ультразвукового контроля .....	36
2.3 Акустический контроль микроструктуры ВЧШГ .....	42
2.4 Метод обратного рассеяния.....	47
2.4.1 Геометрическое рассеяние.....	51
2.4.2. Область рассеяния Ми .....	54
2.4.3. Рэлеевское рассеяние .....	56
3 Экспериментальная часть .....	62
3.1 Описание образцов .....	62
3.2 Описание экспериментального оборудования .....	64
3.3 Методика проведения эксперимента.....	66
3.4 Выявление граничной частоты .....	69
3.5 Измерение обратного рассеяния Рэлля .....	72

3.5.1	Измерение коэффициента обратного рассеяния.....	75
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	80
4.1	Технико-экономическое обоснование.....	80
4.1.2	Потенциальные потребители результатов исследования .....	80
4.1.3	SWOT-анализ.....	81
4.2	Планирование НИР.....	83
4.2.1	Планирование этапов и работ по выполнению НИР .....	83
4.2.2	Определение трудоемкости выполнения НИР .....	84
4.2.3	Разработка календарного плана работ .....	85
4.3	Определение плановой себестоимости проведения НИР .....	88
4.3.1	Состав затрат, включаемый в себестоимость НИР.....	88
4.3.2	Формирование и расчет затрат, включаемых в себестоимость.....	88
4.4	Оценка научно – технического уровня НИР .....	94
4.5	Анализ экономической эффективности НИР .....	95
5	Социальная ответственность .....	96
5.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов .....	97
	Продолжение таблицы 25.....	98
5.2	Разработка мероприятий по снижению уровней вредного и опасного воздействия и устранения их влияния при работе на ПЭВМ и ультразвуковой установке.....	99
5.2.1	Организационные мероприятия.....	99
5.2.2	Технические мероприятия.....	99
5.2.3	Условия безопасной работы.....	101
5.3	Электробезопасность.....	104
5.4	Пожаровзрывобезопасность .....	106

Заключение .....	107
Список публикаций студента.....	109
Список использованных источников .....	111
ПриложениеА .....	117
Приложение Б.....	133
Приложение В.....	134
Приложение Г .....	135

## Введение

Существование атомной энергетики невозможно без использования транспортно-упаковочных комплексов ТУК. В Российской Федерации принята концепция смешанного ядерного топливного цикла, в котором транспортирование и промежуточное хранение отработавшего ядерного топлива ОЯТ являются неотъемлемой частью. ТУК играет ключевую роль, выступая связующим звеном в транспортно-технологической схеме обращения с ОЯТ [1].

Согласно мировому опыту, корпус транспортного упаковочного комплекта может быть изготовлен или из легированной стали, бетона или из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом ВЧШГ. ВЧШГ – перспективный материал по безопасности и технико-экономическим показателям для корпусов ТУК. Углерод является важным и неотъемлемым элементом в структуре чугуна, его содержание обычно варьирует в пределах от 2,4 до 3,80 %. В зависимости от протекания процесса кристаллизации углерод может быть представлен в виде графита или цементита. Графитизация чугуна является важным процессом, поскольку именно от формы, количества и распределения графитовых включений зависят механические и литейные свойства материала. На структурообразование ВЧШГ влияют как легирующие элементы, так и условия его изготовления: температура, время. Так, серый и высокопрочный чугуны имеют одинаковое соотношение компонентов смеси, за исключением наличия модификаторов: Mg, Ca, Na или др. Данные элементы вводятся в жидкий чугун для получения правильной шаровидной формы включений графита. В литейном производстве наибольшее применение получил магний, процентное содержание которого в смеси составляет 0,03-0,05%. В результате, высокопрочный чугун характеризуется шаровидной формой включений графита и соответственно является мягким и ковким материалом, а серый чугун имеет включения графита пластинчатой формы и как следствие является твердым и хрупким.

Если в процессе литья корпуса контейнера было нарушено процентное содержание компонентов смеси или же сам процесс был выполнен ненадлежащим образом, то образуется литье с нарушением твердости, вследствие отклонения процентного содержания шаровидного графита в металлической основе. Из-за этих нарушений значительно изменяются механические свойства металла, поэтому на производстве необходим контроль качества чугуна с шаровидным графитом. При этом важную роль играет как однородное распределение включений графита в отливке, так и форма этих включений, поскольку именно от данных факторов зависят износостойкость, обрабатываемость материала резанием, механические и литейные свойства.

Каждый транспортно-упаковочный комплект после изготовления подвергается контролю для выявления наличия дефектов микроструктуры и возможных мест их зарождения [2]. В настоящее время микроструктура ВЧШГ контролируется преимущественно разрушающими методами анализа, что в свою очередь требует больших временных и экономических затрат. Существуют и неразрушающие методы контроля качества отливок для данной цели. Все более широкое применение получает ультразвуковой метод, который позволяет быстро, качественно и надежно протестировать ТУК на наличие несовершенств в структуре. Сущность метода заключается в выявление зависимости между формой графитовых включений и модулем упругости чугуна, которая влияет на скорость и затухание продольных ультразвуковых УЗ волн. Изменения значений данных величин оценивается с помощью измерения параметров УЗ сигнала при его прохождении через изделие. Информацию о графите получают по скорости УЗ, а о металлической основе – по его затуханию. При применении данного метода контроля следует учитывать факт, что скорость звука в свою очередь зависит не только от формы графита, но и от его концентрации и размера. При этом зависимость от формы графитовых включений наибольшая. Также измерение затухания – более сложная процедура, чем измерение скорости и соответственно

результаты таких измерений имеют значительно меньшую точность и большую погрешность.

В данной магистерской диссертации рассматривается возможность применения еще одного метода НК для контроля качества микроструктуры чугунного литья, основанного на принципе обратного рассеивания УЗ волн.

Таким образом, целью данной работы является проведение анализа применимости УЗ метода обратного рассеяния для определения содержания шарообразного графита в конструкционном материале пенала с ОЯТ.

Для достижения результата, в соответствии с поставленной целью работы, необходимо решить следующие задачи:

- анализ конструкционного материала ВЧШГ, используемого для производства ТУК и исследование его микроструктуры;
- изучение существующих методов контроля качества микроструктуры корпусов ТУК и анализ теоретических основ ультразвукового метода неразрушающего контроля для обоснования применимости метода обратного рассеяния;
- разработка методики оценки качества микроструктуры изделий из ВЧШГ УЗ методом обратного рассеяния;
- апробирование разработанного метода посредством специализированного оборудования.



# **1 Высокопрочный чугун с шаровидным графитом**

## **1.1 Сравнение конструкционных материалов: чугун, сталь, бетон**

Многие годы в России и за ее пределами было принято использовать стальные контейнеры для ОЯТ реакторов АЭС, атомных субмарин, атомного ледокольного флота, исследовательских реакторов, как и для радиоактивных отходов. Так, известны модели ТУК-6 для 30 ОТВС ВВЭР-440 и ТУК-10 для шести ОТВС ВВЭР-1000 с корпусом контейнера из углеродистой стали, ТУК-13В для 12 ОТВС ВВЭР-1000 с корпусом из низколегированной стали 06Н2М, а также ТУК-13/1В для 12 ОТВС ВВЭР-1000 с корпусом контейнера из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Первые три типа ТУК серийно выпускались заводом «Ждановтяжмаш», ТУК-13/1В – Ижорским заводом. Они эксплуатируются и по настоящее время [3].

В период разработки характеристики отечественных контейнеров в основном соответствовали мировому уровню. Однако со второй половины 80-х годов подобные контейнеры в России не разрабатывались, и к настоящему моменту технические параметры отечественных ТУК для ОЯТ ВВЭР существенно уступают зарубежным контейнерам. Большинство российских контейнеров изготовлены из ковальной легированной стали имеют существенные недостатки. Так, например, кованая легированная сталь, например марки Х18Н10Т [4], является весьма дорогой и не обеспечивает потребности в таких контейнерах, другой недостаток – высокий остаточный уровень излучения изделий после окончания их срока эксплуатации. В связи с этим невозможно вторично использовать эту сталь после окончания срока эксплуатации в металлургическом переплаве.

Определенными недостатками обладают также железобетонные контейнеры. Железобетонный контейнер для хранения и транспортирования отработавших сборок ТВЭЛ ядерного реактора, включает железобетонный корпус с внутренней стальной оболочкой, днищем и герметичными крышками

(НЗК-150-1,5П, НЗК-150-1,5П(С) и НЗК-Радон). Стоимость металлобетонных контейнеров должна быть ниже, чем контейнеров со стальным корпусом, поскольку их изготовление не требует наличия на заводах-изготовителях сложных производств, таких как сталелитейное и ковочное или чугунолитейное. Однако существенной экономии затрат использование бетона не дало. Уменьшилась стоимость материалов, но возросли производственные издержки. Кроме того, из-за низкой теплопроводности бетона область применения контейнеров такого типа ограничена.

В большинстве индустриально-развитых стран наиболее перспективным материалом по безопасности и технико-экономическим показателям для корпусов туков признан высокопрочный чугун с шаровидным графитом с ферритной металлической основой. Наличие в высокопрочном чугуне графита обеспечивает дополнительную защиту от радиоактивных излучений.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом является уникальным конструкционным материалом, с которым по разнообразию его технического применения сейчас не может сравниться ни один металлический сплав. ВЧШГ обладает комплексом ценных физико-химических свойств, которые в сочетании с его высокими прочностными характеристиками (от 400 до 1600 МПа) и, особенно, повышенной пластичностью (до 25%) делают незаменимым его применение для производства изделий самого ответственного назначения: корпуса контейнеров для перевозки и хранения ОЯТ массой свыше 100 тонн.

Главное достоинство ВЧШГ в сравнении со стальными контейнерами это более высокая коррозионная стойкость. Также высокопрочный чугун с шаровидным графитом выгодно отличается от стали хорошими литейными свойствами (высокой жидкотекучестью, малой склонностью к образованию горячих трещин, меньшей усадкой и т.д.), относительной простотой процесса выплавки и меньшей стоимостью [5]. Кроме того, к свойствам высокопрочного чугуна относятся: хорошая обработка резаньем, высокая пластичность, низкая чувствительность к концентраторам напряжения, устойчивость к циклическим

нагрузкам. В таблице 1 приведено сравнение технических характеристик ВЧШГ с бетоном.

Таблица 1 – Высокопрочный чугун в сравнении с бетоном

Технические данные	Высокопрочный чугун	Бетон
Предел прочности, МПа	450	350
Защита от гамма-излучения, см	2,5	6,1
Максимальная рабочая температура, °С	600	300
Экономика	Более высокий уровень цен	Более низкий уровень цен
Защита от радиации, г/см <sup>3</sup>	7,1	2,3
Сопротивление высоким нагрузкам	Превосходная (одна отливка)	Низкая (сварка приводит к трещинам/ газообразованию)
Прекращение формирования трещин	Превосходная	Средняя (сварка)
Температурное сопротивление	Превосходная	Хорошая (бетон растрескивается при высоких температурах/ газообразование)

В настоящее время наиболее перспективной конструкцией ТУК, предназначенных для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива ОЯТ атомных электростанций АЭС и других объектов, использующих ядерное топливо, в мире признаны контейнеры типа Castor немецкой фирмы GNS с корпусом контейнера, изготовленным из чугуна марки GGG40 (DIN 1693). Российский аналог такого чугуна ВЧ40 ГОСТ 7293-85 [6].

Высокопрочный чугун соответствует высоким требованиям, присутствующим во многих областях атомной промышленности, в том числе:

- динамические пиковые нагрузки;
- циклическое нагружение.

С середины 1980-х годов немецкая компания Siempelkamp изготавливает контейнеры для транспортировки и хранения ОЯТ из ковкого чугуна с шаровидным графитом и уже много лет является лидером на этом рынке. Партнером Siempelkamp является российская компания АО «АЭМ-технологии» «Петрозаводскмаш». Данная организация осуществляет производство крупнотоннажных ТУК-146 для российского рынка, которые являются аналогами зарубежных контейнеров Castor, рисунок 1.



Рисунок 1 – Конструкция и материалы ТУК-146

Предприятием освоено производство базовой модели – ТУК-146. Высокопрочный чугун характеризуется энергосберегающим производством и высокой гибкостью в части внедрения компонентов (форма/конструкция, вес). В связи с перспективами использования, высокопрочный чугун становится очень востребованным материалом [7].

## 1.2 Содержание углерода в чугуне

Сплав железа с углеродом более чем 2,14 % называется чугуном. Железо имеет две полиморфные модификации: альфа  $\alpha$  и гамма  $\gamma$ . Модификация альфа существует при температурах ниже  $911^{\circ}\text{C}$  и выше  $1392^{\circ}\text{C}$ ; гамма-железо – при температуре  $911-1392^{\circ}\text{C}$ . В зависимости от температуры и концентрации углерода в железоуглеродистых сплавах (сталях и чугунах) образуются следующие твердые фазы: феррит, аустенит, цементит, графит.

Углерод в чугуне может содержаться в виде цементита или графита. В зависимости от формы графита и количества цементита, выделяют белый, серый, ковкий и высокопрочный чугуны. Высокопрочный чугун имеет в своей структуре шаровидный графит, который образуется в процессе кристаллизации.

Наиболее широкое распространение получили чугуны с содержанием углерода в пределах 2,4–3,8%. Чем выше содержание углерода, тем больше образуется графита и тем ниже его механические свойства, следовательно, количество углерода не должно превышать 3,8 %. В то же время, для обеспечения высоких литейных свойств углерода должно быть не менее 2,4%. Углерод способствует графитизации и ферритизации матрицы [8].

Положительные стороны наличия графита:

- графит улучшает обрабатываемость резанием, так как образуется ломкая стружка;
- чугун имеет лучшие антифрикционные свойства, по сравнению со сталью, так как наличие графита обеспечивает дополнительную смазку поверхностей трения;
- из-за микропустот, заполненных графитом, чугун хорошо гасит вибрации и имеет повышенную циклическую вязкость;
- детали из чугуна не чувствительны к внешним концентраторам напряжений (выточки, отверстия, переходы в сечениях);

– наличие в высокопрочном чугуна графита обеспечивает дополнительную защиту от радиоактивных излучений [9].

Но с другой стороны графитовые включения можно рассматривать как соответствующей формы пустоты в структуре чугуна. Около таких дефектов при нагружении концентрируются напряжения, значение которых тем больше, чем острее дефект, рисунок 2.

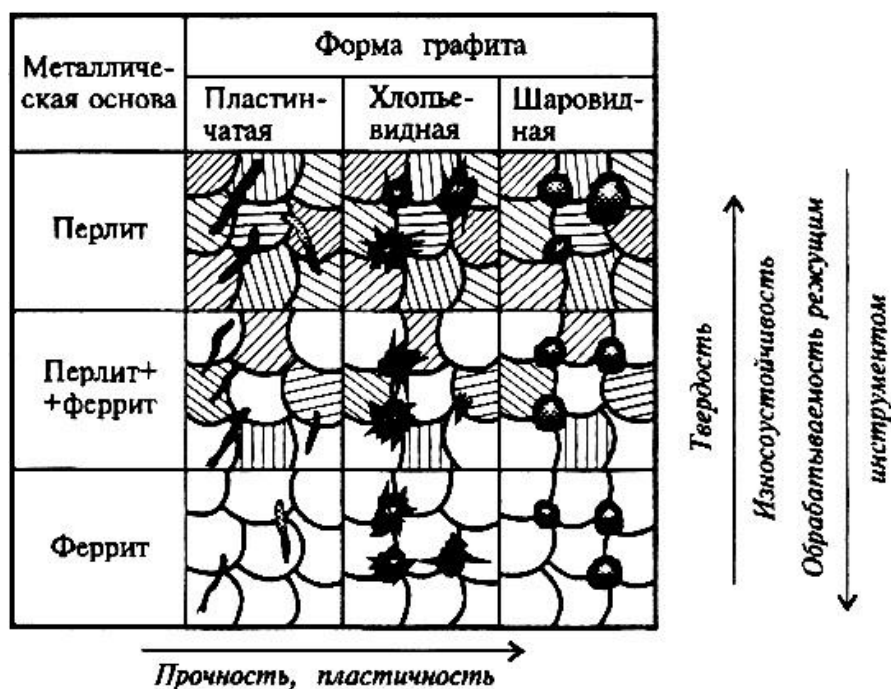


Рисунок 2 – Влияние металлической основы и формы графитных включений на механические и технологические свойства чугунов

Включения графита, особенно пластинчатой формы, действуют на металлическую основу чугуна как надрезы, снижающие ее механическую прочность и пластичность, рис. 3. Поэтому чугуны, несмотря на сходство по составу со сталями, обладают меньшей прочностью и большей хрупкостью. Чем больше по количеству и размерам включения графита в чугуне, тем меньше его прочность. Наиболее высокими механическими свойствами обладают высокопрочные чугуны с шаровидной формой графита. Деформационная способность ВЧШГ и его физико-механические свойства, при обычной и пониженной температурах в сильной степени зависят от состава, а также формы, размеров и характера распределения графитных включений в

структуре металлической основы. Для повышения механических свойств чугуна применяются следующие виды термической обработки: отжиг, нормализация, закалка и отпуск [10].

В таблице 2 для сравнения представлены механические свойства стандартного серого и ковкого чугуна, которые напрямую зависят от формы графитовых включений.

Таблица 2 – Механические свойства серого и ковкого чугуна.

Чугун	Тип фазы	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Серый	Феррит	170	140	0,4
	Перлит	275	240	0,4
Высокопрочный	Феррит	415	275	18
	Перлит	550	380	6

Как видно из таблицы высокопрочный чугун превосходит по всем параметрам серый чугун, но и он имеет свои недостатки, к которым можно отнести повышенную склонность к объемной усадке, склонность к образованию холодных трещин и повышенные требования к шихтовым материалам и плавильным агрегатам.

Кроме того, важным недостатком высокопрочного чугуна является то, что он не обеспечивает необходимый уровень механических свойств и однородной структуры в отливках с толщиной стенки контейнера для хранения и транспортирования радиоактивных материалов РМ более 400 мм. Включения графита в чугуне являются микроконцентраторами внутренних напряжений и в местах, где наблюдается отклонение от равномерного распространения графитовых включений шаровидной формы, могут концентрироваться значительные напряжения, приводящие к разрушению. В работе [11] создана марка высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, обеспечивающего в отливках с толщиной стенки более 400 мм требуемый уровень прочностных характеристик за счет стабильного получения правильной шаровидной формы

графита в толстых сечениях отливки, измельчения литого зерна и повышения однородности микроструктуры, рисунок 3.

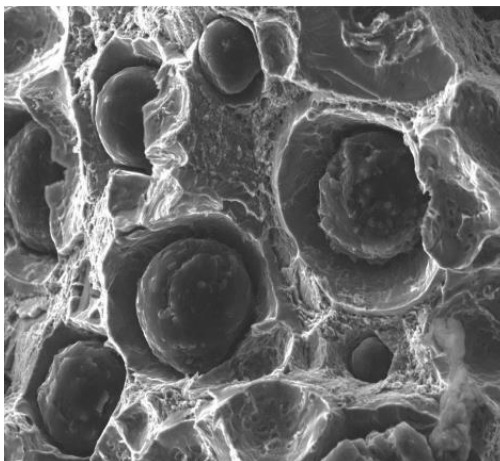


Рисунок 3 – Графитовые гранулы в отливке из высокопрочного чугуна

Технический результат, достигаемый при реализации предлагаемого изобретения, состоит в повышении структурной однородности и механических характеристик ВЧШГ в крупнотоннажных и толстостенных отливках (до 150 т) за счет стабильности получения более 90% правильной шаровидной формы графита и его равномерного распределения в материале. Таким образом, контроль процентного содержания графита в структуре, его распределение и форма, важный фактор для обеспечения надежности и качества изделия ответственного назначения для заказчика.

### **1.3 Микроструктура чугуна с шаровидным графитом**

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом или ВЧШГ – это конструкционный материал, обладающий высокими прочностными свойствами и хорошими эксплуатационными характеристиками. Как известно, в чугунах форма зерна графита оказывает определяющее влияние на прочностные характеристики материала. В высокопрочном чугуне ВЧШГ графитные включения имеют шаровидную форму, рисунок 4. Вследствие чего ВЧШГ по



механическим свойствам значительно превосходит серый чугун и успешно конкурирует со сталью [12].

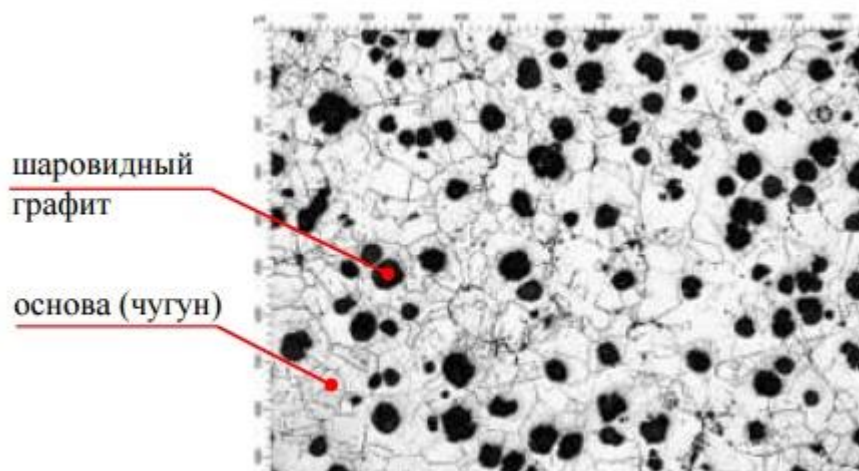


Рисунок 4 – Микроструктура ферритного высокопрочного чугуна

Получают высокопрочный чугун добавкой в жидкий чугун небольшого количества щелочных или щелочноземельных металлов, которые округляют графитные включения в чугуне, что объясняется увеличением поверхностного натяжения графита. Чаще всего для этой цели применяют магний в количестве 0,03-0,07%. По содержанию других элементов высокопрочный чугун не отличается от серого.

Шаровидные графитные включения в наименьшей степени ослабляют металлическую основу. Именно поэтому высокопрочный чугун имеет более высокие механические свойства, чем серый (который имеет пластинчатые графитные включения). При этом он сохраняет хорошие литейные свойства, обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации и т.д.

Механические свойства ВЧШГ зависят от ряда факторов: химического состава чугуна, структурного состояния металлической основы, формы графита, толщины стенки отливки и др. Однако, для повышения пластических свойств, как уже отмечалось, главным является преимущественно ферритная структура металлической основы (>80%), низкое содержание фосфора и серы, пониженное содержание марганца в чугуне [12]. Технические характеристики ВЧШГ при комнатной температуре представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики

Характеристика	Значение
Предел текучести	$\geq 230$ МПа
Предел прочности	$\geq 330$ МПа
Относительное удлинение	$\geq 8\%$
Вязкость разрушения	$\geq 50$ МПа (при $-40^\circ\text{C}$ )
Плотность	$\geq 7,1$ г/см <sup>3</sup>
Коррозия	После первичной коррозии формируется плотная, прилегающая, защитная оксидная пленка.

Прочностные характеристики ферритного ВЧШГ с понижением температуры от  $+20$  до  $-150$  °С заметно возрастают, тогда как относительное удлинение практически не изменяется, а ударная вязкость, особенно при повышенном содержании фосфора ( $> 0,01\%$  Р) и марганца ( $> 0,3\%$  Мн) при температуре  $-40^\circ\text{C}$  снижается в 2-2,5 раза. В чугунах, кроме железа и углерода, содержится (в качестве обычно определяемых постоянных примесей) кремний, марганец, фосфор и сера. Чугуны содержат также незначительные количества кислорода, водорода и азота [10]. Процентное соотношение данных элементов приведено в таблице 4.

Таблица 4 – Соотношение компонентов в ВЧШГ

Элемент	мас. %.
Углерод	2,40-3,80
Кремний	1,80-2,80
Марганец	0,10-1,00
Фосфор	0,01-1,00
Сера	0,01- 0,03

Изменяя химический состав ВЧШГ, а также скорость кристаллизации и температуру термической обработки, можно в значительной степени добиться желательных свойств чугуна. С повышением содержания кремния возрастает предел прочности при растяжении, при дальнейшем увеличении содержания -

уменьшаются предел прочности при растяжении и относительное удлинение. С повышением содержания марганца уменьшается доля феррита и увеличивается количество перлита; при этом повышается предел прочности при растяжении и уменьшается относительное удлинение. Для повышения износостойкости содержание марганца увеличивают до 1,0-1,3%. Чем выше содержание серы в исходном чугуна, тем труднее получить полностью шаровидную форму графита и, следовательно, высокие механические свойства. Фосфор, в свою очередь, оказывает существенное влияние на структуру и механические свойства. Чтобы получить чугун с высокой пластичностью, содержание фосфора не должно превышать 0,08% [11].

### 1.4 Изготовление корпусов контейнера из ВЧШГ

Процесс литья корпуса контейнера разделен на ряд последовательных этапов, каждый из которых влияет на конечное качество отливки. На рисунке 5 показана блок-схема процесса изготовления с акцентом на основные этапы производства.

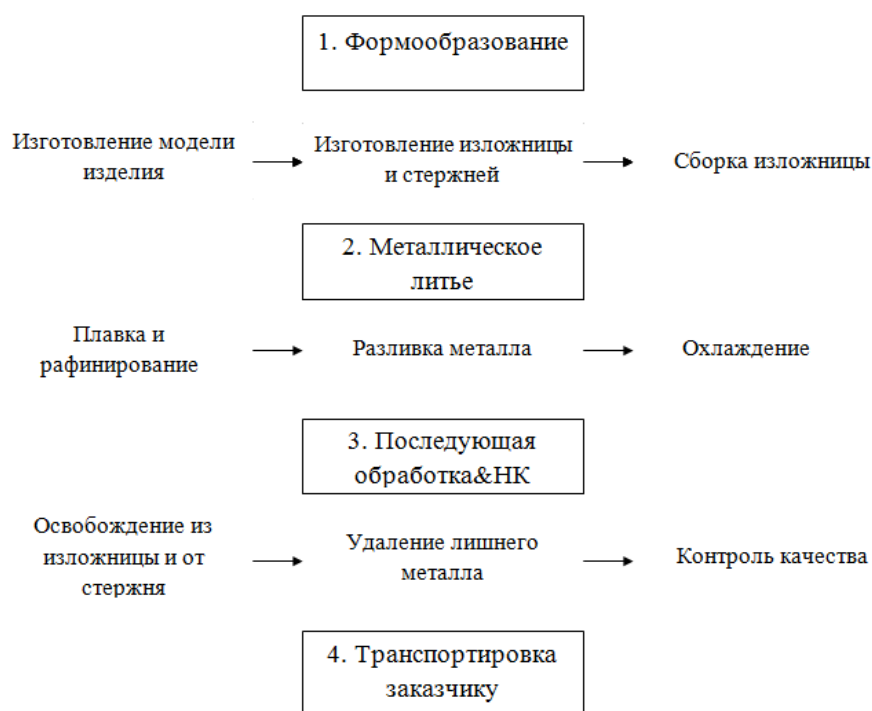


Рисунок 5 – Стандартные операции при производстве ВЧШГ

На процесс формирования микроструктуры в значительной степени оказывает влияние процесс отливки контейнера, который состоит из этапов: плавка и рафинирование металла, разливка металла в изложницу и охлаждение отливки.

Отобранное сырье и присадки наряду с химическим анализом обеспечивают безопасное изготовление в электрических печах, процесс отливки занимает менее 120 секунд, а многократно используемая литейная форма обеспечивает быструю кристаллизацию и тем самым оптимальную микроструктуру. Объем расплавленного чугуна достигает 160 метрических тонн. Основная схема изготовления отливки представлена на рисунке 6.

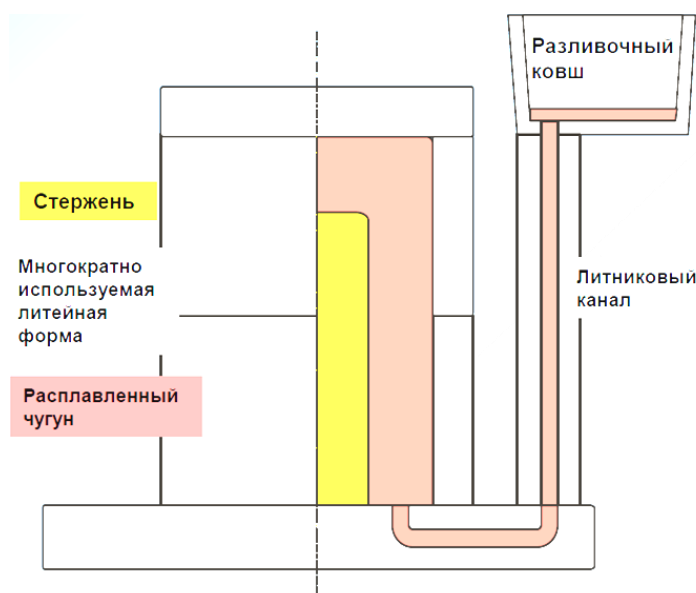


Рисунок 6 – Основная схема изготовления отливки

Ограничение турбулентности в процессе производства контейнера становится возможным благодаря использованию технологии вертикального литья. Главное преимущество данной технологии – равномерное распределение температуры и тепловой нагрузки, в результате чего, изложница заполняется равномерно, а это в свою очередь приводит к сокращению дефектов структуры. Также данная система позволяет перенести частицы остаточного шлака на дно контейнера, что упрощает процесс механической обработки.

После изготовления качество контейнера контролируется оператором, который с помощью методов НРА выявляет наличие дефектов. Согласно классификации выделяют следующие типы дефектов: несоответствие по геометрии или структуре, дефекты поверхности, несплошности в теле отливки и инородные включения. Ко всем деталям применяют визуальный контроль невооруженным глазом или при помощи лупы. Для выявления дефектов поверхности применяют методы дефектоскопии, обнаружения внутренних дефектов возможно с помощью рентгеноструктурного анализа, ультразвукового анализа методом фазированных решеток или же при помощи обычных автоматизированных методов УЗ. В результате контроля получают информацию о геометрии и плотности изделия, которую в дальнейшем используют для определения положения дефектов в толстостенных отливках.

В структуре ВЧШГ возможно обнаружение следующих типов дефектов: образование различных типов раковин в отливке, газовые поры, шлаковые включения, трещины, а также неравномерное содержание графита в структуре и его отклонение от правильной сфероидальной формы, что является причиной снижения ударной вязкости детали. Некоторые возможные дефекты литья представлены на рис 7.



Рисунок 7 – Микрофотография образования усадочной раковины

Формирование неправильной шаровидной формы и как следствие образование пластинчатого графита обусловлено избыточным или недостаточным добавлением легирующих примесей или неправильной обработкой модификатором Mg. Модификатор необходим для придания

правильной шаровидной формы графитовым включениям, при его отсутствии включения приобретают угловатую форму.

На рисунке 8 показан процесс образования пластинчатого, хлопьевидного и шарообразного графита. Как уже упоминалось выше, химический состав играет ключевую роль в формообразовании, и если на самой ранней стадии произошло формирование пластинчатого или хлопьеобразного графита, получить правильную сферичную форму уже не представляется возможным.

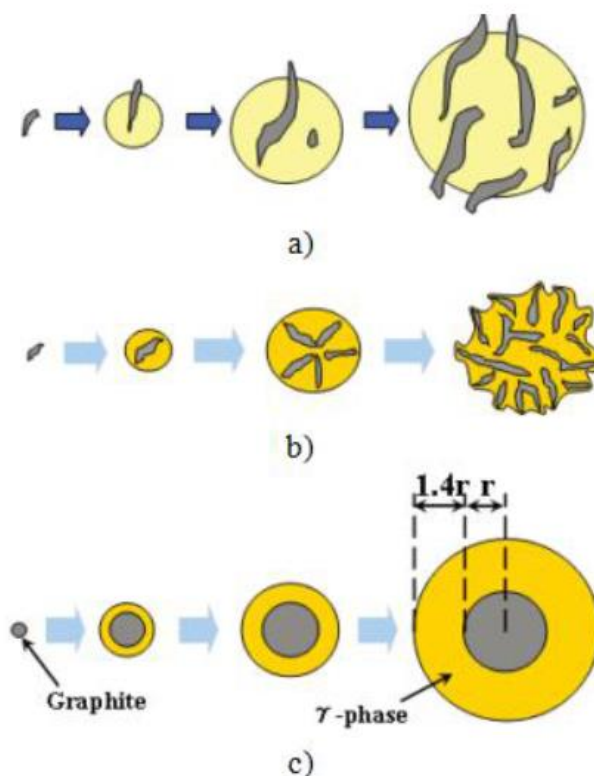


Рисунок 8 – Формообразование а) пластинчатая б) хлопьевидная с) шаровидная

Для идентификации вида, формы, размера, количества и распределения графитовых включений в структуре чугуна применяют разрушающий метод анализа – металлографический ГОСТ 3443-87 [13]. Микроструктурный метод исследования металлов содержит следующие этапы:

- вырезка образца из детали для последующего изучения;
- приготовление микрошлифа;

- травление поверхности микрошлифа специальными реактивами (выявление микроструктуры);
- исследование шлифа под микроскопом.

В зависимости от этапов производственного процесса, возможно применение различных методов НК для оценки критерия соответствия качества литья требованиям. Существуют такие подходы, как ультразвуковая диагностика с фазированной решеткой, рентгеновская радиография, магнитные и вихретоковые методы контроля поверхностных и подповерхностных слоев, контроль проникающей жидкостью и визуальный контроль [14]. Данные методы микроструктурного анализа основаны на корреляционных связях между физико-химическими, механическими свойствами и структурными состояниями материала и его магнитными характеристиками.

Широкое применение неразрушающих методов контроля, не требующих вырезки образцов или разрушения объектов исследования (в отличие от разрушающих), позволяет избежать больших потерь времени и материальных затрат, обеспечить частичную или полную автоматизацию операций контроля при одновременном значительном повышении качества и надежности контролируемого изделия.

## **2 Неразрушающие методы контроля для оценки качества микроструктуры ВЧШГ**

Проблема неразрушающего контроля качества изделий из чугуна в настоящее время относится к приоритетным прикладным задачам. Это обусловлено ростом потребления чугуна в атомной промышленности и требований к качеству изготавливаемых изделий. Процентное содержание графита в металлической матрице, его форма, размер, а также распределение являются ключевыми факторами, которые влияют на свойства материала ковкого чугуна, поэтому контроль шаровидных включений в чугунных отливках является важным шагом в обеспечении качества деталей.

В нашей стране применяется вихретоковый метод, он основан на применении коэрцитивной силы и метода эффекта Баркгаузена. Данный метод позволяет оценить микроструктуру объекта контроля на основе различий электрических свойств (электропроводность и магнитная проницаемость) между неметаллическими включениями и металлической матрицей. Этот метод проведения инспекции занимает считанные секунды и не нарушает целостности образца [15-17].

В 2013 году был предложен новый метод для идентификации объемных дефектов в структуре ВЧШГ. Он основан на применении метода инфракрасной термографии для определения параметров, которые указывают на наличие объемных дефектов в ковком чугуне. Для подтверждения работоспособности метода были изготовлены образцы с искусственными дефектами и без, значение предела усталости которых изменялся по синусоидальному закону в течение короткого промежутка времени. В это время с помощью высокоскоростной инфракрасной камеры была сделана серия ИК-изображений. После стабилизации изображения, анализировалась временная зависимость от уровня яркости с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ). В результате было получено значение и фазовый сдвиг основной частоты локальной мощности ИК-излучения. Результаты экспериментов и



моделирования показали, что дефекты могут быть обнаружены на основе среднего и стандартного отклонения распределений фазового сдвига на поверхности образцов [18]. Данный метод НК реализован в условиях использования циклического нагружения, термографического анализа и ДПФ. Экспериментальные данные сравнивались с результатами моделирования. Дефекты детектировались при фазовом сдвиге между циклической нагрузкой и первой гармоникой интенсивности ИК. Необходимо совершить как минимум 175 циклов изменения напряжения, чтобы обнаружить дефект.

Известность получили акусто-реверберационные методы, которые построены на анализе амплитуды и спектра свободных колебаний в изделии. Эти методы являются интегральными и успешно работают только на отливках простой формы [19-22]. В этом случае в качестве выходных пара метров используются декремент затухания  $A$ , обусловленный поглощением и рассеянием упругих волн на микронеоднородностях металла (графитовых включениях), и упругие константы материала, зависящие от основы и формы графитовых включений. Однозначного ответа о структуре графита описанные выше методы не дают, в особенности в изделиях сложной формы.

Другим конкурентоспособным методом анализа микроструктуры чугунных отливок является магнитная структуроскопия [23]. Подробное описание данного метода НК представлено в следующей главе.

## **2.1 Магнитный метод контроля микроструктуры ВЧШГ**

Магнитный контроль или магнитная структуроскопия чугунных отливок основана на ферромагнитных свойствах материала, а именно на различии данных свойств структурных составляющих чугуна. Сущность метода заключается в определении основных магнитных характеристик материала (коэрцитивной силы, индукции, остаточной намагниченности, магнитной проницаемости). Эти характеристики, как правило, зависят от структурного состояния сплава, подвергаемого различной термической обработке[23-27].

На производстве для магнитной структуроскопии уже много десятилетий широко и успешно применяется метод, основанный на измерении коэрцитивной силы  $H_c$  металла в точке контроля. Приборы, реализующие этот способ контроля, обычно называют коэрцитиметры или магнитные структуроскопы. Они предназначены для определения физико–механических свойств или химического состава объекта контроля. Данные приборы способны измерить коэрцитивную силу лишь небольших по размерам изделий целиком, точность данного метода низка, значение коэрцитивной силы определяется в среднем. Контроль чугунных отливок данным методом НК основан на различии магнитных свойств между структурными компонентами ВЧШГ. Нет закономерности между количеством углерода и магнитными свойствами чугуна, так как определяющее влияние на них оказывает состояние, а не содержание углерода в чугуне [28]. Изменение формы графитовых включений приводит к изменению магнитной жесткости чугуна, так как графит можно рассматривать как немагнитные включения, являющиеся местами образования внутренних размагничивающих полей. В результате чего коэрцитивная сила изменяет свое значение в пределах, доступных для надежной регистрации. Для измерения коэрцитивной силы, магнитная цепь измерительного устройства должна создавать сильное магнитное поле для насыщения объекта контроля и иметь индикатор магнитного потока магнитной системы, включающий в себя объект контроля. Принцип работы таких приборов состоит в исполнении следующей последовательности операций:

- намагничивание контролируемого участка детали накладным преобразователем;
- последующее размагничивание этого участка нарастающим полем;
- фиксации напряженности поля, соответствующей коэрцитивной силе (это происходит в процессе выполнения предыдущего пункта).

По величине силы тока размагничивания делают выводы о наличии графитовых включений в контролируемой зоне.

Использование данного метода позволяет избежать разрушения образцов и сократить расходы на проведение инспекций, что делает неразрушающий метод контроля перспективным [29].

В Германии (Фраунгоферский институт неразрушающих методов контроля) разработан магнитный микроструктурный анализ ЗМА (Micromagnetic Multiparameter Microstructure and stress Analysis - микромагнитный микроструктурный многопараметрический метод анализа). Сейчас данная процедура контроля полностью автоматизирована, является широко востребованной и применяется в производстве крупных промышленных компаний. Магнитный микроструктурный анализ основан на выявлении различными способами магнитных полей рассеяния, возникающих над нарушениями микроструктуры, и на определении магнитных свойств объекта диагностики. Данный метод позволяет охарактеризовать объект контроля на глубине до 8 мм, т.е. приповерхностный слой, однако, не всегда возможно получить полное представление о микроструктуре материала. Суть метода заключается в комбинации и сопоставлении данных от различных процессов измерений, а именно оценивается эффект Баркгаузена, дифференциальная магнитная проницаемость, анализ содержания гармоник магнитного поля и результаты многочастотного вихретокового контроля. По распределению внешнего магнитного поля происходит восстановление намагниченности [30]. При этом сама намагниченность разделяется на составляющие, обусловленные различной природой возникновения: медленно меняющаяся намагниченность, которая возникает вследствие намагничивания внешними магнитными полями отдельных источников; быстрая меняющаяся намагниченность, обусловленная магнитными зарядами вблизи микродефектов сплошности, моделью которых может являться магнитный диполь, и шумоподобная составляющая намагниченности, обусловленная наличием межзеренных границ доменов ферромагнетика.

С помощью данного метода, возможно, оценить: жесткость, предел прочности и текучести, глубину твердого слоя, остаточное напряжение и исследовать микроструктуру приповерхностного слоя.

Наиболее важными компонентами измерительной системы ЗМА являются зонд и аппаратная часть с интегрированным контроллером. Зонд состоит из блока намагничивания и блока передатчик / приемник, он может быть адаптирован и настроен для любой геометрии изделия, в соответствии с конкретными требованиями заказчика.

К сожалению, рассмотренные микромагнитные методы неразрушающего контроля обладают существенным недостатком основанным на их физической сущности. Ограничение магнитного метода – в его применимости к контролю только ферромагнитных материалов и изделий из них. Также контроль производится контактным способом, что предъявляет дополнительные требования к форме и чистоте поверхности изделия. Данным неразрушающим методом контроля структуры, возможно, исследовать лишь поверхность изделия, небольшого размера, глубина контролируемого слоя при этом минимальна, также магнитный метод не обладает достаточной локальностью.

Проведя анализ существующих методов неразрушающего контроля, было выявлено, что ультразвуковые методы в перспективе могут обеспечить эффективный контроль качества чугунных отливок. Для обоснования выбора данного метода неразрушающего контроля в решении поставленной задачи необходимо подробнее рассмотреть физические принципы ультразвуковой диагностики.

## **2.2 Основные положения методики ультразвукового контроля**

Все более широкое применение для контроля отливок из ВЧШГ получает ультразвуковой метод [31]. Акустические методы основаны на регистрации параметров упругих колебаний, возбуждаемых и возникающих в

контролируемом объекте. Акустические методы характеризуются высокой чувствительностью к любым изменениям микроструктуры. При акустическом контроле обычно используют колебания с частотой 0,5-25 МГц, т.е. ультразвуковые.

К главным преимуществам ультразвукового контроля относятся:

- точность и скорость исследования, а также его низкая стоимость;
- безопасность для человека;
- высокая мобильность;
- возможность проведения ультразвукового контроля (в отдельных случаях) на действующем объекте, т.е. на время проведения УЗК не требуется выведения контролируемой детали/объекта из эксплуатации;
- при проведении УЗК исследуемый объект не повреждается.

Таким образом, акустический контроль является одним из основных физических методов диагностики состояния материалов, изделий, биологических объектов, окружающей среды. Высокая чувствительность, информативность, достоверность, оперативность диагностических операции привели к тому, что акустический контроль занимает ведущее место в ряду других методов контроля. При контроле акустическими методами регистрируют частоту, амплитуду, время, механический импеданс (затухание), спектральный состав колебаний. Применяют продольные, сдвиговые, поперечные, поверхностные и нормальные акустические волны. Режим излучения колебаний может быть непрерывным или импульсным. Поведение волн зависит в первую очередь от структуры среды, в которой происходит распространение. Если материал однородный, то ультразвуковые волны не изменяют траекторию своего движения. В ультразвуковой дефектоскопии и структуроскопии особый интерес представляет изучение распространения акустических волн в неоднородной среде.

При прохождении волной через одну среду в другую, на границе этих сред, имеющих различное акустическое сопротивление, энергия разделится на

части. Соответственно, часть энергии будет отражаться в первую среду, а другая часть проходить во вторую. При этом, угол отражения равен углу падения, а энергия, проходящая во вторую среду, подчиняется закону преломления Снеллиуса: отношение синусов углов падения и отражения равно отношению скоростей звука в обеих средах.

Важной характеристикой, обуславливающей поведение волны в среде является акустическое сопротивление. Оно определяется формулой:

$$Z = \rho v, \quad (1)$$

где  $Z$  – сопротивление;

$\rho$  – плотность материала;

$v$  – скорость распространения волны.

Потеря энергии при прохождении через границу сред, соответствующая уменьшению амплитуды определяется формулой:

$$dB = 10 \ln \left[ \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right], \quad (2)$$

Потеря энергии при отражении от границы сред, соответствующая уменьшению амплитуды определяется формулой:

$$dB = 10 \ln \left[ \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right], \quad (3)$$

При проведении инспекции ультразвуковая волна проходит через контролируемый образец, претерпевая отражение, либо возвращается в исходное положение, т.е. к источнику излучения волны, либо сигнал поступает на приемник, находящийся в противоположной позиции. Полученные сигналы подвергается обработке (усиление) и анализу. Процедура получения сигнала зависит от выбранного метода контроля [32].

В процессе прохождения волны через среду происходит ее трансформация – превращение одного типа волн в другой. При некотором угле падения продольной волны наступает явление, при котором продольная преломленная волна пойдет по поверхности раздела, образуется поверхностная головная волна. Этот угол падения – первый критический, рис. 8,слева. При дальнейшем увеличении угла падения продольной волны во второй среде не

возбуждаются объемные волны, в данном случае образуется поверхностная Рэлеевская волна, а угол падения является вторым критическим углом, рис, в центре. По мере увеличения угла падения поперечной волны продольная преломленная волна будет распространяться по поверхности раздела [33]. Этот угол падения называется третьим критическим углом, рис. 8, справа.

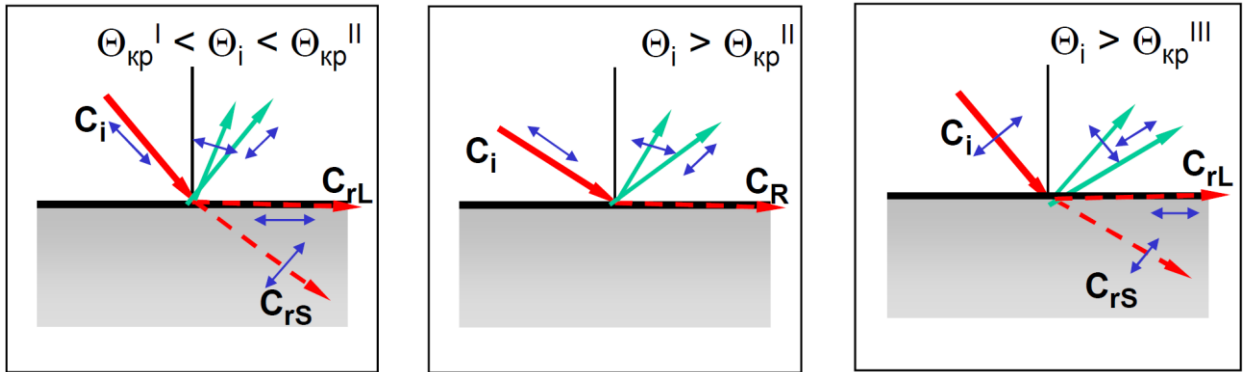


Рисунок 8 – Критические углы

Ультразвуковая волна генерируется пьезоэлектрическим датчиком. Его работа основана на использовании пьезоэлектрического эффекта. Суть явления заключается в том, что некоторые материалы (кварц, титанат бария, титанат-цирконат свинца и др.) меняют свои размеры под действием переменного электрического тока, что в свою очередь порождает акустическую волну. Пьезоэлектрическую пластину помещают в специальном устройстве-пьезопреобразователе (искателе). Материалы, используемые в пьезопреобразователях: плексиглас, капролон, фторопласт, полистирол, – способствуют гашению отраженной волны, так как имеют большие коэффициенты затухания ультразвуковых колебаний и малую скорость их распространения. Выбор датчика зависит от глубины исследуемого образца и его структуры. Они характеризуются рабочей частотой, эффективным размером (апертурой) и возможностями фокусировки. Чем больше частота кристалла преобразователя, тем меньшую глубину проникновения будут иметь производимые им волны.

Фокусировка достигается или путем придания преобразователю специальной формы, или с помощью акустической линзы, или электронным способом в многоэлементных преобразователях, или комбинацией перечисленных способов. Интервалы фокусировки по глубине от 1 до 4 см (ближняя зона), от 4 до 8 см (средняя зона) и от 6 до 12 см (дальняя зона). Размер зоны фокусировки изменяется в зависимости от размера апертуры и частоты преобразователя.

Рассмотрим более подробно процесс распространения ультразвука. В непосредственной близости к преобразователю волна распространяется в виде параллельного пучка лучей. Если рассматривать пьезоэлектрическую пластину, как набор большого количества элементарных излучателей, то следует учитывать, что расстояния от разных излучателей до некоторой точки могут сильно отличаться. Соответственно, отличаются и фазы приходящих сигналов. При совпадении фазы амплитуда увеличивается, если фазы противоположны – амплитуда уменьшается. Энергия находится в пределах нерасходящегося пучка. Эта область называется ближней зоной, ближним полем или зоной Френеля [34]. Ближняя зона заканчивается на границе последнего максимума. Это расстояние показывает величину ближней зоны преобразователя ( $N$ ). На границе ближней зоны располагается зона естественного фокуса – это зона поля ультразвукового преобразователя, где оно имеет минимальную ширину и максимальную интенсивность, описывается термином "фокальная зона". Границы фокальной зоны согласно ГОСТ Р ИСО 5577-2009 определяются падением максимальной интенсивности поля на 6 дБ. Для нефокусированного преобразователя с пьезопластиной диаметра  $D$  фокальная зона располагается на конце ближней зоны. Ширина поля в этом месте (т.н. естественный фокус) на уровне -6дБ составляет  $0,25D$  или фокальная зона, она соответствует естественному фокусу преобразователя. УЗ лучи в данной области узконаправлены, а интенсивность максимальна, другими словами это область в окрестности максимума звукового давления в ультразвуковом пучке.



Дальняя зона, это область за  $N$ , где давление звукового поля постепенно падает до нуля.

Расстояние ближнего поля является функцией частоты датчика, диаметра пьезоэлемента, и скорости звука в исследуемом материале, как показано в уравнении:

$$N = D^2 f / 4v, \quad (4)$$

где  $N$  – длина ближней зоны;

$D$  – диаметр пьезоэлемента;

$f$  – частота;

$v$  – скорость звука в материале.

В дальней зоне появление максимумов и минимумов под влиянием разности фаз приходящих волн происходит, только когда точка находится в стороне от оси преобразователя. Основная часть поля имеет вид расходящихся конусом лучей из центра преобразователя. Максимум амплитуды соответствует оси преобразователя. С увеличением угла между направлением какого-либо луча и осью амплитуда уменьшается, рис. 9. Угол раскрытия определяет направленность излучения. За пределами некоторого угла (угла раскрытия) излучение почти не чувствуется.

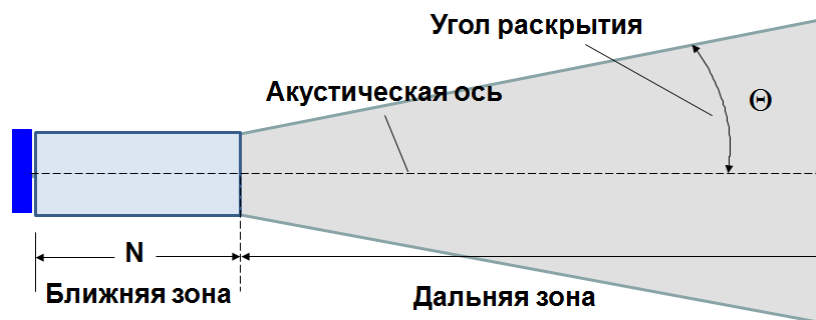


Рисунок 1 – Угол раскрытия луча ультразвуковой волны

$$N \approx \frac{a^2}{\lambda}, \quad (5)$$

$$N \approx \frac{a^2 \cdot \cos \alpha}{\lambda \cdot \cos \beta}, \quad (6)$$

$$\Theta_{0,1} \approx \sin^{-1} \left( n \cdot \frac{\lambda}{a} \right), \quad (7)$$

где  $a$  – радиус круглого пьезоэлемента;  
 $\alpha$ – угол ввода;  
 $\beta$ – угол призмы;  
 $\lambda$  – длина волны;  
 $\Theta$ - угол раскрытия по уровню (-20) дБ;  
 $n$  – коэффициент, равный 0,45 для круглой и 0,38 для прямоугольной пьезопластины.

Важной задачей при проведении ультразвукового контроля крупнозернистых структур является сокращение ложных сигналов, вызванных рассеянием УЗ волн от границ зерен, данные сигналы могут интерферируя друг с другом, образуют шум. Для уменьшения характеристики соотношения сигнал/шум следует выбирать датчик с узконаправленным акустическим полем, поскольку, чем меньше поле, тем меньше ложных импульсов будет зафиксировано приемником, рис. 10.

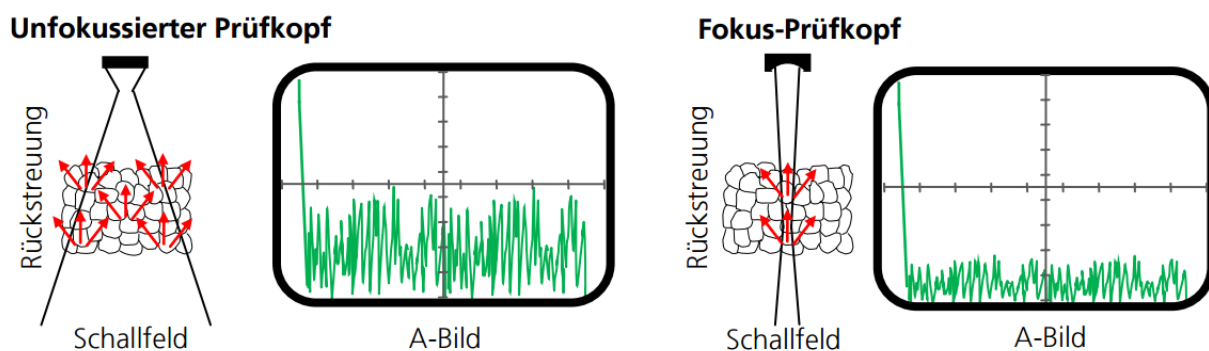


Рисунок 10 – Влияние формы акустического поля на обратное рассеяние

Недостатком сфокусированных датчиков является ограниченная эффективная рабочая зона, следовательно, дефекты могут быть обнаружены лишь в пределах диапазона фокусировки.

### 2.3 Акустический контроль микроструктуры ВЧШГ

Скорость распространения УЗ волн и их затухание зависит от микроструктуры ВЧШГ. Первые устройства для контроля качества структур

изделий на основе данных зависимостей были разработаны в Центральном научно-исследовательском институте технологии машиностроения ЦНИИТМАШ. Обычно по изменению скорости ультразвука получают информацию о содержании, размерах и форме графитовых включений, а по затуханию – информацию и металлической основе. Экспериментальным образом при использовании продольных УЗ волн было установлено, что скорость УЗ волн в чугуне увеличивается, как правило, с увеличением отношения содержания шаровидных графитных включений к общему содержанию графита. Кроме этого, скорость УЗ увеличивается также при уменьшении общего количества графита, размеров графитовых включений, изменении их формы от пластинчатой к шаровидной, увеличении содержания цементита в основе [35]. Точные значения скорости ультразвука зависят от композиции сплава, его зернистости и других технологических переменных. Как правило, чистое железо имеет скорость распространения волн примерно 5,9 мм / мкс, чугун с шаровидным графитом имеет скорость примерно 5,6 мм / мкс, а серый чугун имеет скорость примерно 4,8 мм / мкс.

Значения скорости ультразвука должны всегда проверяться на стандартных образцах из материала объекта контроля. При этом рекомендуется, чтобы для каждого конкретного случая измерения пользователь составлял карту скорости ультразвука в зависимости от процентного содержания шаровидного графита. Необходимым условием измерения скорости звука является знание толщины стенки отливки. Точное измерение скорости невозможно, без знания данного параметра. Толщину можно измерить механическим микрометром или штангенциркулем.

Также ультразвуковой контроль позволяет обнаружить наличие включения серого чугуна в высокопрочном. Поскольку скорость УЗ волн в сером чугуне значительно ниже, то время прохождения импульса через литые, содержащее включение пластинчатого графита больше, чем при прохождении через отливку, изготовленную из чугуна с шаровидным графитом.

Влияние формы графитовых включений отражается на модуле

упругости чугуна, а, следовательно, на скорости и затухании продольных УЗ волн, изменение которых оценивается с помощью измерения параметров УЗ сигнала при его прохождении через изделие (time of flight), как при двухстороннем, так и при одностороннем доступе. Скорость звука прямо пропорциональна модулю упругости и обратно пропорциональна плотности тела. Однако способы контроля по скорости ультразвука не всегда надежны. Металлургические факторы оказывают сильное влияние на скорость звуковых волн при УЗ испытаниях, помимо графитовых включений необходимо учитывать металлическую матрицу ОК (феррит, перлит, феррит+перлит), а также соотношение элементов сплава (С, Si и т. Д.). Геометрия тестируемых объектов не всегда позволяет выполнить желаемые инспекции, и на выходе оператор получает усредненное значение скорости.

Возможен контроль отливок из чугуна по затуханию ультразвука, которое в значительной степени зависит от структуры тела. Затухание – это ослабление амплитуды звуковой волны по мере ее продвижения в твердом теле. Затухание ультразвука происходит из-за ряда причин. Основными из них являются поглощение и рассеяние. Поглощение ультразвука – необратимый переход энергии звуковой волны в другую форму, в частности, в тепло. По мере удаления звуковых волн от источника, амплитуда колебаний этих частиц становится меньше, соответственно, как и энергия, которую они несут. Теоретически, поглощение пропорционально квадрату частоты. Большую роль играет вязкость и теплопроводность среды, взаимодействие волны с различными молекулярными процессами вещества, с тепловыми колебаниями кристаллической решётки и др.

Убывание амплитуды волны с расстоянием от источника, обусловленное формой и волновыми размерами источника. По мере распространения волны от точечного или сферического источника энергия, излучаемая источником, распределяется на все увеличивающуюся поверхность волнового фронта и соответственно уменьшается поток энергии через единицу поверхности, т.е. интенсивность звука. Для сферической волны, волновая поверхность которой

растёт с расстоянием  $r$  от источника как  $r^2$ , амплитуда волны убывает пропорционально  $1/r$ , а для цилиндрической волны – пропорционально  $1/\sqrt{r}$ . Рассеяние ультразвука на неоднородностях среды, в результате чего уменьшается поток энергии в первоначальном направлении распространения. Рассеяние ультразвука происходит из-за резкого изменения свойств среды (плотности, модулей упругости) на границе неоднородностей, размеры которых сравнимы с длиной волны. В таблице 5 представлены коэффициенты затухания и скорости распространения ультразвуковых волн в высокопрочных чугунах в зависимости от формы графита.

Таблица 5 – Коэффициенты затухания и скорости распространения ультразвуковых волн в высокопрочных чугунах

Форма графита в чугуне	Коэффициент затухания дБ/м		Скорость УЗ волны, м/с
	2,5 МГц	5 МГц	
Сфероидальная	100	130	5600
Смешанная	150	190	5030
Пластинчатая	180	220	4800
Крупнопластинчатая	200	250	4540

При экспериментальном измерении коэффициента затухания ставят задачу учесть все потери, не связанные с затуханием ультразвука: на дифракционное расхождение лучей, переход энергии в другую среду, электроакустическое преобразование. Часто эти потери превосходят потери при затухании, поэтому их влияние на точность измерения коэффициента затухания весьма велико. Сложность количественно измерения коэффициента затухания привела к тому, что при практических измерениях физико-механических параметров материала по затуханию ультразвука используют сравнительное измерение амплитуд сигналов, проходящих одинаковый путь в образце при одинаковых условиях контакта с преобразователем. При резонансных колебаниях измерения сравнивают колебания контролируемого и бездефектного изделий по их длительности или ширине резонансного пика.

Во времена СССР был разработан способ контроля величины зерна по затуханию УЗ волн, измеренному относительным методом. Наиболее простым является способ сравнения амплитуд сигналов от противоположных поверхностей изделия и образцов с известной структурой. Для уменьшения влияния мешающих факторов измеряют отношение амплитуд сигналов на двух различных частотах. При этом одну частоту выбирают заведомо низкой, так что затухание ультразвука слабо зависит от структурных составляющих. Другие частоты соответствуют области максимального затухания, вследствие рассеяния. Отношения амплитуд сигналов, соответствующих рабочим и опорной частотам, называемые структурными коэффициентами, определяют на исследуемом изделии для различных рабочих частот и сравнивают со структурными коэффициентами, полученными на стандартных образцах. Контроль можно проводить на продольных и сдвиговых волнах. Данным методом оценивают величину зерна в аустенитных сталях, используя частоты 0,65-25 МГц, погрешность измерения не более одного балла шкалы.

Во время ультразвукового контроля оператор сканирует поверхность, посылая импульсный сигнал в объект контроля. Когда звуковые волны достигают дефекта или задней стенки литья, они отражаются обратно и возвращаются к датчику, который преобразовывает его обратно в электрический сигнал. После соответствующей обработки этот сигнал выводится на экране, где уровень энергии изменяется в зависимости от материала и толщины отливки, расстояния до дефекта и типа дефекта [36]. Дефекты, такие как поры, трещины, усадка, шлаки, пластинчатые или хлопьевидные включения графита могут быть обнаружены с помощью применяемых методов УЗК, поскольку эти типы дефектов приводят к ясному отражению сигнала на мониторе. Неравномерное распределение и другие типы включений неоднородностей также могут регистрироваться во время ультразвуковых инспекция, но сигнал будет не столь ясен, как для ранее упомянутых дефектов из-за более высоких потерь энергии. По результатам

проверки трудно определить, какие типы дефектов соответствуют зарегистрированным энергиям.

В последнее время проводятся глобальные исследования с целью выявления новых возможностей ультразвукового контроля, в частности данная магистерская диссертация посвящена данной тематике.

В данной работе для целей исследования микроструктуры ВЧШГ рассмотрен на пригодность метод ультразвукового контроля, а именно метод обратного рассеяния, который уже широко применяется в медицинской акустике.

## 2.4 Метод обратного рассеяния

Рассеяние – уход звуковой энергии из направления волны, при этом энергия остается в звуковой форме. Под рассеянием волн понимают возмущения волновых полей, вызываемые неоднородностями среды (структурными неоднородностями) и помещёнными в эту среду рассеивающими объектами, рис. 11.

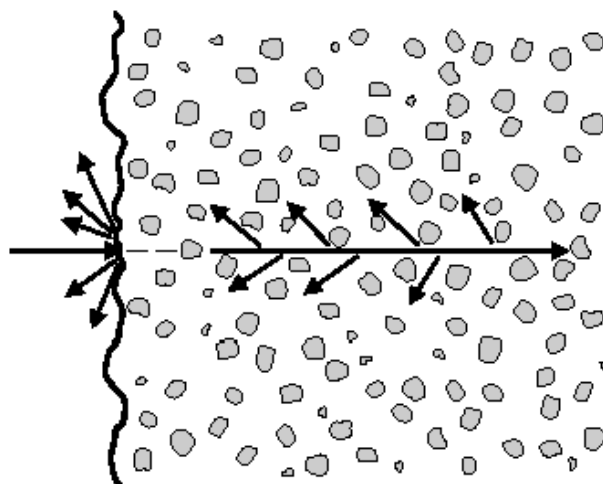


Рисунок 11 – Обратное рассеяние

Такой структурной неоднородностью является зерно графита, потому что зерно – кристалл, ориентированный случайным образом в пространстве и когда волна переходит из одного зерна в другое – ее скорость меняется, происходит преломление и отражение звуковой волны. Затухание

ультразвуковой волны в металле в значительной степени связано с рассеянием на границах зерен, которое объясняется, прежде всего, анизотропией кристаллической структуры зерен. Свойства высокопрочных чугунов в значительной мере определяются формой и размерами графитовых включений, присутствие которых можно контролировать путем измерения затухания или скорости распространения упругих волн. В основе метода лежит явление обратного рассеяния, рисунок 12.

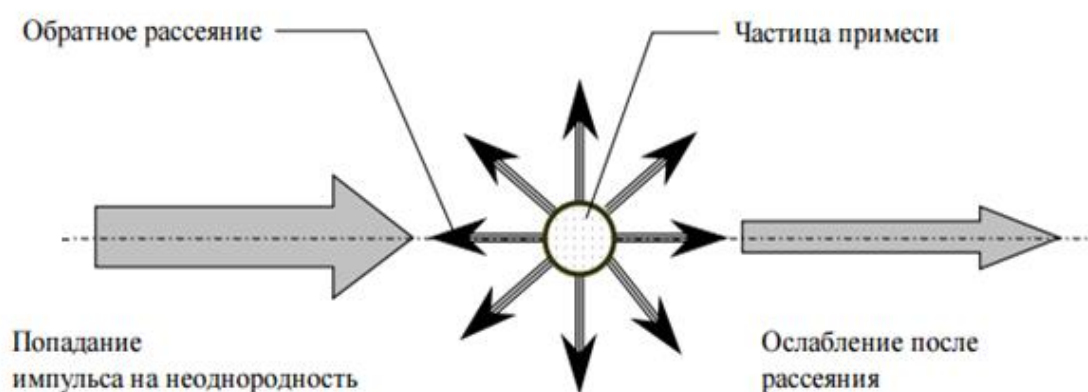


Рисунок 12 – Формирования потока обратного рассеяния.

При обратном рассеянии ультразвук отражается в том направлении, откуда пришел исходный луч. Интенсивность рассеянных сигналов увеличивается с увеличением неоднородности среды и увеличением частоты (т.е. уменьшением длины волны) ультразвука. Рассеивание относительно мало зависит от направления падающего луча и, следовательно, позволяет лучше визуализировать отражающие поверхности. Для того, чтобы отраженный сигнал был правильно расположен на экране, необходимо знать не только направление излученного сигнала, но и расстояние до отражателя. Это расстояние равно  $1/2$  произведения скорости ультразвука в среде на время между излучением и приемом отраженного сигнала. Произведение скорости на время делится пополам, так как ультразвук проходит двойной путь [37].

Основными параметрами, характеризующими ультразвуковую волну, являются:



- давление  $p_{зв}$ , Па;
- интенсивность  $I$ , Вт/м<sup>2</sup>.
- длина волны  $l$ , м;
- скорость распространения волны  $c$ , м/с;
- частота колебаний  $f$ , Гц.

Звуковая волна является носителем энергии в направлении своего движения. Количество энергии, переносимой звуковой волной за одну секунду через сечение площадью  $1 \text{ м}^2$ , перпендикулярное направлению движения, называется интенсивностью звука.

В процессе распространения плоских ультразвуковых волн в среде интенсивность ультразвука ( $I$ ) уменьшается по мере удаления от источника излучения согласно формуле:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (8)$$

где  $I_0$  – начальная интенсивность;

$x$  – расстояние от источника;

$\alpha$  – коэффициент затухания звука;

$e$  – основание натурального логарифма.

Это уравнение является аналогом закону Ламберта-Бера для поглощения света. Затухание звука, обусловленное рассеянием и поглощением, описывается экспоненциальным законом убывания амплитуды с расстоянием, т. е. амплитуда пропорциональна  $e^{-\alpha x}$ , а интенсивность –  $e^{-2\alpha x}$ , где  $\alpha$  – коэффициент затухания звука, который складывается из коэффициентов рассеяния  $\alpha_p$ , поглощения  $\alpha_n$  и геометрического параметра  $\alpha_g$ , т.е.  $\alpha = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_g$ . [38]. Геометрически затухание связано с распространением луча. Затухание увеличивается с уменьшением апертуры и увеличением длины волны. По мере удаления звуковых волн от источника, амплитуда колебаний этих частиц становится меньше, соответственно, как и энергия, которую они несут. Теоретически, поглощение пропорционально квадрату частоты. Большую роль играет вязкость и теплопроводность среды, взаимодействие волны с

различными молекулярными процессами вещества, с тепловыми колебаниями кристаллической решётки и др. Убывание амплитуды волны с расстоянием от источника, обусловленное формой и волновыми размерами источника.

Поглощение звука в твердых телах обуславливается в основном внутренним трением и теплопроводностью.

Как уже упоминалось ранее, причинами ослабления ультразвука в материале могут быть: поглощение и рассеяние. Если рассматривать движение ультразвуковых волн в чугуне, то можно сказать, что затухание ультразвуковой волны не будет связано с поглощением. Поэтому необходимо более подробно рассмотреть рассеяние акустического сигнала.

При распространении в металлической основе ультразвуковой волны, происходит ее отражение от шарообразных графитовых включений, что в свою очередь приводит к излучению ими вторичных, т.е. рассеянных волн. Эти однократно рассеянные волны, будут многократно отражаться другими частицами, но поскольку последующие рассеянные поля не велики, то ими можно пренебречь. Таким образом, мы предполагаем, что колебания одной частицы не влияют на колебания другой. Тогда суммарное рассеянное поле можно найти как суперпозицию полей, однократно рассеянных каждой частицей.

Рассеяние ультразвука на частице существенным образом зависит от соотношения между ее размерами и длиной ультразвуковой волны. Мерой этого соотношения служит параметр рассеяния: величина  $ka$ , где  $k$  - волновое число,  $a$  - радиус частицы.

Согласно проведенным исследованиям, выделяют три области рассеяния в зависимости от значения параметра рассеяния: рэлеевская, стохастическая или фазовая и диффузная (геометрическая). В следующем параграфе речь пойдет о диффузном рассеянии.

## 2.4.1 Геометрическое рассеяние

Чугун имеет поликристаллическое строение, и затухание ультразвука определяется, прежде всего, рассеянием. Большое влияние на коэффициент рассеяния в металлах оказывает отношение  $a$  (средней величины зерна) и длины волны ультразвука  $\lambda$ . Если длина волны достаточно мала по сравнению с размерами препятствия  $\lambda < a$ , параметр рассеяния  $ka \gg 1$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ , то явлениями дифракции можно пренебречь и рассматривать рассеяние по законам геометрической акустики. Геометрическое рассеяние определяется обычными законами отражения. Для наглядного изображения рассеяния используют индикатрису рассеяния (полярная диаграмма). Данная величина описывает закон распределения относительной интенсивности рассеянного излучения по различным направлениям в пределах полного телесного угла для конкретной точки среды и данного направления падающего луча.

На рисунке 13 приведены значения индикатрисы рассеяния для сфер.

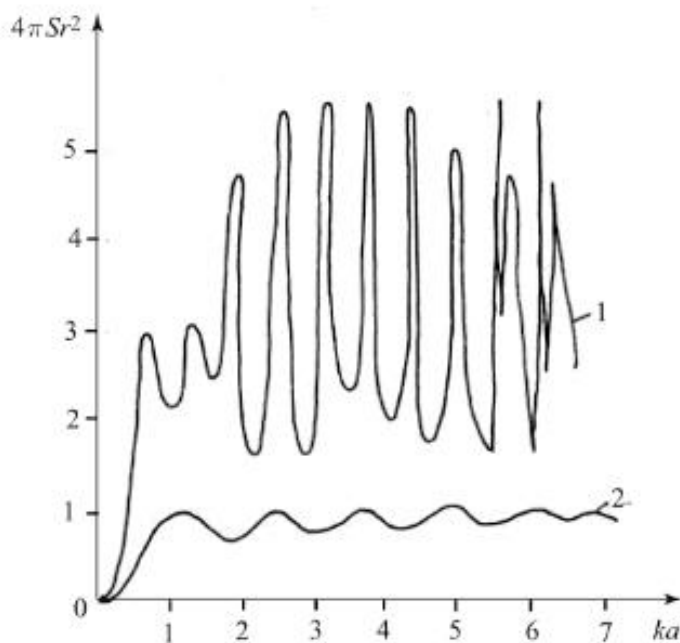


Рисунок 13 – Индикатриса рассеяния для сфер с различными значениями относительной плотности  $\rho$ , относительной скорости звука  $c$ , и относительной упругости  $e$ .

Кривая 1 соответствует сфере, у которой волновое сопротивление в четыре раза меньше волнового сопротивления среды (т.е. относительно мягкая сфера), а кривая 2 соответствует жесткой сфере. Следовательно, интенсивность обратного рассеяния прямо пропорциональна площади поперечного сечения рассеивателя.

На рисунке 14 представлены индикатрисы на жесткой сфере, рассчитанные Штенцелем для случая  $ka \gg 1$ .

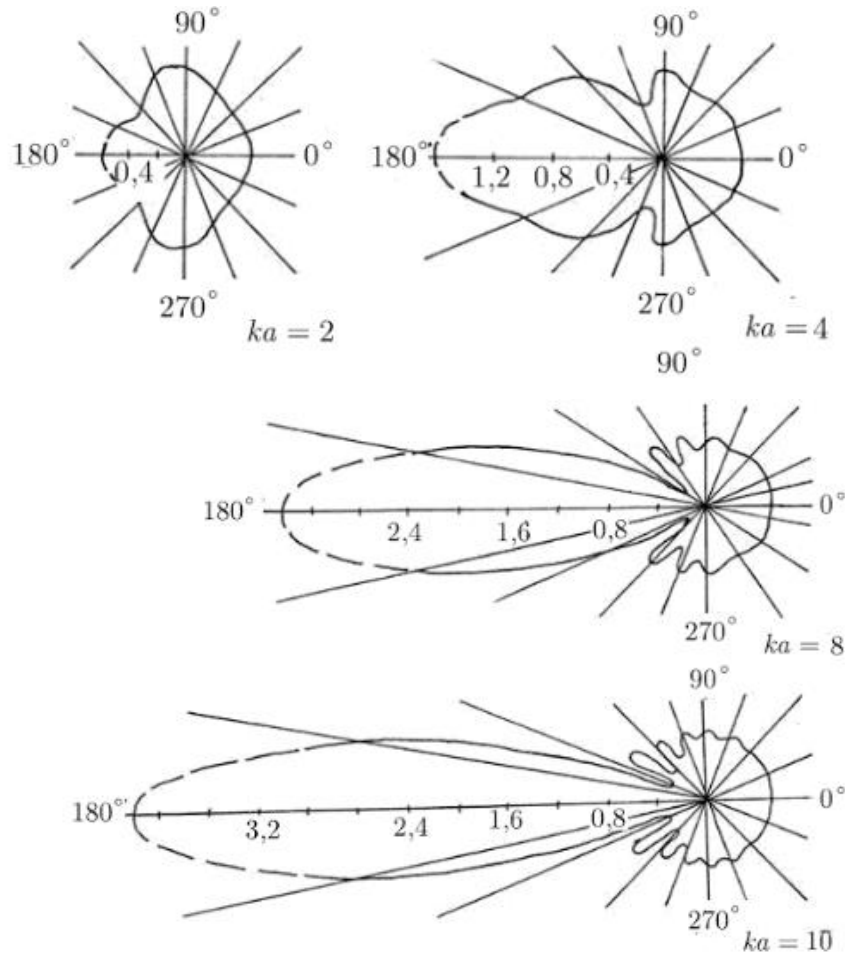


Рисунок 14 – Индикатриса на жесткой сфере для случая  $ka=2;4;8;10$ .

По мере роста волнового размера  $ka$  на круговой индикатрисе рассеяния развивается лепесток, соответствующий рассеянию вперед, который создается тенеобразующей волной. Практически сигнал, рассеянный при углах, близких к  $180^\circ$ , трудно отделить от падающей волны, которая распространяется по тому

же пути и примерно в то же время (пунктирная линия). Рассеянное поле перед телом будет определяться всеми отраженными лучами и поток рассеивающей мощности будет равен потоку падающей мощности. Поток мощности позади рассеивающего поля равен нулю, происходит как бы гашение первичного поля.

Малая длина ультразвуковых волн является основой для того, чтобы рассматривать их распространение в ряде случаев методами геометрической акустики. В геометрической акустике звуковое поле представляют в виде лучевой картины, не зависящей от длины волны, и считают, что звуковая энергия распространяется вдоль каждой лучевой трубки независимо от остальных лучей; это даёт обратную пропорциональность между плотностью потока энергии вдоль луча и площадью поперечного сечения лучевой трубки. В однородных средах лучи - прямые линии, в неоднородных они искривляются. Основная задача состоит в вычислении траекторий звуковых лучей. С математической точки зрения геометрическая акустика есть предельный случай волновой теории распространения звука при стремлении длины волны к нулю  $\lambda \rightarrow 0$ . Геометрической акустикой можно пользоваться при конечной длине волны звука, если эта длина достаточно мала по сравнению с размерами препятствия  $\lambda < a$ . Зависимость коэффициента затухания от среднего размера зерна в данной области незначительна и экспериментально ее невозможно использовать для определения размеров шаровидных включений графита, рис. 15.

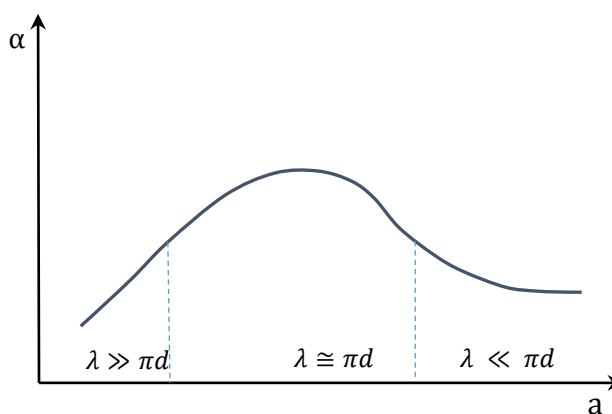


Рисунок 2 – Влияние размера зерна и длины волны на затухание ультразвука,  $d$  - средний диаметр зерна

В качестве интегральной меры рассеяния часто используется характеристика, называемая эффективным сечением рассеяния. Под сечением рассеянием  $\sigma_{\text{эф}}$  понимается отношение полной рассеиваемой мощности  $D_{\text{рас}}$  к интенсивности падающего излучения ультразвуковой волны  $I_0$  :

$$\sigma_{\text{эф}} = D_{\text{рас}} / I_0 \quad (9)$$

В случае геометрического рассеяния на сфере эффективное сечение рассеяния, равно удвоенной площади диаметрального сечения сферы:

$$\sigma_{\text{эф}} = 2\pi a^2 \quad (10)$$

В области геометрического рассеяния коэффициент рассеяния имеет вид:

$$\alpha_D = C_D d^{-1} \quad (11)$$

где  $C_D$  – постоянная плотности и упругих факторов анизотропии, геометрических факторов и скорости [37].

В данной области коэффициент затухания обратно пропорционален среднему диаметру зерна и не зависит от частоты. В этом интервале ультразвук слабо рассеивается. Однако, в данной области рассеивания возможно проводить инспекции микроструктуры с целью выявления пластинчатых или хлопьевидных включений графита, зависимость затухания от формы включений в данном случае будет выражена сильнее.

Для применения геометрического рассеяния требуется, чтобы размеры препятствий на пути звука были много больше длины волны звука. Если характерный для данной задачи размер становится сравнимым с длиной волны, то необходимо обратиться к области рассеяния Ми.

#### **2.4.2. Область рассеяния Ми**

В оптике теория рассеяние света при  $ka \geq 1$  была разработана Густавом Ми, и поэтому область значений  $ka \approx 1$  для любых волновых процессов

получила название область рассеяния Ми. В данной области рассеяния при  $ka \approx 1$ , жесткая сфера ведет себя более сложным образом, и характеристики рассеянного поля сильно зависят от частоты. Для любой сферы, когда длина звуковой волны внутри сферы сравнима с ее радиусом или меньше него, становятся существенными условия распространения волн внутри сферы, параметры возникающих внутри тел стоячих волн зависят от собственных резонансных частот тела. Когда внутри тела возбуждаются волны, функции и сечения рассеяния имеют пики и впадины на частотах, совпадающих с собственными частотами сферы, кривая 1 на рисунке 16. На рисунке представлена индикатриса на жесткой сфере, рассчитанная Штенцелем для случая  $ka \approx 1$ .

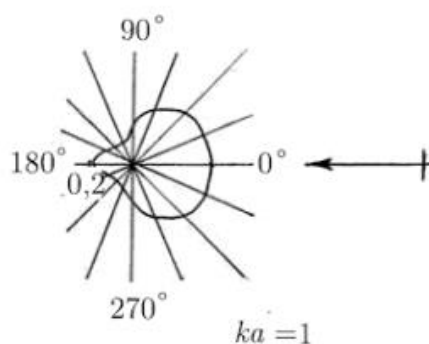


Рисунок 16 – Индикатриса на жесткой сфере для случая  $ka = 1$

При данном соотношении диаметра рассеивающей частицы к длине УЗ волны  $\lambda \approx a$  коэффициент ослабления максимален.

В области стохастического рассеяния коэффициент рассеяния имеет следующую зависимость:

$$\alpha_p = C_p d f^2, \quad (12)$$

где  $C_p$  постоянная плотности и упругих факторов анизотропии, геометрических факторов и скорости. Обратное рассеяние в данном случае более ярко выражено по сравнению с рассеянием в диффузной области. Для области стохастического или диффузного рассеяния, когда длина волны

становится сравнима со средним размером зерна, наблюдается квадратичная зависимость коэффициента затухания волн от частоты, а коэффициент затухания прямо пропорционален среднему диаметру зерна. Исследование микроструктур в данной области затруднено, вследствие трудностей расчетов. Наибольшую информативность об образце можно получить при проведении инспекций в области рэлеевского затухания [38].

### 2.4.3. Рэлеевское рассеяние

Задача о рассеянии звука и света на сферических частицах малого радиуса впервые была решена британским физиком Джоном Рэлеем и вошла в основы классической теории рассеяния волн в неоднородных средах. Поэтому рассеяние при условии  $ka \ll 1$  называется рэлеевским. Рэлеевское рассеяние – упругое рассеяние на объектах, неоднородностях или частицах, при котором размеры неоднородностей должны быть в значительной степени меньше чем длина волны падающего излучения. Эквивалентная формулировка: когерентное рассеяние с постоянным значением длины волны на объектах, когда частота рассеиваемой волны много раз меньше собственной частоты рассеивающего объекта. Метод Рэлея состоит в разложении падающей волны и рассеянной на частице в ряды по сферическим функциям с последующим учетом граничных условий на поверхности частицы и суммированием результирующих полей. Согласно рэлеевскому рассеянию  $ka \ll 1$  внутреннее состояние рассеивающих частиц не меняется. Поскольку рассеянное поле является результатом излучения вторичных волн частицей, совершающей вынужденные колебания под действием падающей волны, то частота рассеянных волн остается той же.

Для области малых сфер выражение индикатрисы рассеяния для малой нерезонансной сферы  $ka \ll 1$  впервые было получено Рэлеем в 1896 году. Для индикатрисы рэлеевского рассеяния характерным является преобладание обратного рассеяния, т.е. рассеяния навстречу падающей волне.



Для интенсивности рассеянных волн справедливы следующие уравнения, которые пропорциональны квадрату амплитуды:

$$I_{рас} = I_0 \frac{k^4}{9r^2} a^6 \left(1 + \frac{3}{2} \cos\theta\right)^2 \text{ или} \quad (13)$$

$$I_{рас} = I_0 \frac{\omega^4}{9c^4 r^2} a^6 \left(1 + \frac{3}{2} \cos\theta\right)^2, \quad (14)$$

где  $k$  – волновое число;

$r$  – расстояние до рассеивателя;

$\theta$  - угол рассеяния;

$\omega$  – угловая частота;

$c$  – скорость звука в среде.

Формула Рэлея описывает следующие экспериментально открытые до ее вывода закономерности. Интенсивность рассеянных волн оказывается пропорциональной четвертой степени частоты падающей волны, т.е. обратно пропорционально четвертой степени длины волны  $\lambda$ , она пропорциональна шестой степени размера рассеивающей частицы, т.е. квадрату ее объема.

В соответствии с формулами, в направлениях, для которых  $\cos\theta = -2/3$  ( $\theta \approx 132^\circ$  и  $\theta \approx 228^\circ$ ) интенсивность рассеяния равна нулю. Отношение интенсивностей рассеяния при  $\theta = 0^\circ$  и  $\theta = 180^\circ$ , согласно формуле Рэлея составляет  $(5/2 : 1/2) = 25$ , т.е. обратное рассеяние в 25 раз больше рассеяния в направлении падающей волны, при этом на обратное направление в пределах углов от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  приходится 90% рассеиваемой энергии. На рисунке 17 представлена индикатриса на жесткой сфере, рассчитанные Штенцелем для рэлеевской области рассеяния.

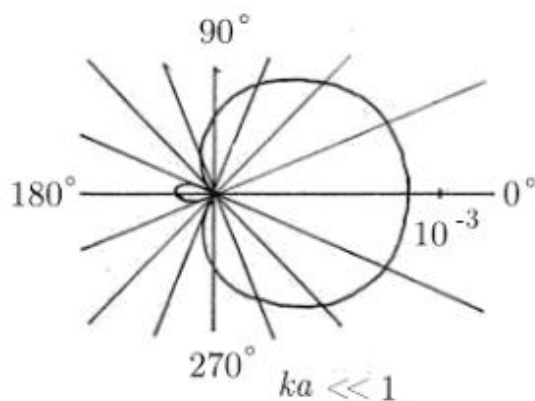


Рисунок 17 – Индикатриса на жесткой сфере для случая  $ka \ll 1$

Для рэлеевского рассеяния полную рассеиваемую мощность можно найти, проинтегрировав выражения по телесным углам:

$$D_{рас} = \int_0^\pi I_{рас} 2\pi a^2 \sin\theta d\theta = \frac{7}{9} \pi a^2 (k^4 a^4) I_0 \quad (15)$$

Поделив это выражение на интенсивность падающей волны  $I_0$ , получим выражение для эффективного сечения рассеяния:

$$\sigma_{эф} = \frac{7}{9} \pi a^2 (k^4 a^4) \quad (16)$$

Следовательно, при  $ka \ll 1$  эффективное сечение рассеяния составляет лишь малую долю площади сечения сферы  $\pi a^2$ . Таким образом, величина  $\sigma_{эф}$  характеризует эффективность рассеяния данным препятствием.

Область рэлеевского рассеяния находится в диапазоне волновых чисел от 0 до 1, и сечение рассеяния пропорционально  $(ka)^4$ . Физически это означает, что акустическое сечение рэлеевского рассеяния гораздо меньше геометрического поперечного сечения тела, поскольку звуковые волны огибают акустически малые тела, почти не взаимодействуя с ними. Следовательно, если широкополосный звуковой сигнал падает на малые нерезонансные рассеиватели, то обратное рассеяние будет гораздо более сильным для высокочастотных компонент сигнала.

Сочетание рэлеевского рассеяния с рассеянием в приближении геометрической акустики приводит к тому, что жесткая сфера для обратного

рассеяния играет роль фильтра высоких частот с граничной частотой, соответствующей приблизительно равенству  $ka \approx 1$ .

Процесс рассеяния в данной области можно представить следующим образом: на наклонной границе раздела волна разделяется на различные отраженные и прошедшие виды волн. Для каждой из этих волн такой же процесс повторяется и на следующей границе зерна. Таким образом от первоначального звукового пучка все время отделяются составляющие волны, которые на своем пути все в большей степени превращаются в тепло вследствие имеющегося поглощения.

Как уже было описано выше, рассеяние приводит к экспоненциальному затуханию плоских ультразвуковых волн:

$$I = I_0 \exp(\alpha_{\text{рас}} x) = I_0 \exp(-n_0 \sigma_{\text{эф}} x) \quad (17)$$

где  $n_0$  – количество независимых рассеивателей в единице объема.

Коэффициент рассеивания  $\alpha_{\text{рас}} = n_0 \sigma_{\text{эф}}$ , определяется эффективным сечением рассеяния. Учитывая общее определение коэффициента  $\alpha_{\text{рас}}$ , его можно выразить как:

$$\alpha_{\text{рас}} = \left( \frac{n_0}{I_0} \right) \oint I_{\text{рас}} dS \quad (18)$$

В случае рэлеевского рассеяния получаем:

$$\alpha_{\text{рас}} = \frac{7}{9} n_0 \pi k^4 a^6 = 7 \frac{\pi^3 n_0 V^2 v^4}{c^4} \quad (19)$$

т.е. коэффициент затухания вследствие рэлеевского рассеяния пропорционален четвертой степени частоты и квадрату объема рассеивающей частицы. Во всем трех областях рассеяния коэффициент рассеяния пропорционален количеству рассеивающих центров.

Коэффициент рассеяния  $\alpha$  значительно увеличивается с ростом частоты  $\nu$  и чем больше размер зерна  $a$ . Кроме того рассеяние поперечных волн проявляется сильнее из-за меньшей скорости звука или меньшей длины волны для данной частоты соответственно. Соотношение скоростей составляет около 32  $(v_L/v_T)^5$ . В результате, коэффициент рассеяния для поперечных волн на

порядок выше, чем для продольных волн. Поперечные колебания не связаны с изменением объема и потери на теплопроводность отсутствуют, таким образом для одной и той же среды поглощение поперечных волн при  $v = \text{const}$  меньше, чем для продольных.

Физические свойства материала могут иметь сильную зависимость от кристаллографических направлений. Это называется анизотропией. Как правило, эти различия усредняются для поликристаллических материалов, если все ориентации статистически распределены, и размер зерна мал. Некоторые производственные процессы приводят к образованию микроструктур с преобладающей ориентацией. Такой материал называется текстурой. Сварка, литье и прокат часто приводят к образованию текстур.

Границы зерен вносят наибольший вклад в значение обратного рассеяния акустического сигнала.

Поэтому необходимо обратиться к упругой анизотропии материалов.

Константы упругости  $S_{ij}$  и  $C_{ij}$  соответственно называются коэффициентом податливости и коэффициентом жесткости. В кубической системе есть только три независимых коэффициента податливости  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ , и  $S_{44}$ , и соответствующие им коэффициенты жесткости  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  и  $C_{44}$ . В монокристалл кубической решетки металла напряжения и модули сдвига изменяются:

$$\frac{1}{E} = S_{11} - 2 \left[ (S_{11} - S_{12}) - \frac{1}{2} S_{44} \right] (l^2 m^2 + m^2 n^2 + l^2 n^2), \quad (20)$$

$$\frac{1}{G} = S_{44} - 2 \left[ (S_{11} - S_{12}) - \frac{1}{2} S_{44} \right] (l^2 m^2 + m^2 n^2 + l^2 n^2) \quad (21)$$

где  $l$ ,  $m$ ,  $n$  – направляющие косинусы углов между осями образца и кристаллографическими осями.

Для изотропных кристаллов:

$$S_{44} = 2(S_{11} - S_{12}), \quad (22)$$

$$C_{44} = \frac{1}{2} (C_{11} - C_{12}) \quad (23)$$

Таким образом:

$$E = 1/S_{11}, \quad (24)$$

$$G = 1/S_{44} \quad (25)$$

Следовательно, степень изотропии может быть представлена:

$$2(S_{11} - S_{12})/S_{44}, \quad (26)$$

$$(C_{11} - C_{12})/2C_{44} \quad (27)$$

Рассеяние в поликристаллических материалах, вызванное анизотропией кристалла можно оценить с помощью коэффициент рассеяния:

$$\alpha_{L,T} = S_{L,T}Vf^4 \approx S_{L,T}d^3f^4, \quad (28)$$

где  $S_{L,T}$  – это параметр рассеяние для продольных и поперечных волн.

Объем рассеяния согласно формуле имеет следующую зависимость от размера зерна:

$$V \approx d^3, \quad (29)$$

где  $d$  – размер зерна [39].

Коэффициент рассеяния  $\alpha$  значительно увеличивается с ростом частоты  $f$  и чем больше размер зерна  $d$ . Поскольку ВЧШГ имеет очень крупнозернистую микроструктуру, его нельзя проверить с помощью ультразвука с обычным набором частот, для инспекции необходимо использовать частоту от 15 МГц до 20 МГц.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **4.1 Технико-экономическое обоснование**

В настоящее время проведение научно-исследовательской работы в ВУЗе и других учреждениях является крайне перспективным как в вопросах решения актуальных научно-технических проблем, так и в получении прибыли в случае успешной коммерциализации. Достичь этого позволяет рациональное использование имеющихся материальных, кадровых и временных ресурсов. Поэтому необходимо уметь эффективно планировать научно-исследовательские работы (НИР). Выполнение выпускной квалификационной работы включает в себя анализ НИР с точки зрения экономических требований, т.е. определение затрат на разработку, продолжительность работ, анализ экономической эффективности. Представленная выпускная квалификационная работа носит прикладной исследовательский характер, поэтому экономическая часть включает в себя рассмотрение следующих вопросов:

- календарное планирование НИР;
- определение плановой себестоимости проведения НИР;
- анализ экономической эффективности НИР.

#### **4.1.2 Потенциальные потребители результатов исследования**

В ходе выполнения НИР была определена возможность применения методики неразрушающего контроля – обратного рассеивания для исследования микроструктуры ВЧШГ. Соответственно, внедрение рассматриваемой методики для стандартного оборудования УЗК позволит применять ее на объектах атомной энергетики для мониторинга состояния и качества ТУК. Также данный метод необходим и в других отраслях для изготовления изделий ответственного назначения, так например: нефтяной и газовой промышленности, транспортном машиностроении и других отраслях,

где предъявляются высокие требования к механическим и литейным свойствам материала. Изделие, выполненное из высокопрочного чугуна, отличается высокой прочностью, долговечностью, высокими эксплуатационными свойствами [40]. Результаты проведенного анализа представлены в таблице 11.

Таблица 12– Сегментирование рынка

	Методика исследования микроструктуры ВЧШГ с помощью УЗК		
	Атомная промышленность	Нефтяная и газовая промышленность	Транспортное машиностроение
Сильная потребность	+	+	+
Слабая потребность			

#### 4.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Анализ заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, а также, в выявлении соответствия сильных и слабых сторон проекта. В результате составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приводится в дипломной работе (табл. 12).

Таблица 13– SWOT-анализ

	Сильные стороны	Слабые стороны
	1) Полученные предварительные результаты; 2) Использование современного универсального оборудования.	1) Несовершенство алгоритма обработки данных контроля; 2) Отсутствие возможности автоматизированной обработки результатов; 3) Ограниченный выбор методов обработки экспериментальных образцов; 4) Отсутствие охранного документа на полученные результаты интеллектуальной деятельности.

Продолжение таблицы 13

	<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
	3) Финансовая стабильность проекта; 4) Актуальность тематики.	5) Возможность поломки измерительного оборудования.
<b>Возможности</b> 1) Возможность применения методики на универсальном оборудовании УЗК; 2) Востребованность результатов исследования в атомной промышленности; 3) Появление дополнительного спроса со стороны различных отраслей промышленности;	1) Внедрить методику оценки качества на базе универсального оборудовании УЗК; 2) Осуществить возможность проведения корреляционного анализа с референтным методом.	1) Разработать алгоритм обработки полученных результатов; 2) Внедрить процедуру автоматизации контроля; 3) Адаптировать методику контроля для образцов, обработанных различными методами; 4) Осуществить возможность замены универсального оборудования УЗК.
<b>Угрозы</b> 1) Отсутствие спроса на результаты исследования; 2) Появление аналогичной продукции от компаний-конкурентов; 3) Развитие других методов обработки деталей; 4) Задержки финансирования; 5) Отсутствие оборудования для измерений в связи с его поломкой.	1) Привлечь финансирование из других источников; 2) Адаптировать методику для контроля деталей из ВЧШГ во всех областях промышленности.	1) Усовершенствовать методику обработки результатов; 2) Оформить охранный документ; 3) Приобрести необходимое оборудование для проведения измерений.



## 4.2 Планирование НИР

### 4.2.1 Планирование этапов и работ по выполнению НИР

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований сформирована рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник. Порядок составления этапов и работ приведен в таблице 13.

Таблица 14– Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб.	Содержание работ	Должность исполнителя
Выбор направления исследования	1	Изучение проблемы и подбор литературы.	Руководитель, дипломник
	2	Изучение и анализ литературы, а также выбор наиболее подходящего метода решения проблемы.	Дипломник
Разработка технического задания на НИР	3	Составление и утверждение технического задания.	Руководитель
Теоретические и расчетные исследования	4	Анализ существующих конструкционных материалов, используемых для изготовления корпуса ТУК	Дипломник
	5	Исследование микроструктуры ВЧШГ и ее особенностей	
	6	Обзор методов, пригодных для контроля микроструктуры корпуса ТУК	
	7	Выбор наиболее подходящего метода НК	
	8	Проведение экспериментов, обработка и анализ полученных данных	
Обобщение и оценка результатов	9	Анализ и формирование выводов по полученным результатам НИР.	Руководитель, дипломник
	10	Составление пояснительной записки и подготовка графического материала.	Дипломник
	11	Подготовка темы к защите.	Руководитель, дипломник

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИР

Трудовые затраты представляют собой затраты, которые непосредственно связаны с выполнением исполнителем работ. Зачастую они являются весомой составляющей при проведении научно-исследовательских работ. Чтобы рассчитать трудовые затраты необходимо оценить время, которое каждый человек (исполнитель) тратит на выполнение своих заданий.

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях (чел.-дн.) и носит вероятностный характер, поскольку зависит от множества факторов. Ожидаемое (среднее) значения трудоемкости работ  $t_{ож}$  определяется при помощи формулы:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{минi} + 2t_{маxi}}{5}, \quad (32)$$

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

$t_{минi}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{маxi}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн..

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность выполнения каждого задания (работ) в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. В расчете используется выражение:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (33)$$

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.

Вычисление продолжительности работ необходимо для обоснованного

расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65%. Результаты расчетов трудоёмкости и продолжительности одной работы сведены в таблице [40].

#### 4.2.3 Разработка календарного плана работ

Так как выполнение выпускной квалификационной работы предполагает рассмотрение относительно небольшой темы, поэтому ожидаемый объем работ будет также относительно небольшой. В связи с этим в качестве наиболее удобного и наглядного вида календарного плана работ был выбран ленточный график проведения НИР в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта представляет собой график, состоящий из отрезков, располагающихся на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельному заданию или работе. Номер этапа, соответствующий конкретному заданию или работе, размещается по вертикали. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \times k, \quad (34)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения одной работы в календарных днях;

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

$k$  – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{кз}}{T_{кз} - T_{вд} - T_{пд}}, \quad (35)$$

где  $T_{кз}$  – количество календарных дней (кал. дн.) в году.

Примем, что число календарных дней равно 365, выходных – 104, праздничных – 9. Исходя из этого, коэффициент календарности равен:

$$k = \frac{365}{365 - 104 - 9} \approx 1,45. \quad (36)$$

Длительность этапов в календарных днях сведена в таблице 14.

Таблица 24 – Временные показатели проведения НИР

Этап	$t_{min}$ , чел.- дн.	$t_{max}$ , чел.- дн.	$t_{ож}$ , чел.- дн.	Исполнители	$T_p$ , раб. дн.	$T_k$ , кал. дн.
1	3	6	5	2 (Р., Д.)	2,5	4
2	10	15	12	1(Д.)	12	18
3	1	2	1,4	1(Р.)	1	2
4	8	12	9	1(Д.)	9	13
5	4	7	5	1(Д.)	5	8
6	10	13	11	1(Д.)	11	16
7	2	5	4	1(Д.)	4	6
8	10	14	12	1(Д.)	12	18
9	2	5	3	2 (Р., Д.)	1,5	3
10	6	9	7	1(Д.)	7	10
11	4	7	5	2 (Р., Д.)	2,5	4
ИТОГО:			74,4		76	102

Таблица 15 – Построение диаграммы Ганта

№ этапа	Содержание работ	Должность исполнителя	$T_k$ , кал. дн.
1	Изучение проблемы и подбор литературы.	Р, Д	4
2	Изучение и анализ литературы, а также выбор наиболее подходящего метода решения проблемы.	Д	18
3	Составление и утверждение технического задания.	Р	2
4	Анализ существующих конструкционных материалов, используемых для изготовления корпуса ТУК	Д	13
5	Исследование микроструктуры ВЧШГ и ее особенностей	Д	8
6	Обзор методов, пригодных для контроля микроструктуры корпуса ТУК	Д	16
7	Выбор наиболее подходящего метода	Д	6
8	Проведение экспериментов, обработка и анализ полученных данных	Д	18

Продолжение таблицы 15

№ этапа	Содержание работ	Должность исполнителя	$T_k$ , кал. дн.
9	Анализ и формирование выводов по полученным результатам НИР.	Р, Д	4
10	Составление пояснительной записки и подготовка графического материала.	Д	10
11	Подготовка темы к защите.	Р, Д	4

Таблица 16 – Календарный план-график проведения НИОКР

Этапы и подэтапы		Содержание работ	Т <sub>к</sub> , кал.дн	Время выполнения работ														
				Март			Апрель			Май			Июнь					
1	1	Изучение проблемы и подбор литературы.	4	■														
	2	2	Изучение и анализ литературы, выбор метода решения проблемы.	18	■	■	■											
		3	Составление и утверждение технического задания.	2			▨											
		4	Анализ существующих конструкционных материалов, используемых для изготовления корпуса ТУК	13			■	■	■									
3	5	Исследование микроструктуры ВЧШГ и ее особенностей	8				■	■										
	6	Обзор методов, пригодных для контроля микроструктуры корпуса ТУК	16					■	■	■								
	7	Выбор наиболее подходящего метода	6							■	■							
4	9	Проведение экспериментов, обработка и анализ полученных данных	18							■	■	■	■					
	10	Анализ и формирование выводов по полученным результатам НИР.	4									▨						
	12	Составление пояснительной записки и подготовка графического материала.	10										■	■	■			
	11	Подготовка темы к защите.	4												▨			
Итого дней				▨ - научный руководитель			■ - студент											

### **4.3 Определение плановой себестоимости проведения НИР**

#### **4.3.1 Состав затрат, включаемый в себестоимость НИР**

Определение затрат на выполнение НИР производится путем составления калькуляции по отдельным статьям затрат всех видов необходимых ресурсов. Калькуляция является основным документом, на основании которого осуществляется планирование и учет затрат на научные исследования.

Калькуляция плановой себестоимости проведения НИР составляется по следующим статьям затрат:

- материалы (материальные затраты);
- оплата труда работников, непосредственно участвующих в НИР;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- прочие прямые расходы;
- спецоборудование для научных и исследовательских работ;
- накладные расходы.

Пункты а-д относятся к прямым затратам, связанным непосредственно с выполнением НИР. Величина прямых затрат определяется прямым счетом. Накладные расходы (статья е) подразумевают затраты на содержание аппарата управления, общетехнических и общехозяйственных служб. Величина накладных расходов рассчитываются косвенным способом.

#### **4.3.2 Формирование и расчет затрат, включаемых в себестоимость**

Этот пункт включает в себя стоимость всех материалов, необходимых для выполнения НИР. К категории материалов относят: сырье, основные и вспомогательные материалы; покупные полуфабрикаты и комплектующие изделия; электроэнергия (на технологические цели). Стоимость материалов формируется исходя из цены их приобретения и платы за транспортировку (упаковку и доставку), осуществляемую сторонними организациями. Если расходы

сторонних организаций, связанные с доставкой материальных ресурсов для НИР, незначительны (2-4%), то их можно опустить.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$C_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи} \quad (36)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхи}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Величина коэффициента ( $k_T$ ), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. В рамках выполнения данной выпускной квалификационной работы примем  $k=0,15$ . Калькуляция расходов на материалы приведена в таблице 17.

Таблица 17 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество, шт./упак.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Канцелярские товары	Бумага для принтера, формат А4, 500 шт., скрепки канцелярские 50 шт., ручки 2 шт., карандаши 2 шт., ластик	1	615,00	600,00
Покупные материалы	Связывающая среда, клей, салфетки	1	1200,00	1200,00
Итого по статье $C_M$				1800,00

Также статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИР, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зн} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (37)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (38)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_0}, \quad (39)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

$F_0$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала (в рабочих днях), таблица 18.

Таблица 18 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные и праздники)	89	98
Потери рабочего времени (отпуск, невыходы по болезни)	56	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	220	219

Месячный должностной оклад руководителя (аспирант кафедры):



$$Z_{м\text{рук.}} = Z_{ок} * K_p \quad (40)$$

где  $Z_{ок}$  – зарплата по окладу руководителя, руб.;

$K_p$  – районный коэффициент, равный 1,3.

Согласно отраслевой системе оплаты труда основная месячная заработная плата руководителя (доцент кафедры ФЭУ) составляет 34190,00 руб.

$$Z_{м\text{рук.}} = (26300,0 \times 1,3) = 34190,00 \text{ (руб.)}. \quad (41)$$

Среднедневная зарплата руководителя и дипломника соответственно равны:

$$Z_{дн\text{рук.}} = \frac{34190 \times 10,4}{220} \approx 1\,616,25 \text{ (руб.)}, \quad (42)$$

$$Z_{дн\text{дип.}} = \frac{1750 \times 1,3 \times 10,4}{219} \approx 108,03 \text{ (руб.)}. \quad (43)$$

Заработная плата руководителя и дипломника за время работы над дипломной работой составляет соответственно:

$$Z_{осн\text{рук.}} = 1616,25 \times 6 \approx 9\,697,5 \text{ (руб.)}, \quad (44)$$

$$Z_{осн\text{дип.}} = 108,03 \times 75 \approx 8\,102,7 \text{ (руб.)}. \quad (45)$$

Результаты расчета основной заработной платы сведены в таблице 16.

Дополнительная заработная плата включает оплату за непроработанное время (очередной и учебный отпуск, выполнение государственных обязанностей, выплата вознаграждений за выслугу лет и т.п.) и рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении НИР:

$$Z_{доп} = Z_{осн} \times K_{доп}, \quad (46)$$

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

Примем коэффициент дополнительной зарплаты равным 0,15 для руководителя.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = (Z_{осн} + Z_{доп}) \cdot K_{внеб}, \quad (47)$$

где  $K_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%. При расчете внебюджетных отчислений размер страховых взносов был принят 27,1%.

Таблица 19– Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата, руб.	Руководитель	Дипломник
Основная зарплата	9 697,5	8 102,7
Дополнительная зарплата	1 454,6	-
Зарплата исполнителя	11 152,12	8 102,7
Внебюджетные отчисления	3 022,22	-
Итого по статье <i>Сзп</i>	22 276,54	

Так как отчислений во внебюджетные фонды от стипендии не начисляются, расчет ведется только от заработной платы руководителя.

Также были посчитаны накладные расходы. В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле (20):

$$C_{накл} = k_{накл} \cdot (З_{осн} + З_{доп}), \quad (48)$$

где  $k_{накл}$  – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы в ТПУ составляют 12-16 % от суммы основной и дополнительной зарплаты всех исполнителей проекта, участвующих в выполнении темы [30]. Примем  $k_{накл} = 15\%$ . Таким образом, накладные расходы составят:

$$C_{накл} = 0,15 \cdot (11 152,12 + 8 102,7 + 3 022,22) = 3 341,48 \text{ (руб.)}. \quad (49)$$

В статье рассчитаны затраты на приобретение приборов и устройств, предназначенных для использования в качестве объектов испытаний и

исследований, необходимых для выполнения конкретной НИР. Определение затрат по этой статье производится по фактической стоимости приобретения с учетом транспортно-заготовительных расходов (табл.20).

Таблица 20– Приобретенное спецоборудование

Наименование	Марка, размер	Количество, шт./упак.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Образцы и их доставка	Siempelkamp	3	6000,00	18000,00
Датчик ультразвуковой	Karl Deutsch, 20 MHz и 5 MHz	2	3500,00	7000,00
Итого по статье С <sub>С01</sub>				25000,00

В таблице 21 представлены данные стоимости оборудования, необходимого для проведения исследования.

Таблица 3 – Используемое спецоборудование для исследования

Наименование	Количество, шт./упак.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Двухканальная система PCUS, ЭВМ, дополнительное оборудование, дефектоскоп, датчики Karl Deutsch	1	2 000 000	2 000 000
Итого по статье С <sub>С02</sub>			2 000 000,00

Для используемого оборудования была рассчитана амортизация линейным способом. Амортизация – это постепенное перенесение затрат, понесенных на покупку оборудования на стоимость готового продукта. Для расчета годовой амортизации достаточно разделить первоначальную стоимость имущества на срок его эксплуатации – 5 лет, поскольку нам необходимо рассчитать среднедневную амортизацию, полученное число делим на количество рабочих дней в году – 251 день.

$$A_{дн} = 2\,000\,000 / 5 * 251 = 1\,593,62 \text{ (руб.)} \quad (50)$$

Амортизации для данного оборудования при выполнении измерений в течение 18 дней составила 12500 рублей.

$$A_{пр} = 1\,593,62 * 18 = 28\,685,25 \text{ (руб.)} \quad (51)$$

Калькуляция плановой себестоимости НИР на основании полученных данных по отдельным статьям затрат приведена в таблице 22.

Таблица 22– Калькуляция плановой себестоимости

Наименование статей затрат	Сумма, руб.
Материальные затраты ( $C_M$ )	1 800,00
Затраты на оплату труда работников, непосредственно занятых созданием НИР ( $C_{ЗП}$ ), включая отчисления во внебюджетные фонды ( $C_{ВНЕБ}$ )	22 276,54
Спецоборудование для научных работ ( $C_{СО12}$ )	25 000
Амортизационные отчисления	28 685,25
Накладные расходы ( $C_{НАКЛ}$ )	3 341,48
Итого себестоимость НИР ( $C_{НИР}$ )	81 103,27

#### 4.4 Оценка научно – технического уровня НИР

Результатом НИР является достижение научного, научно-технического, экономического и социального эффектов. Научный эффект характеризует так называемую научную новизну, то есть прирост достоверной информации, описывающей объект исследования. Научно-технический уровень показывает возможность использования результатов исследования в других НИР, ОКР или для создания продукции. Экономический эффект отражает возможное улучшение экономических показателей вследствие проведения данной НИР или ОКР и/или внедрения результатов в народное хозяйство. Социальный эффект проявляется в улучшении условий труда, повышении экономического благосостояния, развитии культуры, здравоохранения, науки, образования.

В данной работе наиболее возможным представляется оценить уровень научного и научно-технического эффекта ввиду теоретической и практической направленности НИР. Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности планируемых и выполняемых работ получил распространение метод балльных оценок. Он заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определённое количество баллов. Обобщённую оценку проводят по сумме баллов по всем показателям или рассчитывают по формуле. На этой основе делается вывод о целесообразности НИР.

На основе оценок новизны результатов, их ценности, масштабам реализации определяется показатель научного и научно-технического уровня по формуле [41]:

$$НУ(НТУ) = \sum_{i=1}^m r_i \cdot k_i, \quad (52)$$

где НУ (НТУ) – показатель научного (научно-технического) уровня;

$m$  – количество факторов НУ (НТУ);

$r_i$ – коэффициент значимости  $i$ -го фактора НУ (НТУ);

$k_i$ – балльная оценка  $i$ -го фактора НУ (НТУ).

Результаты оценки научного и научно-технического уровней НИР приведены соответственно в таблицах 23 и 24.

Таблица 23– Сводная таблица оценки научного уровня НИР

Фактор НУ	Значимость	Выбранный балл
Новизна результатов	0,5	0,8
Технический уровень	0,35	0,7
Завершенность результатов	0,15	0,6

Таким образом, показатель научного уровня составил 0,74.

Таблица 24 – Сводная таблица оценки научно-технического уровня НИР

Фактор НТУ	Значимость	Выбранный балл
Перспективность использования результатов	0,5	0,8
Масштаб реализации	0,3	0,7
Завершенность результатов	0,2	0,6

Согласно расчетам показатель научно-технического уровня составил 0,73.

#### 4.5 Анализ экономической эффективности НИР

Полная себестоимость НИР составила 81 103,27 рублей. В выполнении НИР было задействовано 2 человека. Временные затраты составили 76 рабочих дней или 102 календарных дня.

Экономический эффект дипломной работы, выраженный в денежных средствах, определить не представляется возможным. В ходе работы была рассмотрена методика неразрушающего ультразвукового контроля для целей исследования микроструктуры корпуса ТУК, изготовленного из ВЧШГ.

## Список публикаций студента

1. Катаева О.И. Наиболее опасные этапы ЯТЦ, риски распространения [Электронный ресурс] // Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности: сборник тезисов докладов VI Международной научно-практической конференции, Томск, 5-7 июня 2014.- Томск ТПУ, 2014 – С. 97
2. Катаева О.И. ,Седнев. Д.А. Применение ультразвукового метода контроля для диагностики остаточного ресурса контейнера сухого хранения ОЯТ // V Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Томск, 22-24 октября 2014. - Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2014 – С.56
3. Катаева О.И. ,Седнев. Д.А. Отечественные контейнеры для транспортирования и хранения ОТВС // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий: материалы конференции в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ, Северск, 21-25 Марта 2016. - Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2016 - С.31
4. Катаева О.И. Политик атомной энергии в Германии // Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий, материалы конференций в рамках научной сессии НИЯУ МИФИ Северск, 21-21 Марта 2016. – Северск. СТИ НИЯУ МИФИ 2016 - С.122
5. Катаева О.И. ,Седнев. Д.А. Иммобилизация радиоактивных отходов в стеклянную матрицу, как надежный способ защиты окружающей среды // Природа и общество: технологии обеспечения продовольственной и экологической безопасности: сборник научных трудов. – Москва: МАКС Прес, 2016 – С, 233-236.
6. Катаева О.И.,Седнев. Д.А. Возможность применения сухого хранилища камерного типа для безопасного хранения отработавшего ядерного топлива в России // VII школа-конференция молодых атомщиков Сибири:

сборник тезисов докладов, Северск, 19-21 Октября 2016. – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2016 – С.72.

7. Катаева О.И. , Ластовец Ю.В. Остекловывание – метод для иммобилизации радиоактивных отходов высокой активности [Электронный ресурс] // Ресурсоэффективным технологиям – энергию и энтузиазм молодым: сборник научных трудов VI Всероссийской конференции, Томск, 22-24 Апреля 2015. – Томск: ТПУ, 2015 – С. 95-100.

8. Kataeva O.I. Die zielstrebige Entwicklung der Kosmischen Anlagen in Russland // Инженерия для освоения космоса: сборник научных трудов VI Всероссийского молодежного Форума с международным участием, Томск , - 12-14 Апреля 2016. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016 – 61- С. 304-306.

9. Ластовец Ю.В., Катаева О.И. Развитие процесса разделения при обращении с вторичными отходами в результате применения технологии гидроабразивной резки – суспензия и струя воды // Наука и образование: сборник материалов XМеждународной научной конференции и молодых ученых, Астана, 10 Апреля 2015. – Астана: ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 2015 – С. 356-360.

10. Катаева О.И., Седнев Д.А. Эффективный метод иммобилизации высокоактивных отходов // Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2016 – Т.5-№. 2. – С.105-109.

11. Sednev D.A., Kataeva O.I., Abramets V.V., Pushenko P. Ultrasonic fingerprinting by phased array transducer // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2016–Vol. 135, Article number 012039. –p. 1-6.