

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

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование зависимости предела динамической пластичности конструкционных материалов от скорости деформации

УДК 620.22:539.374

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОАМ83	Гайдамак Мария Александровна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к. ф.- м. н		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник отдела ФГУП "РФЯЦ - ВНИИЭФ"	Огородников В. А.	д. ф.-м. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук И. В.	к.т.н, доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные реакторы и энергетические установки	Кузнецов М.С.	к.т.н.		

Томск – 2020 г.

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований во всех областях использования ядерной энергии.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области ядерных физики и технологий.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие процессы, протекающие в ядерных реакторах с использованием признанных и принятых компьютерных кодов в ядерной отрасли
P4	Экспериментально изучать особенности протекания процессов реакторной физики. Уметь применять экспериментальные методы анализа нейтронно-физических и теплогидравлических процессов. Понимать и анализировать полученные данные.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами российского и международного уровня, составлять экспертное заключение.
P6	Понимание назначение и функционирование основных систем атомных электростанций. Понимать процесс управления отраслью на всех этапах, роль национального регулятора в лицензировании и эксплуатации атомных электростанций и основные нормативные требования, предъявляемые в атомной энергетике.
P7	Разработка сложных технических систем и решение практических задач путем обобщения коллективных знаний, полученных во всех соответствующих дисциплинах.
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P8	Самостоятельно учиться и 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	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности. Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

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

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Кузнецов М.С.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM83	Гайдамак Марии Александровне

Тема работы:

Исследование зависимости предела динамической пластичности конструкционных материалов от скорости деформации	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№59-102/с от 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2020
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект исследования – спец. материал, применяемый для изготовления спец. изделий ВНИИЭФ.</p> <p>Научно-технические отчеты по проведенным взрывным экспериментам, включая исходные данные на постановку и их результаты.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Изучение методов регистрации быстротекущих процессов в динамических исследованиях; - Обработка результатов экспериментов; - Определение значений предела динамической пластичности и скорости деформации для образцов из спец. материала; - Определение зависимости предела динамической пластичности конструкционных материалов от скорости деформации.
--	---

<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Презентация; - Сборочный чертеж.
--	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Экспериментальная часть	Огородников В.А.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кашук И.В.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Английский язык	Сумцова О.В.

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:
Реферат
Обзор литературы
Аналитическая часть

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	09.03.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник отдела ФГУП "РФЯЦ - ВНИИЭФ"	Огородников В. А.	д. ф.-м. н.		09.03.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ83	Гайдамак Мария Александровна		09.03.2020

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM83	Гайдамак Марии Александровне

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	14.04.02/Ядерные физика и технологии

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Сарова Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием РФЯЦ ВНИИЭФ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования.
3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)	Расчет бюджетной стоимости НИ по разработке стенда
4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	09.03.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н., доцент		09.03.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM83	Гайдамак Мария Александровна		09.03.2020

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM83	Гайдамак Марии Александровне

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	14.04.02/Ядерные физика и технологии

Тема ВКР:

Исследование зависимости предела динамической пластичности конструкционных материалов от скорости деформации	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования в данной работе является спец. материал, применяемый при конструировании спец. изделий ВНИИЭФ.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – Трудовой кодекс Российской Федерации (с изменениями на 16 декабря 2019 года); – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы; – СНиП 2.2.2.542-03 Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ; – СанПиН 2.2.4.548-96. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы; – ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере; – ТОИ Р-45-048-97. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональных электронно-вычислительных машинах; – СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки;

	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов; – Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности; – Постановлению Правительства №390 от 25.04. 2012 «О противопожарном режиме»; – ГОСТ Р. 12.1. 007-76 Вредные вещества //Классификация и общие требования безопасности.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> – микроклимат; – электромагнитные излучения высоких и низких частот; – шум и вибрация; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – электрический ток; – психофизиологические факторы.
3. Экологическая безопасность:	анализ воздействия процесса исследования на окружающую среду
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – выбор и описание возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения, связанные с эксплуатацией ПЭВМ; – анализ наиболее типичной ЧС – пожар.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	09.03.2020
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ83	Гайдамак Мария Александровна		

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

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки (специальность) 14.04.02 Ядерные физика и технологии
 Уровень образования высшее
 Отделение ядерно-топливного цикла
 Период выполнения весенний семестр 2019 /2020 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

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

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	19.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
05.02.2020	<i>Выдача задания</i>	5
06.02.2020	<i>Подбор и изучение литературных материалов по теме</i>	10
19.02.2020	<i>Обработка экспериментальных данных, полученных при проведении экспериментов методом скоростной фоторегистрации</i>	35
30.03.2020	<i>Обработка экспериментальных данных, полученных при проведении экспериментов методом импульсной рентгенографии</i>	30
20.04.2020	<i>Анализ данных, полученных в результате обработки</i>	10
04.05.2020	<i>Составление отчетной документации</i>	5
01.06.2020	<i>Сдача работы</i>	5

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к. ф.- м. н		

Консультант (при наличии)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

Начальник отдела ФГУП РФЯЦ- ВНИИЭФ	Огородников В.А.	д. ф.-м. н.		
--	------------------	-------------	--	--

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кузнецов М.С.	К.Т.Н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 111 с., 32 рис., 24 табл., 34 источников, 2 прил.

Ключевые слова: механические свойства, динамический предел пластической деформации, скорость деформации, взрывной эксперимент, метод скоростной фоторегистрации, метод импульсной рентгенографии, метод линейной регрессии.

Объектом исследования является спец. материал.

Цель работы – исследовать зависимость предела динамической пластичности конструкционных материалов от скорости деформации.

В процессе исследования проводились обработка и анализ результатов взрывных экспериментов с применением методов скоростной фоторегистрации и импульсной рентгенографии

В результате исследования получены значения предела динамической пластичности и скорости деформации для спец. материала, определен характер зависимости этих величин.

Область применения: конструирование образцов вооружения, военной и специальной техники

Экономическая эффективность/значимость работы средняя, ввиду использования дорогостоящего оборудования.

Перечень определений

Взрывчатое вещество: конденсированное химическое вещество или смесь таких веществ, способное при определенных условиях под влиянием внешних воздействий к быстрому самораспространяющемуся химическому превращению (взрыву) с выделением большого количества тепла и газообразных продуктов.

Детонация: процесс экзотермического химического превращения взрывчатого вещества, протекающего в узкой зоне (фронте детонации), распространяющейся с максимально возможной для данного взрывчатого вещества и данных условий скоростью, превышающей скорость звука в данном взрывчатом веществе.

Пластическая деформация: необратимое изменение положения частиц тела, связанное с их перемещением друг относительно друга.

Каземат: защитное сооружение, предназначенное для укрытия персонала и размещения оборудования.

Распределитель: устройство, передающее детонацию от детонатора к основной массе заряда взрывчатого вещества.

Детонатор: устройство для создания начального детонационного импульса и инициирования взрывной химической реакции в распределителе взрывного устройства.

Электродетонатор: детонатор, подрываемый высоковольтным импульсом.

Взрывное устройство: система одноразового применения, состоящая из заряда взрывчатого вещества, конструктивно объединенного с распределителем и детонатором.

Обозначения и сокращения

РСГ – разрезной стержень Гопкинсона;

ЭДС – электродвижущая сила;

ПЭТВ-2 – провод эмалированный теплостойкий (нагревостойкий) с изоляцией;

СФР-2М – скоростной фоторегистратор модифицированный;

БИМ 234-3000 – безжелезный импульсный бетатрон;

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

ВВ – взрывчатое вещество;

ПВ – продукты взрыва;

УСФ-2 – универсальный скоростной фотохронограф.

Содержание

Введение	16
1 Обзор литературы	18
1.1 Общие вопросы упругопластики твердых тел	18
1.2 Методы регистрации быстропротекающих процессов в динамических исследованиях	23
1.2.1 Метод электроконтактных датчиков	24
1.2.2 Метод резистивного датчика	26
1.2.3 Метод скоростной фоторегистрации	29
1.2.4 Метод импульсной рентгенографии	33
1.2.5 Метод лазерного гетеродин-интерферометра	36
2 Объект и методы исследования	39
3 Экспериментальная часть	40
3.1 Регистрация процесса развития трещин в цилиндрической оболочке методом скоростной фоторегистрации	40
3.1.1 Обработка результатов экспериментов № 1-6	45
3.2 Регистрация процесса развития трещин в цилиндрической оболочке методом импульсной рентгенографии	49
3.2.1 Обработка результатов эксперимента № 7	52
4 Аналитическая часть	54
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	57
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	58
5.1.1 Анализ конкурентных технических решений	58
5.1.2 SWOT-анализ	59
5.2 Планирование научно-исследовательских работ	62
5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	62

5.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ	64
5.2.3	Разработка графика проведения научного исследования	64
5.2.4	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	68
5.2.4.1	Материальные затраты	68
5.2.4.2	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	69
5.2.4.3	Основная заработная плата	70
5.2.4.4	Дополнительная заработная плата	71
5.2.4.5	Отчисления во внебюджетные фонды	72
5.2.4.6	Накладные расходы	72
5.3	Определение ресурсоэффективности исследования	73
5.3.1	Интегральный показатель финансовой эффективности	73
5.3.2	Интегральный показатель ресурсоэффективности	74
5.3.3	Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки	75
5.4	Выводы по разделу	77
6	Социальная ответственность	78
6.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	78
6.1.1.	Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	79
6.1.2.	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	80
6.2	Анализ опасных и вредных производственных факторов	82
6.2.1	Микроклимат	82
6.2.2	Электромагнитное излучение	83
6.2.3	Шум	84

6.2.4 Освещенность	86
6.2.5 Электробезопасность	87
6.2.6 Нервно – психические перегрузки	89
6.3 Экологическая безопасность	89
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	90
6.5 Выводы по разделу	91
Заключение	93
Список использованных источников	94
Приложение А	98
Приложение Б	111

Введение

Исследование физических и механических свойств конструкционных материалов, подвергаемых воздействию интенсивных динамических нагрузок, представляет собой важную научную задачу, имеющую большое практическое значение для современной науки и техники, особенно при разработке новых видов вооружений. Интенсивные динамические нагрузки с величиной давления в несколько гигапаскалей и длительностью до нескольких десятков микросекунд реализуются при воздействии на конструкционный материал взрыва взрывчатого вещества или при высокоскоростном соударении (со скоростью в несколько километров в секунду). Это приводит к возникновению в материалах сложных течений за счет последовательного воздействия на материал сначала сжимающей ударной волны, а затем волны расширения, возвращающей его характеристики (давление, плотность, температуру) в исходное состояние.

В результате ударно-волнового нагружения и последующего расширения в материалах возникают как обратимые, так и необратимые физические, физико-химические и механические процессы (разрушение, фазовые переходы вещества). Диагностика параметров материалов при воздействии на них интенсивных динамических нагрузок, понимание сущности и последующее построение корректных математических моделей процессов необходимы для решения разнообразных прикладных задач.

Целью работы является исследование зависимости предела динамической пластичности конструкционных материалов от скорости деформации.

В процессе конструирования образцов вооружения, военной и специальной техники, содержащих взрывчатые вещества, особое внимание уделяется механическим свойствам конструкционных материалов в условиях ударно-волнового нагружения, в частности при высоких значениях скорости деформации, что говорит об актуальности проведения данного исследования.

Объектом исследования в данной работе является спец. материал, применяемый при изготовлении спец изделий ВНИИЭФ.

1 Обзор литературы

1.1 Общие вопросы упругопластики твердых тел

Под воздействием внешних сил размеры и форма тела изменяются, т.е. все реальные тела деформируются вплоть до разрушения. Степень, характер и вид деформации зависят от свойств, форм и размеров материалов, а также от способа приложения внешних сил.

В инженерных оценках принимается, что разрушение тела происходит мгновенно, если какая-либо критериальная величина принимает критическое значение. В качестве критериальных величин рассматриваются наибольшее главное напряжение, относительное удлинение (деформация), главное касательное напряжение, удельная энергия формоизменения или полная энергия деформации. Каждый из этих критериев применим при вполне определенных условиях для некоторого класса материалов.

Реологическое поведение материалов характеризуется двумя предельными случаями: пластическое течение (предел текучести σ_T) или хрупкое разрушение (предел прочности σ_B). Необходимо отметить, что один и тот же материал может находиться в хрупком и пластическом состояниях в зависимости от условий нагружения. Пределы текучести и прочности материала зависят от многих факторов: формы и размеров образца, структуры материала, параметров внешней среды, условий нагружения. На рисунке 1 представлены диаграммы деформирования.

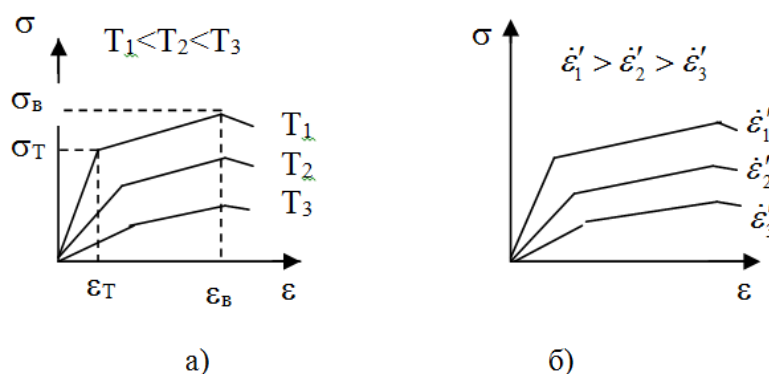


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования: а) в зависимости от T (температуры), б) в зависимости от $\dot{\epsilon}$ (скорости деформации)

При постоянном значении деформации материала ($\varepsilon = \text{const}$) напряжение с течением времени снижается (явление релаксации), а деформация при постоянном уровне напряжений ($\sigma = \text{const}$) со временем увеличивается (явление ползучести).

При циклических нагрузках разрушение наступает при достижении предела усталости $\sigma_{п.у.}$, который зависит от числа циклов нагружения $N_{ц}$. Как при ползучести, так и при усталости поведение материалов связано со временем и условиями приложения нагрузки [1].

В зависимости от характера действия нагрузок во времени их подразделяют на статические и динамические.

Статическими называются нагрузки, числовое значение, направление и место приложения которых остаются постоянными или меняются медленно и незначительно. Таким образом, можно полагать, что при передаче статических нагрузок все части конструкции находятся в равновесии. Пример статической нагрузки – сила тяжести сооружения.

Динамическими называются нагрузки, характеризующиеся быстрым изменением во времени их значения, направления или места приложения.

К динамическим относятся ударные, внезапно приложенные и повторно-переменные нагрузки. Ударные нагрузки возникают, например, при ковке металла или забивке свай; примером внезапно прикладываемой нагрузки является давление колеса, катящегося по рельсу; повторнопеременные нагрузки испытывают, например, детали кривошипно-ползунного механизма. К динамическим относятся также инерционные нагрузки, например, силы инерции в ободке вращающегося маховика.

Многие материалы при динамических и квазистатических нагрузках ведут себя по-разному. Ранние работы в этой области принадлежат В. Норкисон и W. Manson, они использовали падающий наконечник для получения импульса растяжения. Ginns, используя пружинный механизм для приложения внезапной нагрузки и тензодатчик для измерения напряжения, был одним из первых, кто попытался напрямую записать динамическую кривую напряжения –

деформации. Позже Brown и Vincent с помощью маятниковой ударной машины и пьезоэлектрических кристаллов для измерения напряжений получили кривые напряжения – деформации непосредственно на экране осциллографа. До 1940 г. измерение напряжения всегда включало один из двух методов. Напряжения вычислялись из соотношений теории распространения упругих волн и поэтому было ограничено упругой областью. Однако в 1940 г. Fanning и Bassett разработали методику измерения ударных деформаций с помощью тензорезисторов с электрическим сопротивлением, а в 1948 г. Brown и Edmonds применили ударную маятниковую машину. Это позволило фиксировать импульсы напряжения растяжения во времени, которые не искажали колебания напряжения, возникающие в измерительной головке. Большинство исследователей, помимо Hopkinson и Manson, игнорировали влияние распространения волны напряжения в образце, считая, что напряжение, измеренное на конце образца, эквивалентно напряжению во всем образце. Guest в 1930 г. пришел к выводу, что, когда скорость удара достаточно высока, распространение и отражение волн напряжения в испытательной установке, если их игнорировать, могут привести к значительным ошибкам в результатах. Это было показано в 1948 г. в работах Clark и Duwez, в которых применена теория распространения пластических волн к испытаниям на растяжение.

Clark и Wood в работе 1949 г. описали устройство нового типа растягивающей машины, в которой сила приложена пневматически и достигает максимального значения в течение 5 мкс. Такой тип нагружения они называли «быстрым», под которым они подразумевали динамическое нагружение со скоростями, при которых эффект распространения волны напряжения в устройстве пренебрежимо мал. Это отличается от ударного нагружения, когда волновые эффекты должны быть приняты во внимание.

Campbell и Duby в 1956 г. были первыми, кто смог получить значение предела текучести мягкой стали с временем воздействия 25 мкс и максимальной скоростью деформации порядка 1000 с^{-1} [2].

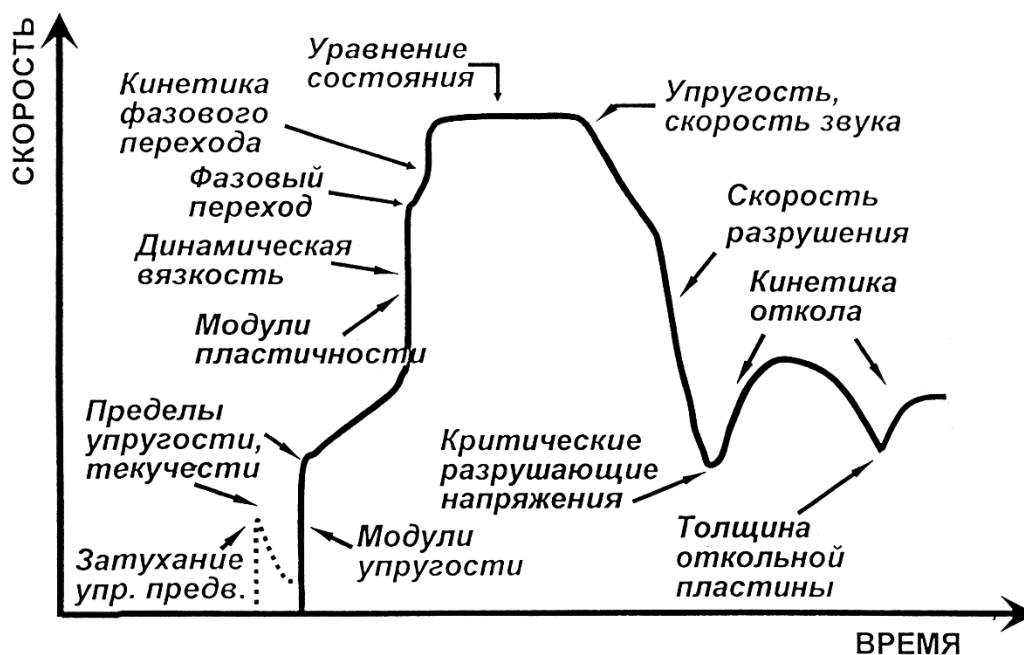
В настоящее время для исследования динамического поведения материалов при скоростях деформаций порядка $10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$ применяют метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) или его модификации. Изначально этот метод был предназначен только для испытания на одноосное сжатие, метод постоянно совершенствовался и на сегодняшний день существуют сжимающий, растягивающий, крутильный, сдвиговой и двуосный варианты метода РСГ.

Исследование поведения веществ при интенсивных динамических нагрузках представляет несомненный научный и прикладной интерес. Так, ударно-волновое нагружение твердых тел способно приводить к перестройке кристаллической решетки, изменению объема и температуры, фазовым превращениям, изменению электросопротивления и проводимости и т. п., кроме того, ударные волны являются инструментом в изучении свойств материалов при экстремально высоких скоростях деформации ($10^4 - 10^9 \text{ с}^{-1}$) и давлениях ($10^0 - 10^3 \text{ ГПа}$), на несколько порядков больших, чем достигаемые при статических и квазистатических нагрузках.

Ударно-волновое нагружение представляет собой скачок уплотнения, в котором происходит резкое увеличение плотности и давления в материале, распространяющийся со сверхзвуковой скоростью. Толщина фронта ударной волны имеет порядок длины свободного пробега элементарной частицы и составляет 10^{-6} м . При решении практических задач и в теоретических исследованиях ввиду малости значения толщины ударного фронта его заменяют поверхностью разрыва, при прохождении через которую изменение параметров среды носит скачкообразный характер [3].

Влияние прочности и переход материала из упругого состояния в пластическое связывают с потерей устойчивости ударной волны. При этом, при переходе вещества в пластическое состояние ударная волна разделяется на упругую (упругий предвестник) и пластическую. Процесс разделения ударной волны проиллюстрирован на рисунке 2.

ПОЛНЫЙ ПРОФИЛЬ УДАРНОЙ ВОЛНЫ



- ✓ Использование техники ударных волн позволяет изучать свойства материалов при длительности воздействия 10^{-8} – 10^{-6} с в условиях одномерной деформации при напряженном состоянии, близком к всестороннему сжатию или растяжению.

Рисунок 2 – Процесс разделения ударной волны

Динамический предел текучести определяется по формуле:

$$Y = 0,5 \cdot \frac{1-2 \cdot \nu}{1-\nu} \cdot \rho_0 \cdot c_l \cdot W_{упр}, \quad (1)$$

где ν – коэффициент Пуассона,

ρ_0 – плотность материала, кг/м³,

c_l – продольная скорость звука, м/с,

$W_{упр}$ – скорость свободной поверхности на упругом предвестнике, м/с.

Откольная прочность определяется по формуле:

$$\sigma_{отк} = 0,5 \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot (W_1 - W_2), \quad (2)$$

где c_0 – объемная скорость звука, м/с,

W_1 – скорость свободной поверхности в первом максимуме, м/с,

W_2 – скорость свободной поверхности в первом минимуме, м/с.

Динамический предел прочности можно определить по следующей формуле:

$$\varepsilon = \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (3)$$

где R_1 – значение начального линейного размера, мм

R_2 – значение конечного линейного размера, мм [4].

1.2 Методы регистрации быстропротекающих процессов в динамических исследованиях

Измерения физических параметров быстропротекающих нестационарных процессов, к которым относятся ударно-волновые, имеют свои характерные особенности. Их приходится проводить за очень короткое время (чаще всего за несколько десятков микросекунд), а регистрация должна проводиться дистанционно, поскольку при взрыве и ударе сложно избежать разрушения как исследуемого образца, так и разного рода объектов, находящихся рядом с ним по тем или иным причинам. Измерения должны быть как можно более полными, так как исследуемую систему (сборку, образец) невозможно вернуть в исходное состояние для перепроверки полученных результатов. Решение проблем, связанных с особенностями измерений параметров взрыва и удара, привело к разработке большого количества специальных методов, позволяющих получать необходимую информацию на требуемом уровне. Как правило, название того или иного экспериментального метода соответствует физическому принципу, лежащему в основе измерений. Для электрических измерений: электроконтактный – замыкание электрической цепи, емкостной – изменение емкости конденсатора, электромагнитный – изменение магнитного потока, и, как следствие, появление в контуре ЭДС и т.д.

Экспериментальные методы можно разделить на два основных типа:

– дискретные – когда регистрируется сигнал, соответствующий определенному событию в пространстве;

– непрерывные – в них непрерывно во времени записывается сигнал, несущий информацию о состоянии определенного параметра исследуемого образца, например, изменение движения заданной поверхности.

Важнейшим элементом любого метода, любой измерительной системы является датчик (преобразователь, детектор), регистрирующий или преобразующий контролируемую величину в сигнал, удобный для измерения. Датчик может быть непосредственно установлен на исследуемый образец или расположен дистанционно, в частности внутри защитного сооружения. Датчики и соответствующие им схемы измерений обычно разделяют в зависимости от того, какую физическую величину можно получить в результате эксперимента (скорость, давление и т.п.).

Коротко приведены некоторые физические принципы, лежащие в основе методов регистрации параметров материалов при воздействии на них интенсивных динамических нагрузок (в результате воздействия взрыва или соударения с высокими скоростями) [5].

1.2.1 Метод электроконтактных датчиков

Метод электроконтактных датчиков основан на измерении моментов времени замыкания металлических токопроводящих контактов, на которые предварительно подано электрическое напряжение (U) от 50 В до 200 В (в зависимости от используемого измерительного оборудования). Как правило, электроконтакты изготавливаются из провода типа ПЭТВ-2 диаметром 0,28 мм и закрепляются на основе в определенном порядке, образуя узлы координатной сетки в пространстве. Зная положение электроконтактов в пространстве и моменты времени их замыкания можно судить о параметрах регистрируемого процесса, в частности о форме движения поверхности или о её скорости. Погрешность установки контактов не превышает 0,5 мм. Оборудование, позволяющее подавать напряжение на электроконтакты и регистрировать моменты времени их замыкания, чаще всего представляет собой единый прибор

– многофункциональный измерительный комплекс. Погрешность регистрации времени замыкания электроконтактов на таком комплексе не превышает 0,035 мкс. Встроенное программное обеспечение такого измерительного комплекса проводит автоматическую обработку зарегистрированной информации (в зависимости от изначально заданных параметров регистрации) и выдает результат в удобной читаемой форме. Кроме этого всегда имеется возможность просмотреть исходную информацию в виде зарегистрированных осциллографических сигналов в аналоговой или цифровой формах. На рисунке 3 проиллюстрирована принципиальная схема постановки измерений электроконтактными датчиками скорости движения исследуемого объекта, на рисунке 5 приведен пример полученного результата (видно, что на разных участках исследуемый объект имеет разные скорости движения).

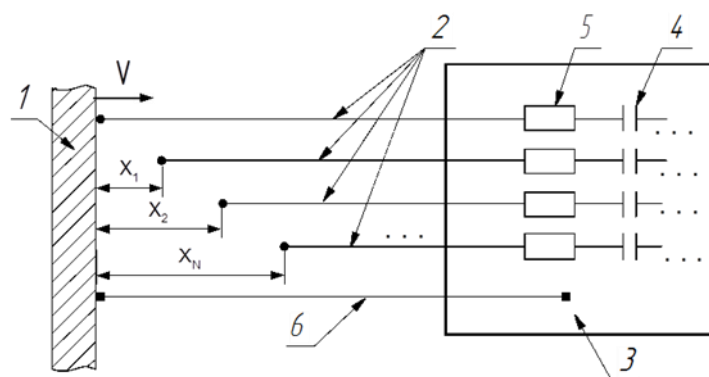


Рисунок 3 – Принципиальная схема постановки измерений электроконтактными датчиками скорости движения исследуемого объекта

На рисунке 3 приведены следующие обозначения:

1 – исследуемый образец, движущийся со скоростью v ;

2 – электроконтакты (до N шт.), установленные на расстояниях x_1, x_2, \dots, x_N от образца;

3 – измерительный комплекс, подающий напряжение на контакты и регистрирующий моменты их срабатывания;

4, 5 – емкость, заряженная до заданного напряжения и сопротивление (из состава измерительного комплекса);

6 – общий провод (для обеспечения замкнутости электрической цепи).

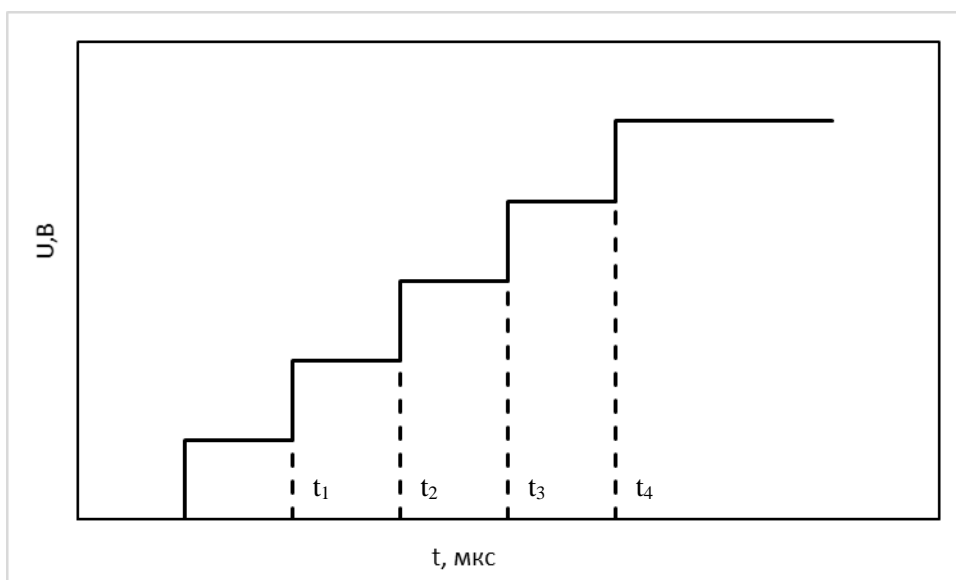


Рисунок 4 – Характерный профиль изменения напряжения со временем при регистрации электроконтактной методикой по схеме на рисунке 3.

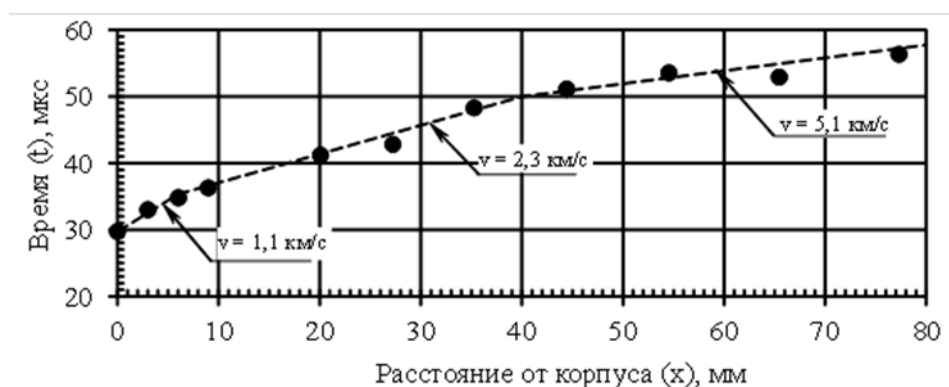


Рисунок 5 – Пример результата измерений электроконтактными датчиками [5,6].

1.2.2 Метод резистивного датчика

Метод резистивного датчика основан на регистрации изменения силы электрического тока через переменный резистор (резистивный датчик), за счет изменения его электрического сопротивления при взаимодействии с движущейся поверхностью исследуемого образца. Как правило, резистивный датчик представляет собой отрезок провода с высоким омическим сопротивлением (обычно используют нихромовый провод), закрепленный внутри трубки диаметром порядка 0,5 мм. При необходимости точной

регистрации момента окончания записи рядом с нихромовым проводом в трубку устанавливают обычный медный провод, смещая его торец на заранее определенное расстояние. Движущаяся поверхность исследуемого образца укорачивает длину резистивного датчика, что приводит к изменению напряжения, которое регистрируется осциллографом.

Схемы конструкции, установки и подключения резистивного датчика при измерениях параметров движения поверхности приведены на рисунке 6, 7 и 8 соответственно.

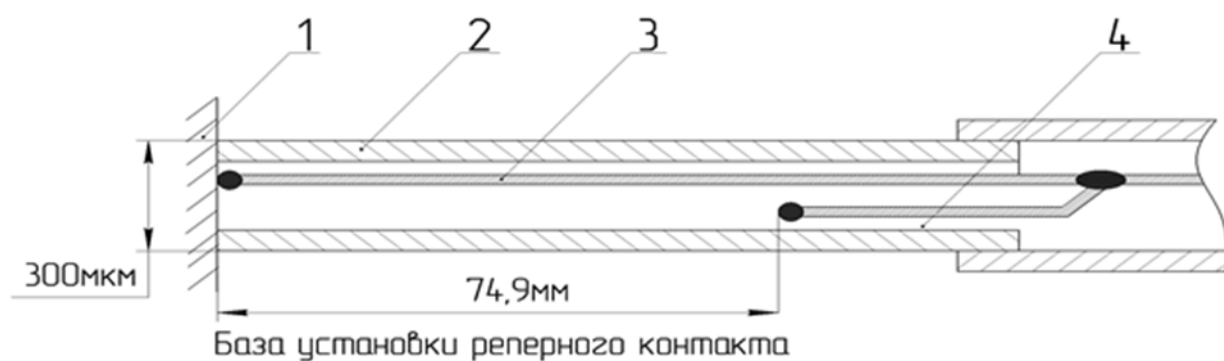


Рисунок 6 – Схема конструкции резистивного датчика

На рисунке 6 приняты обозначения:

- 1 – исследуемая поверхность;
- 2 – трубка диаметром 0,3 мм;
- 3 – нихромовый провод диаметром 0,05 мм;
- 4 – медный провод диаметром 0,1 мм.

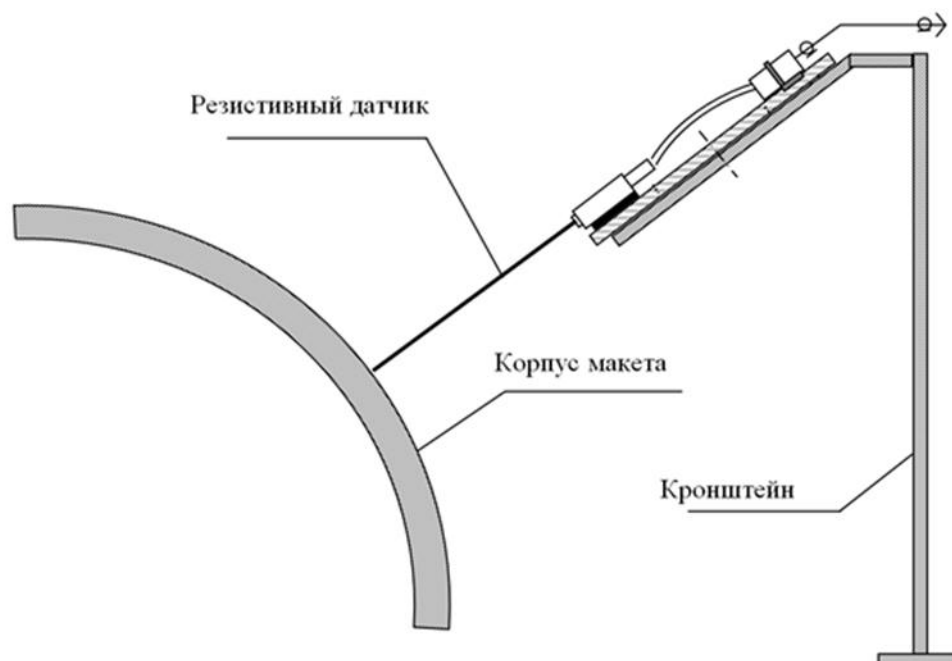


Рисунок 7 – Схема установки резистивного датчика.

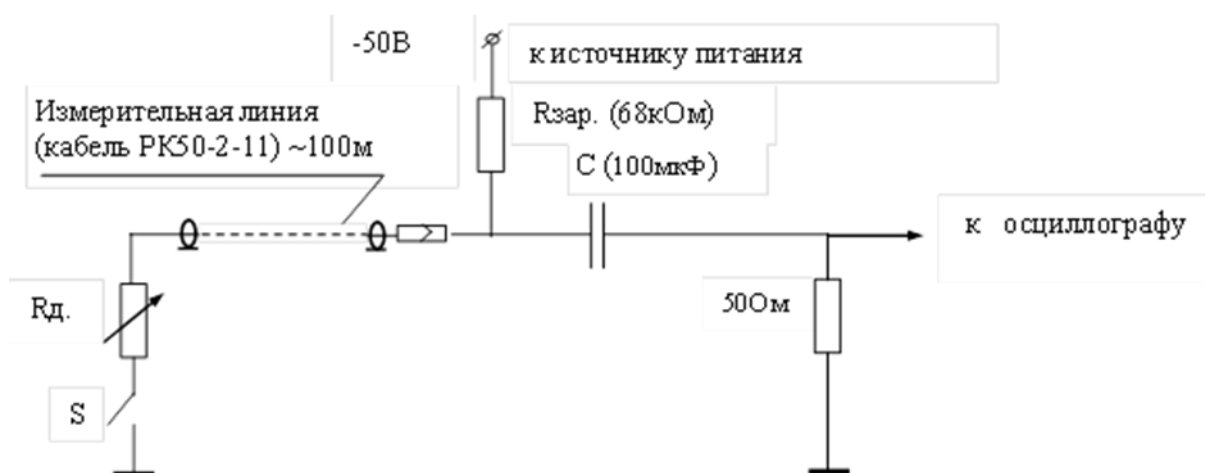


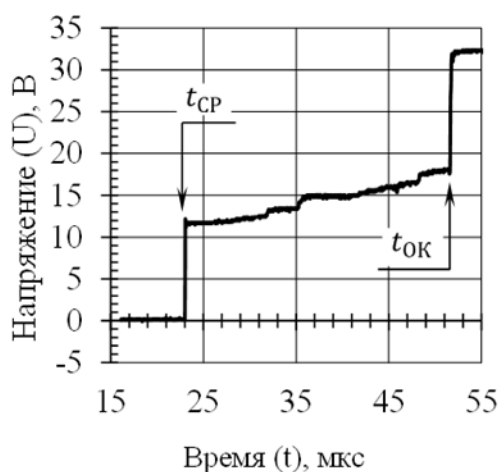
Рисунок 8 – Схема подключения резистивного датчика к измерительному каналу.

На рисунке 8 приняты обозначения:

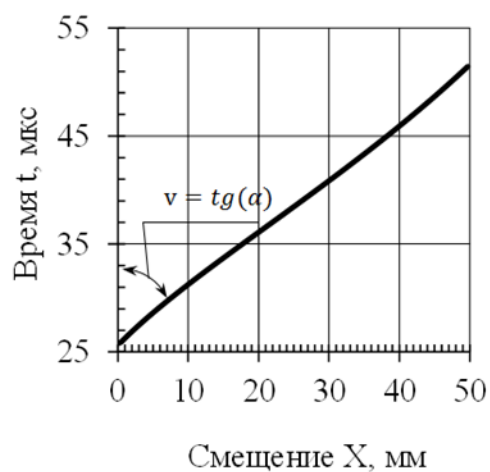
Рд. – сопротивление резистивного датчика ($\approx 50 \text{ Ом}$);

S – движущаяся поверхность.

На рисунке 9 приведена характерная осциллограмма сигнала с резистивного датчика, измеряющего движение исследуемой поверхности и результат её обработки – зависимость положения (смещения) поверхности (X) от времени (t). По осциллограмме можно определить момент начала движения поверхности исследуемого образца ($t_{\text{СР}}$), момент окончания регистрации ($t_{\text{ОК}}$), а в результате обработки – скорость (v).



а) Исходная осциллограмма



б) Результат обработки

Рисунок 9 – Иллюстрация измерений резистивным датчиком

1.2.3 Метод скоростной фоторегистрации

Метод скоростной фоторегистрации основан на регистрации динамических явлений, возникающих при быстропротекающих процессах с помощью скоростного фоторегистратора СФР-2М, способного работать в режиме «лупы времени» со скоростью фотографирования от $2,5 \cdot 10^4$ кадров/сек до $2,5 \cdot 10^6$ кадров/сек (покадровая съёмка) или в режиме фотохронографа, при этом «вырезается» узкая область исследуемого объекта (за счет применения узкой щели) и непрерывно проектируется (разворачивается) на светочувствительный элемент (фотопленку) со скоростью до 3 км/с. Исследуемые оптические явления проецируются через объектив и при помощи вращающегося плоского металлического зеркала развёртываются во времени на неподвижном светочувствительном элементе, расположенной по дуге (с центром по оси вращения зеркала). Принципиальная схема фоторегистратора приведена на рисунке 10. Скорость вращения зеркала в скоростном фоторегистраторе ω составляет 10 000 оборотов в секунду.

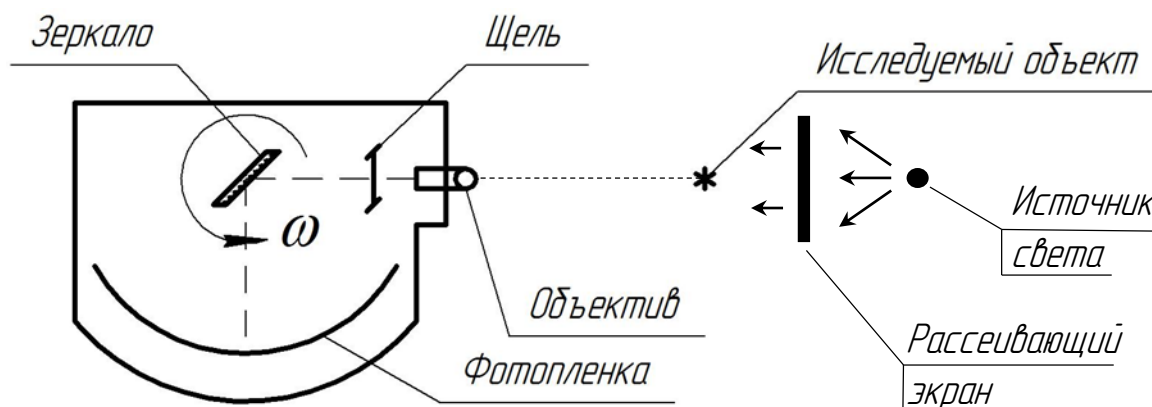


Рисунок 10 – Принципиальная схема скоростного фоторегистратора

Съёмка регистрируемого объекта может вестись как на фоне подсветки (как правило, используется взрывная подсветка), так и за счет собственного свечения объекта (если объект способен самостоятельно излучать свет). При использовании фоторегистратора в режиме «лупы времени» получается последовательность дискретных фотографических кадров с изображением объекта исследования. По этим кадрам определяется изменение исследуемого объекта во времени и делаются соответствующие выводы. При использовании фоторегистратора в режиме щелевой развертки (фотохронографа) регистрируется непрерывное изменение во времени определенной области исследуемого объекта (то что попадает в щель). Результатом обработки, как правило, является $x - t$ диаграмма движения регистрируемых объектов (изменение положения объекта исследования во времени). С её использованием можно определить скорость движения объекта и судить о процессах, происходящих с исследуемым объектом. В методе скоростной фоторегистрации погрешность измерения временных интервалов не хуже, чем $\Delta t = \pm 0,05$ мкс, а погрешность определения пространственных координат зависит от увеличения объектива прибора и, как правило, не хуже, чем $\Delta r = \pm 0,5$ мм. Таким образом, используя метод скоростной фоторегистрации можно получить общий вид – качественную картину процесса, а также определить некоторые количественные характеристики, например, скорость исследуемого объекта.

На рисунке 11 проиллюстрирована работа фотохронографа в режиме лупы времени и в режиме щелевой развертки при регистрации процесса развития

трещин в стальной цилиндрической оболочке, нагружаемой взрывом взрывчатого вещества изнутри. Зная начальные размеры оболочки и измерив её размер (радиус) на момент образования трещин, можно определить динамический предел пластической деформации исследуемого материала (Формула 3). Измерив экспериментально скорость разлета, можно определить скорость пластической деформации.

Скорость разлета определяется по уравнению:

$$V = \frac{\Delta R}{\Delta t}, \quad (4)$$

где ΔR – изменение линейного размера, мм,

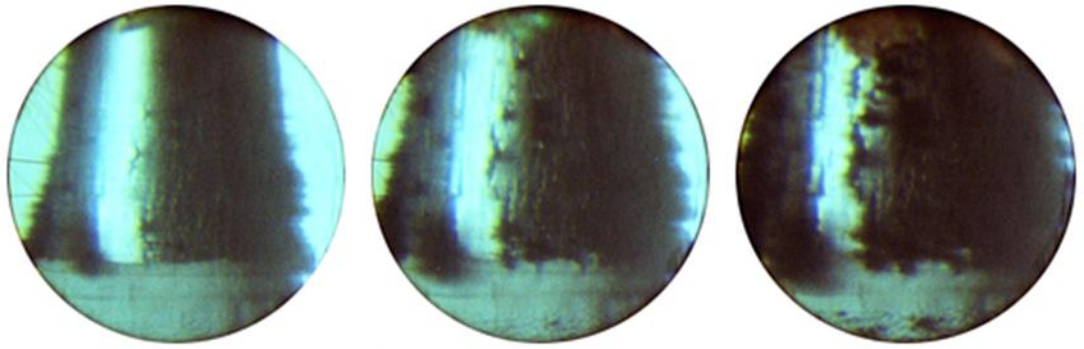
Δt – изменение времени, мкс.

Скорость пластической деформации можно определить по формуле:

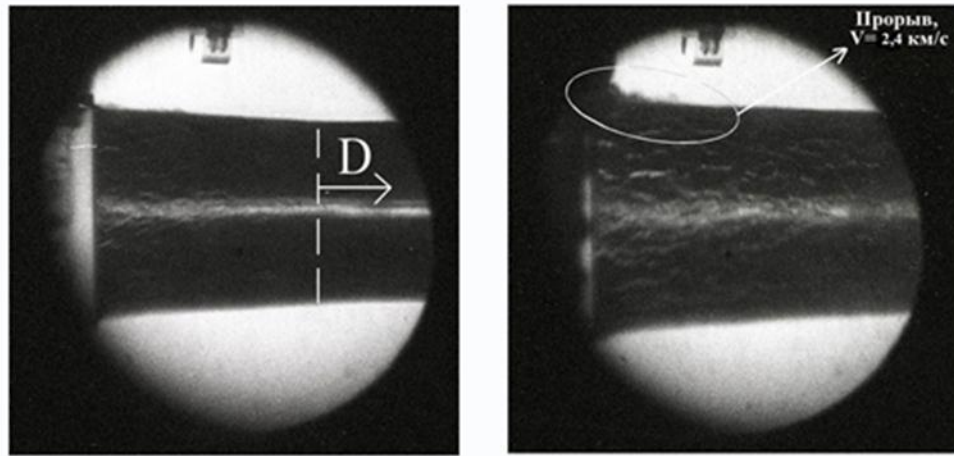
$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{R}, \quad (5)$$

где V – скорость разлета, км/с,

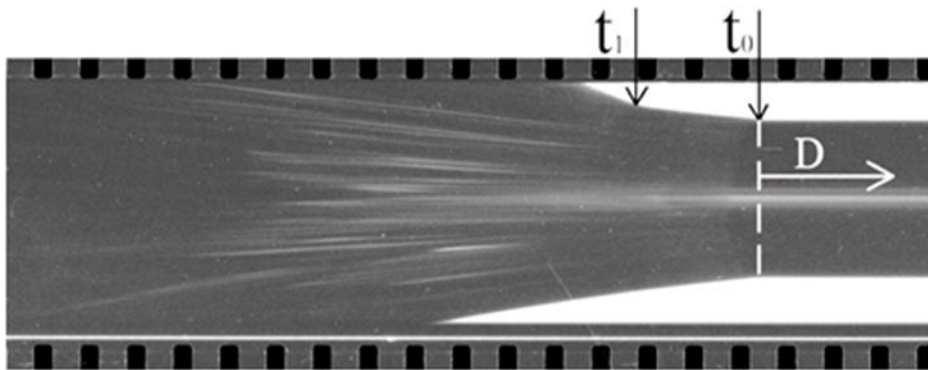
R – конечный линейный размер.



а) кадры, снятые фоторегистратором в режиме «лупы времени»



б) пример обработки кадров, снятых фоторегистратором в режиме «лупы времени»



в) фотохронограмма на пленке, снятая фоторегистратором в режиме щелевой развертки и её обработка

Рисунок 11 – Примеры использования фоторегистратора в разных режимах работы [7-10].

1.2.4 Метод импульсной рентгенографии

Существует множество быстропротекающих явлений, детальное изучение которых обычными оптическими средствами не представляется возможным. Для решения подобных задач используют методы импульсного рентгенографирования быстропротекающих процессов с очень малыми временами экспозиции. Основное качество рентгеновских лучей – большая проникающая способность – снимает большинство ограничений, связанных с экранировкой изучаемого явления продуктами взрыва или пороховыми газами. Метод импульсной рентгенографии позволяет визуально зарегистрировать состояние исследуемого образца на определенный момент времени. Рентгенографическая установка представляет собой сложный комплекс. Существующие в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ рентгенографические комплексы позволяют зарегистрировать до 9-ти кадров в одном опыте, т.е. получить до 9-ти изображений одного и того же образца на 9 разных моментов времени. Соотношение между ослаблением рентгеновского излучения и плотностью вещества в некоторых случаях позволяет определять плотность материала за фронтом сильных детонационных и ударных волн, и его массу.

На рисунке 12 приведена фотография рентгенографического комплекса РФЯЦ-ВНИИЭФ, состоящего из трех рентгенографических установок БИМ 234.3000 [11].

Некоторые технические характеристики установки БИМ 234.3000:

Граничная энергия электронов – 60 МэВ;

Длительность импульса излучения – (150-180) нс;

Просвечивающая способность – 230 г/см².



Рисунок 12 – Рентгенографический комплекс из трех установок БИМ 234.3000.

На рисунках 13 и 14 представлены некоторые результаты опытов с применением импульсной рентгенографии. На рисунке 13 показано схождение цилиндрической оболочки под воздействием взрыва взрывчатого вещества, установленного снаружи. На различные моменты времени t видно изменение её толщины, развитие (увеличение) возмущений и положение фронта ударной волны (виден переворот положения фронта под возмущениями). На рисунке 14 видно развитие трещин на цилиндрической оболочке при её нагружении взрывом взрывчатого вещества изнутри. По этим результатам, также, как и по результатам метода скоростной фоторегистрации, можно определить реологические параметры (деформацию) исследуемого материала.

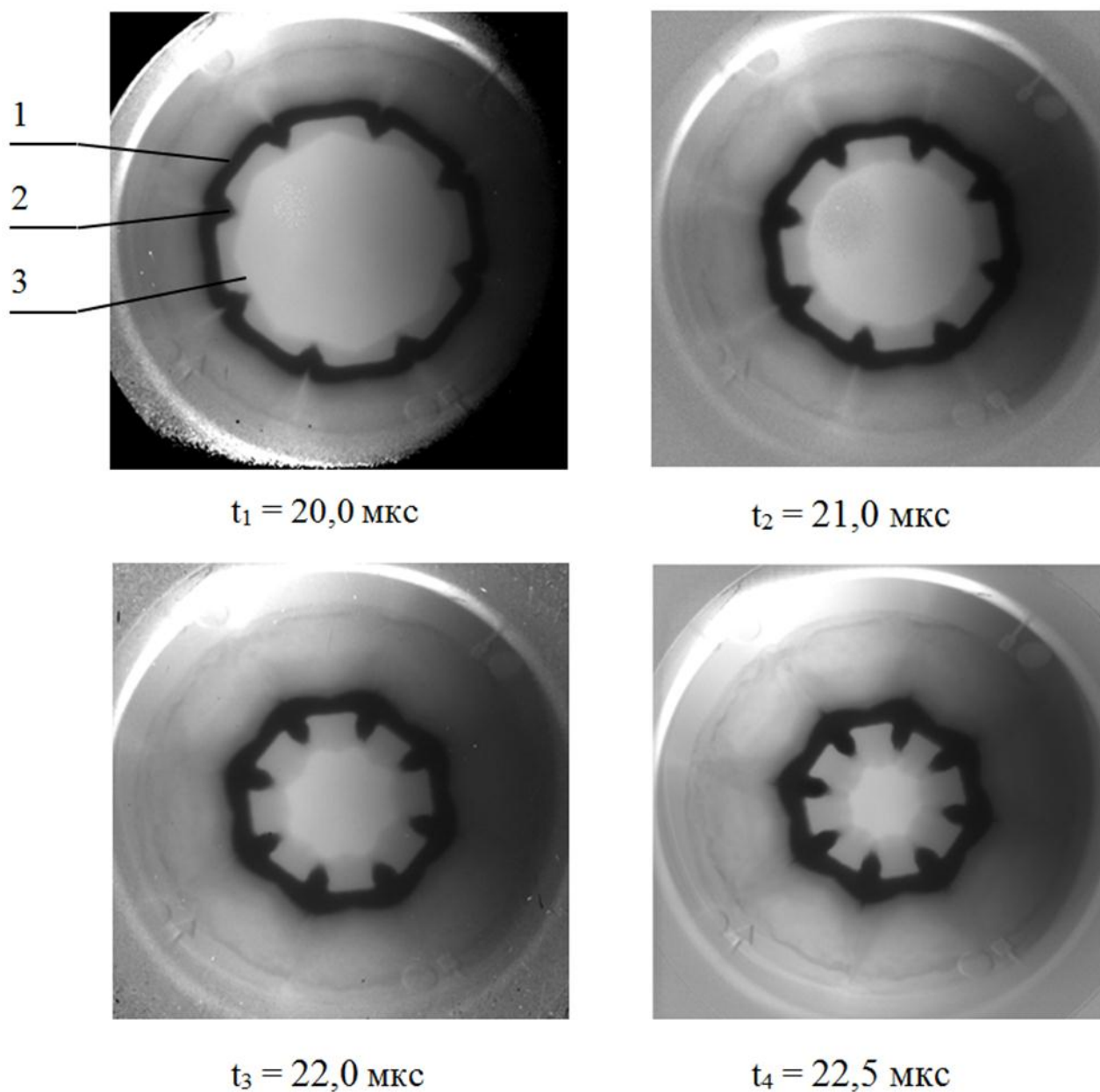


Рисунок 13 – Иллюстрация схождения оболочки и развития возмущений.

На рисунке 13 приняты следующие обозначения:

- 1 – исследуемый образец (оболочка);
- 2 – возмущение на оболочке;
- 3 – фронт ударной волны в среде перед движущейся оболочкой [12 - 15].

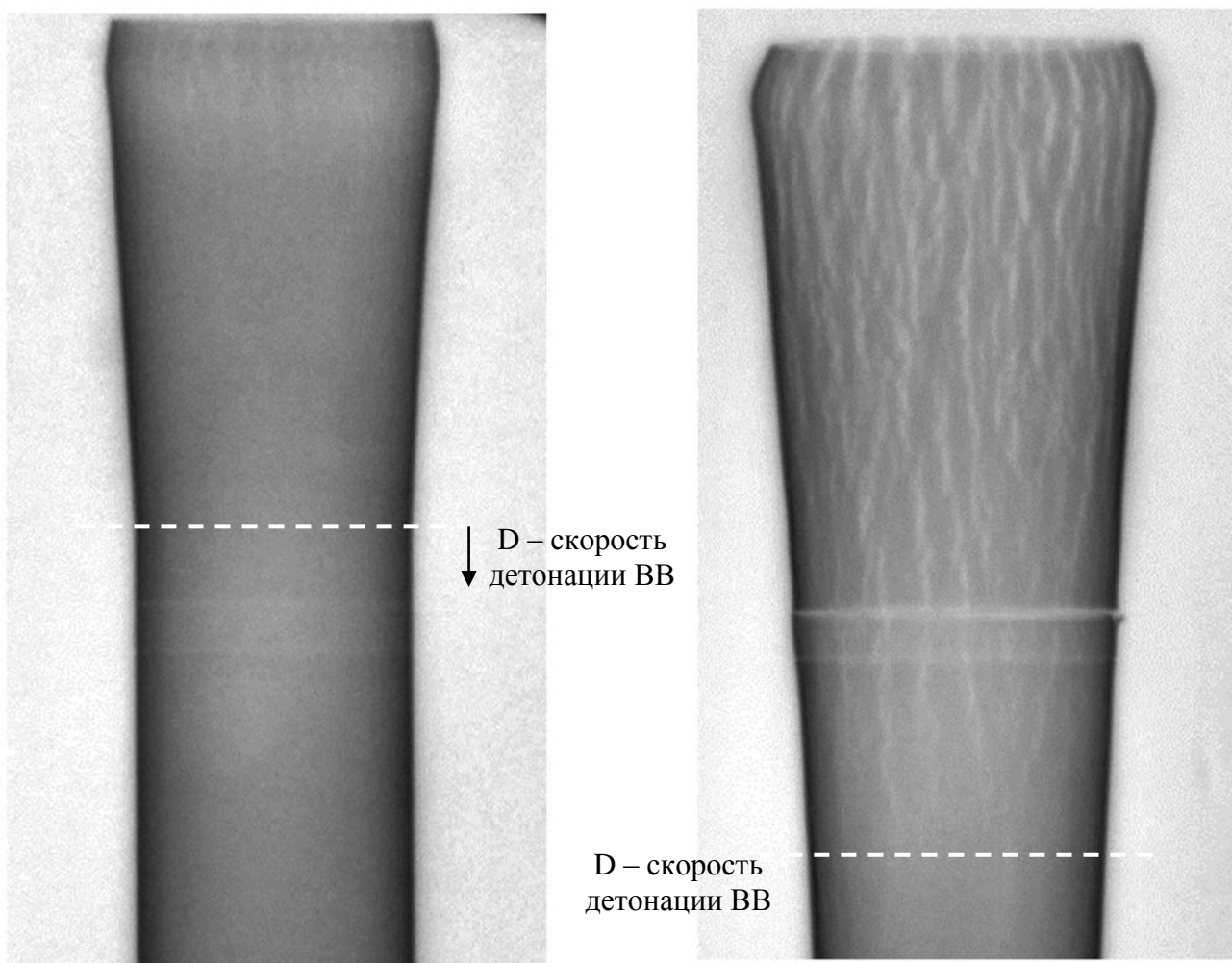


Рисунок 14 – Иллюстрация трещин на цилиндрической оболочке.

1.2.5 Метод лазерного гетеродин-интерферометра

Метод лазерного гетеродин-интерферометра (PDV – Photon Doppler Velocimetry), являясь результатом развития и модернизации лазерных интерферометрических методов измерения скорости, основан на использовании оптического гетеродинирования с анализом АЧХ интерференционного сигнала (суммы опорной волны и волны, отраженной от движущейся поверхности). Отражаясь от движущейся поверхности, сигнальная волна (зондирующий луч) непрерывно меняет свою фазовую составляющую, а при интерференции с опорной волной образуется сигнал с биениями интенсивности определенной частоты. Эта частота прямо пропорциональна скорости движущейся

поверхности и может быть определена при помощи современного оборудования для оцифровки и спектрального анализа сигнала с результатом на выходе в виде спектрограммы профиля скорости от времени. Принципиальная схема лазерного гетеродин-интерферометра представлена на рисунке 15.

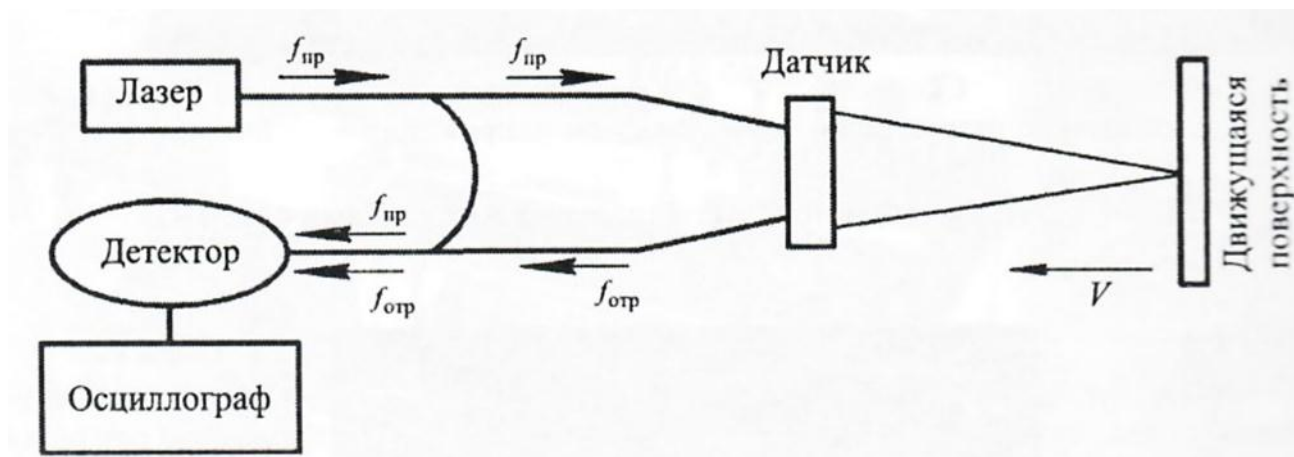


Рисунок 15 – Принципиальная схема лазерного гетеродин-интерферометра

Излучение по оптоволоконному каналу передается от лазера к датчику. Он представляет собой линзу, посредством которой осуществляется фокусировка света на исследуемой поверхности и сбор достаточного количества отраженного или рассеянного света. Собранный с движущейся поверхности свет с доплеровским сдвигом передается по оптоволокну к детектору. Часть зондирующего (опорного) излучения по отводящей схеме также передается непосредственно от лазера к детектору без фазового сдвига. Далее, посредством интерференции отраженного и опорного лучей, идущих в одном направлении в одном волокне, реализуется амплитудная модуляция результирующего сигнала по изменению фазы, регистрируемая детектором. Регистрация сигнала с детектора осуществляется с помощью широкополосного осциллографа [16].

В методе PDV сигналом, несущим информацию о скорости, является осциллограмма с быстродействующего фотодетектора, который регистрирует биения интерференционного сигнала, возникающие в одномодовом волокне при суперпозиции опорного излучения и отраженного сигнала. Обработка такого сигнала с помощью «оконного» Фурье-преобразования дает возможность регистрировать спектры скоростей с зондируемой поверхности.

На рисунке 16 представлены пример частотно-временной характеристики, регистрируемой на осциллографе, и полученная после математической обработки осциллограммы зависимость скорости пластины, метаемой продуктами взрыва взрывчатого вещества, от времени.

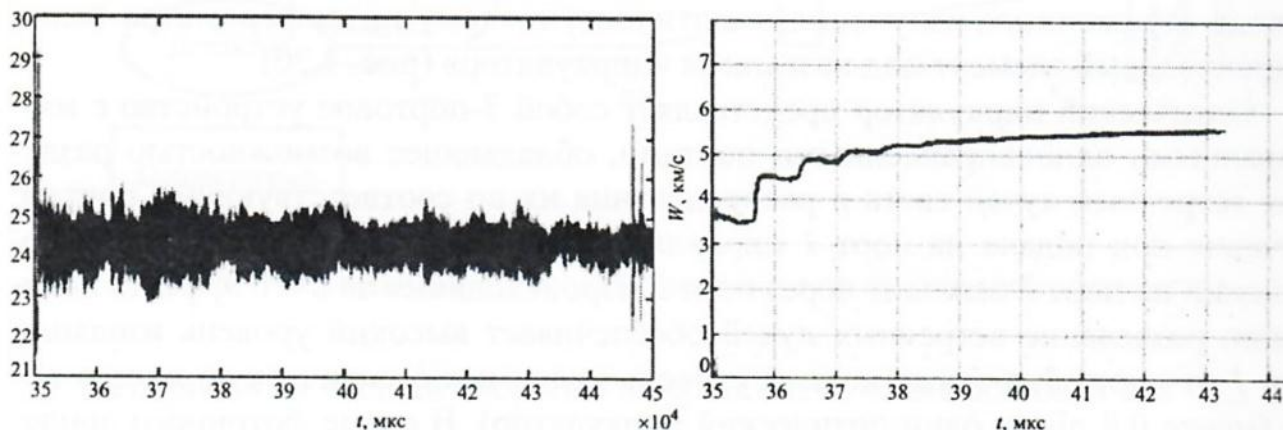


Рисунок 16 – Сигнал, регистрируемый на осциллографе, и амплитудно-частотная зависимость скорости от времени, полученная посредством математического анализа.

Применение нескольких методов, основанных на разных физических принципах, при исследовании одного и того же явления повышает достоверность полученных результатов. В данной работе приведена обработка результатов экспериментов, в которых использовали методы скоростной фоторегистрации и импульсной рентгенографии, для диагностики процесса развития трещин в цилиндрической оболочке, нагружаемой изнутри взрывом взрывчатого вещества. По результатам обработки полученных данных определены динамический предел пластической деформации исследуемого материала и скорость пластической деформации [17 - 20].

2 Объект и методы исследования

Объектом исследования в данной работе является спец. материал.

Целью проведения экспериментов является исследование пластических свойств материалов. Так как для стали 3 пластичность известна, она является «эталонным» материалом. Полученные в экспериментах значения можно сравнивать с известными табличными данными и между собой.

Область применения спец. материала – конструирование образцов вооружения, военной и специальной техники. Предметом исследования является механическое свойство данного материала – динамический предел пластической деформации, а также его зависимость от скорости деформации. Так как в указанной области применения конструкционные материалы подвергаются ударно-волновому нагружению, целесообразно проведение экспериментов с применением ВВ. Высокая скорость деформации и малое характерное время исследуемого процесса требуют применения высокоскоростных методик регистрации. В данной работе применялись методы высокоскоростной фоторегистрации и импульсной рентгенографии. Результатами проведения экспериментов являются снимки, отражающие процесс деформации и разрушения образцов.

Для оцифровки снимков применялась программа GetData Graph Digitizer. Данная программа позволяет установить масштаб снимка, оцифровать автоматически или вручную графики и диаграммы. Оцифрованные графики были обработаны методом линейной регрессии в программе Excel пакета программ Microsoft Office.

3 Экспериментальная часть

3.1 Регистрация процесса развития трещин в цилиндрической оболочке методом скоростной фоторегистрации

Использование метода теневой фотохронографии дает дополнительную информацию о процессе разрушения образца (кинематические параметры движения наружной поверхности трубки, динамическая пластичность). С помощью метода теневой скоростной фоторегистрации проведено шесть экспериментов (три эксперимента с образцами из стали 3 и три эксперимента с образцами из спецматериала), отличающихся постановкой. Общий принцип постановок приведен ниже.

Схемы экспериментальных макетов для каждого эксперимента приведены на рисунках 17, 18. На внутреннюю стенку цилиндра-образца 1 закрепляли слой состава пластического ВВ 2 (за исключением экспериментов № 5 и № 6 – в них закладывалась шашка ВВ на основе октогена). Для изготовления цилиндрического слоя из пластического ВВ использовали пластину, свернутую в трубку. На месте испытания слой из пластического ВВ устанавливали в цилиндр так, чтобы стык вдоль образующей цилиндра был обращен в сторону тыловой аргоновой подсветки.

Зависимость предела пластичности от скорости деформации лежит в основе принятия решений о применении данного спец. материала при конструировании образцов военной техники. С целью определения этой зависимости в экспериментах варьировали схему устройств, массу и тип ВВ, что обеспечивает различную скорость деформации. Отличительные особенности в постановках экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Отличительные особенности экспериментов

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6	7
Материал образца	Спец материал	Сталь 3	Сталь 3	Спец материал	Сталь 3	Спец материал	Спец материал
Наружный диаметр; толщина стенки, мм	44;1	44;1	42;1	44;1	44;1	44;1	44;1
Толщина слоя состава пластического ВВ	2	2	2	3	Шашка диаметром 42 мм	Шашка диаметром 42 мм	3
Длина цилиндра, мм	111	111	150	111	150	150	111

Для равномерного инициирования состава пластического ВВ и нагружения цилиндра-образца скользящей вдоль его образующей детонационной волной применяли распределитель 3 из пенопласта плотностью $0,35 \text{ г/см}^3$, снаряженный также составом пластического ВВ, который инициировали электродетонатором, установленным в розетку 5. Для уменьшения воздействия продуктов взрыва пластического ВВ на внутреннюю поверхность цилиндра в распределителе применяли диск из пенопласта 6 плотностью $0,35 \text{ г/см}^3$ 6, приклеенный к ВВ. Макет монтировали на подставке 7. На подставку также устанавливали крепежные планки (на схеме не показаны) для размещения датчиков и электрических разъемов.

На рисунке 18 приняты обозначения:

- 1 – Исследуемый цилиндр;
- 2 – Пластическое ВВ;
- 3 – Распределитель;
- 4 – Электродетонатор;
- 5 – Розетка под детонатор;
- 6 – ВВ на основе октогена.

В опыте для регистрации параметров разлета цилиндра использовались фотохронографы УСФ-2, работающие в режиме щелевой развертки. Фотосъемку разлета цилиндра проводили на фоне света тыловой и фронтальной аргоновых подсветок через зеркало (для исключения попадания осколков в регистрирующую аппаратуру). Схема размещения экспериментального макета, зеркала, узлов подсветки, регистрирующей аппаратуры, каземата приведена на рисунке 19.

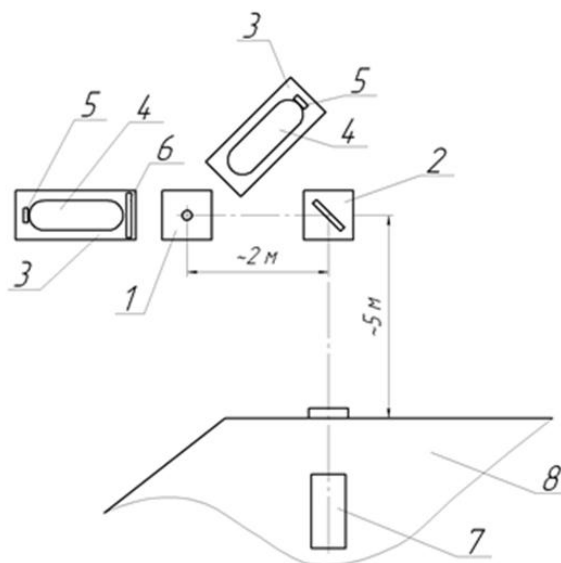


Рисунок 19 – Схема размещения макета и других объектов на поле каземата

На рисунке 19 приняты обозначения:

- 1 – Подставка с исследуемым образцом;
- 2 – Подставка с зеркалом;
- 3 – Подставка под подсветку;
- 4 – Пакет с аргоном;

- 5 – Шашка из ВВ (с установленным детонатором);
- 6 – Рамка с калькой (только у тыловой подсветки);
- 7 – Фоторегистратор СФР;
- 8 – Каземат.

В результате проведения экспериментов были получены и обработаны фотохронограммы, которые приведены на рисунках 20 – 25.



Рисунок 20 – Изображение щелевой фотохронограммы эксперимента № 1.

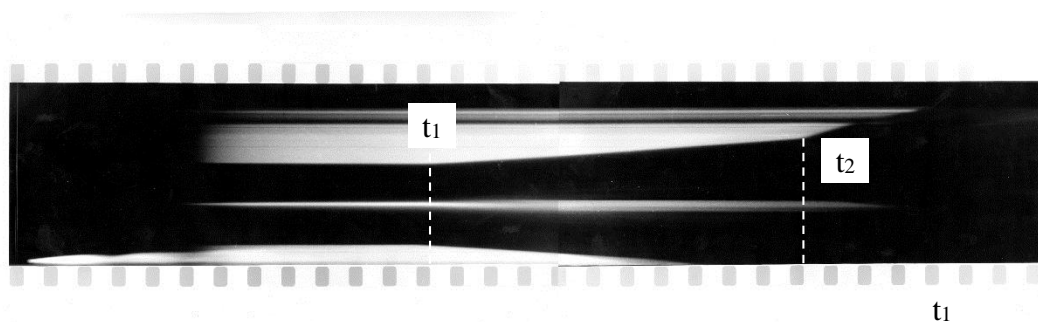


Рисунок 21 – Изображение щелевой фотохронограммы эксперимента № 2

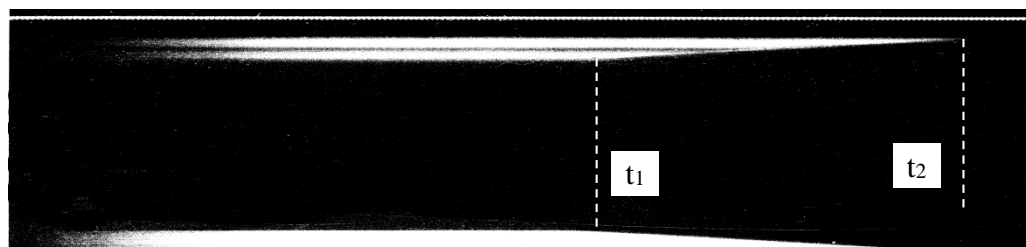


Рисунок 22 – Изображение щелевой фотохронограммы эксперимента № 3

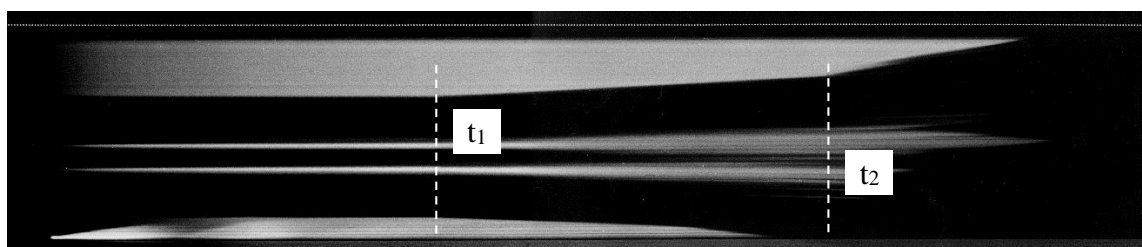


Рисунок 23 – Изображение щелевой фотохронограммы эксперимента № 4

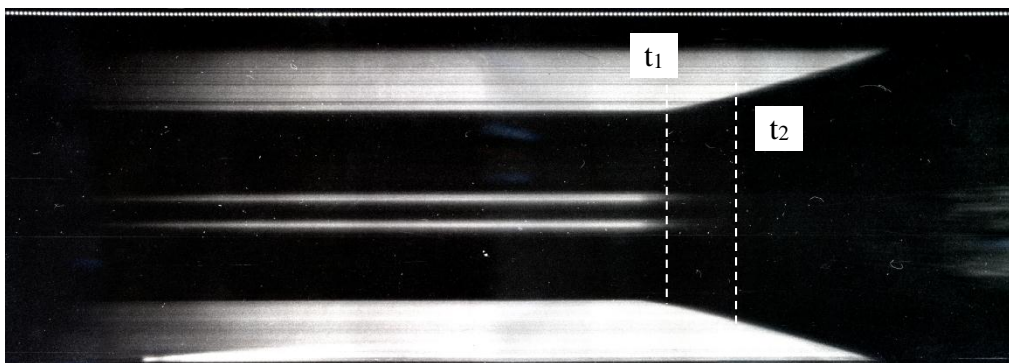


Рисунок 24 – Изображение щелевой фотохронограммы эксперимента № 5

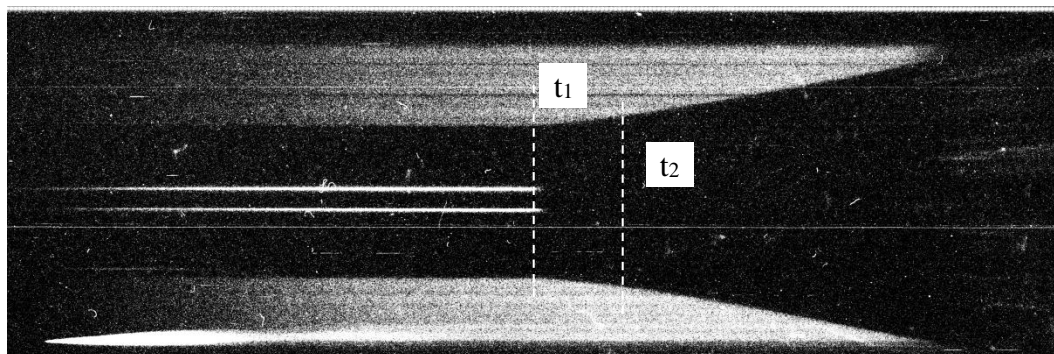


Рисунок 25 – Изображение щелевой фотохронограммы эксперимента № 6

3.1.1 Обработка результатов экспериментов № 1-6

В результате проведения экспериментов по динамическому деформированию цилиндрических образцов из спец. материала с помощью фотохронографов УСФ-2, работающих в режиме щелевой развертки были получены изображения щелевой фотохронограммы. Обработка снимков осуществлялась с помощью программы GetData Graph Digitizer в следующем порядке:

- экспертным методом определялись границы цилиндра по координатам на изображении, получен массив данных координат (система координат $x-y$),

- по полученным границам были построены графики и разбиты на участки, построены линии тренда, определены коэффициенты линейной регрессии и их стандартные отклонения,

- на основе полученных коэффициентов определены точки пересечения прямых, первая точка пересечения является началом движения наружной

границы оболочки, вторая (регистрируется не всегда) – моментом образования первых трещин, третья – моментом прорыва газообразных продуктов взрыва (моментом магистрального разрушения образца),

– по точкам, соответствующим началу движения, и зажиганию искрового разрядника (в системе координат x-y) осуществлен переход в систему координат r-t.

Таким образом, из данных линейной регрессии можно судить о скорости движения оболочки и о предельном значении радиуса оболочки на момент прорыва продуктов взрыва.

С целью исключения влияния произвола в выборе начала координат на оценку погрешностей коэффициентов линейной регрессии будем искать аппроксимирующие прямые по формуле:

$$r(t) = (k \pm S_k) \cdot (t - t_0) + (b \pm S_b), \quad (6)$$

где $t_0 = \bar{t}$ – смещение начала координат в середину области определения массива данных (здесь и далее чертой сверху физической величины обозначено ее среднее арифметическое).

Коэффициенты линейной аппроксимации методом наименьших квадратов определяются по формулам:

$$b = \bar{r}, \quad (7)$$

$$k = \frac{\overline{t \cdot r} - \bar{t} \cdot \bar{r}}{\overline{t^2} - \bar{t}^2}. \quad (8)$$

Для оценки стандартных отклонений при определении коэффициентов линейной аппроксимации методом наименьших квадратов пользуются формулами:

$$S_b = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot (r - k \cdot (t - \bar{t}) - b)^2}, \quad (9)$$

$$S_k = \frac{S_b}{\sqrt{\overline{t^2} - \bar{t}^2}}. \quad (10)$$

Относительная деформация вычисляется в логарифмической форме по формуле 11:

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (11)$$

Скорость деформации определяется по формуле 12:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{r}. \quad (12)$$

На рисунке 26 проиллюстрирована полученная в результате обработки фотохронограммы r-t диаграмма для эксперимента №1.

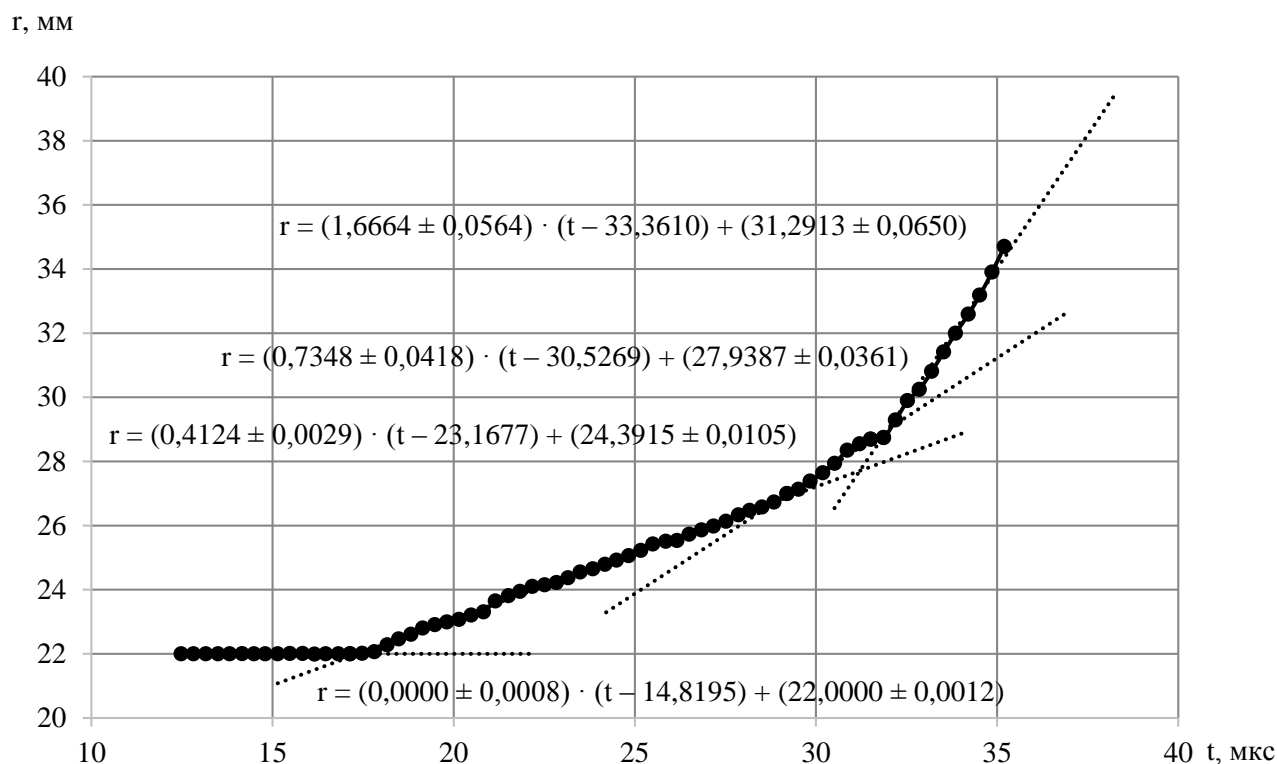


Рисунок 26 – r-t диаграмма для эксперимента №1

Получены следующие выражения для линейной аппроксимации:

$$r = \begin{cases} (0,0000 \pm 0,0008) \cdot (t - 14,8195) + (22,0000 \pm 0,0012) \\ (0,4124 \pm 0,0029) \cdot (t - 23,1677) + (24,3915 \pm 0,0105) \\ (0,7348 \pm 0,0418) \cdot (t - 30,5269) + (27,9387 \pm 0,0361) \\ (1,6664 \pm 0,0564) \cdot (t - 33,3610) + (31,2913 \pm 0,0650) \end{cases},$$

описывающие движение внешней поверхности цилиндрического образца для статического участка, участка пластического течения, процесса образования трещин и расширения прорвавшихся ПВ соответственно.

На их основе вычислены координаты точек пересечения:

$t_1 = (17,3683 \pm 0,0491)$ мкс – момент начала пластического течения,

$r_1 = (22,0000 \pm 0,0024)$ мм – значение начального радиуса образца;

$t_2 = (28,9372 \pm 1,4332)$ мкс – момент начала образования трещин,

$r_2 = (26,7706 \pm 0,1070)$ мм – значение радиуса образца на момент начала образования трещин;

$t_3 = (31,9976 \pm 0,2411)$ мкс – момент прорыва газообразных ПВ,

$r_3 = (29,0194 \pm 0,1503)$ мм – значение радиуса образца на момент прорыва газообразных ПВ.

Скорость поверхности цилиндра определена из коэффициентов линейной регрессии:

$V = (0,7348 \pm 0,0418)$ км/с.

Динамический предел относительной деформации будет равен:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{r_3}{r_1} \right) \cdot 100\% = \ln \left(\frac{29,0194 \pm 0,1503}{22,0000 \pm 0,0024} \right) \cdot 100\% = (27,69 \pm 0,08)\%,$$

$$S_{\text{отн}} = 0,28\%.$$

Скорость деформации:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V}{r} = (2,53 \pm 0,41) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

Необходимо отметить, что на значение динамического предела относительной деформации не влияют систематические погрешности определения масштабов расстояния и времени по фотохронограмме, время срабатывания искрового разрядника (положение начала отсчета времени). Данные систематические погрешности должны учитываться при вычислении скорости свободной поверхности, а также скорости относительной деформации.

Аналогичным образом были обработаны результаты экспериментов № 2 – № 6. Полученные значения динамического предела деформации, а также скорости деформации для каждого эксперимента представлены в таблице 2.

3.2 Регистрация процесса развития трещин в цилиндрической оболочке методом импульсной рентгенографии

Применение метода импульсной рентгенографии позволяет зарегистрировать состояние исследуемого образца на определенный момент времени. С помощью метода импульсной рентгенографии проведен 1 эксперимент с образцом из спец. материала. Принцип постановки эксперимента приведен ниже.

Схема экспериментального макета приведена на рисунке 34. На внутреннюю стенку цилиндра-образца из спец. материала 1 закрепляли слой состава пластического ВВ 2 толщиной 3 мм. Для изготовления цилиндрического слоя из пластического ВВ использовали пластину, свернутую в трубку длиной 110 мм. Для равномерного инициирования состава пластического ВВ и нагружения цилиндра-образца скользящей вдоль его образующей детонационной волной применяли распределитель 3 из пенопласта плотностью $0,35 \text{ г/см}^3$, снаряженный также составом пластического ВВ, который инициировали электродетонатором, установленным в розетку 5. Для уменьшения воздействия продуктов взрыва пластического ВВ на внутреннюю поверхность цилиндра в распределителе применяли диск из пенопласта плотностью $0,35 \text{ г/см}^3$ 6, приклеенный к ВВ. Макет монтировали на подставке 7. На подставку также устанавливали крепежные планки (на схеме не показаны) для размещения датчиков и электрических разъемов.

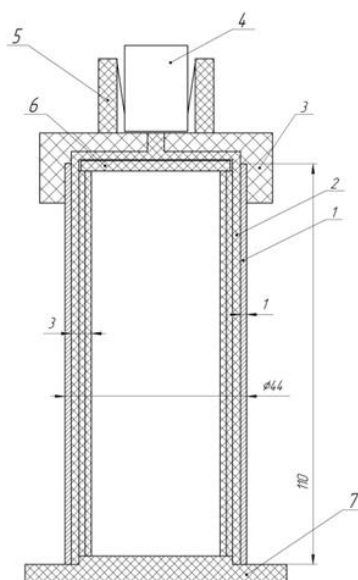


Рисунок 27 – Схема экспериментального макета для эксперимента № 7

На рисунке 27 приняты обозначения:

- 1 – исследуемый цилиндр;
- 2 – пластическое ВВ;
- 3 – распределитель;
- 4 – детонатор;
- 5 – розетка под детонатор;
- 6 – диск из пенопласта;
- 7 – крепежная подставка.

В качестве источника импульсного рентгеновского излучения использовался безжелезный бетатрон типа БИМ.234. Регистрация процесса разлета образца осуществлялась при помощи кассеты с медицинским экраном Agfa Digital Center (ADC). Схема размещения экспериментального макета, регистрирующей аппаратуры, каземата приведена на рисунке 28.

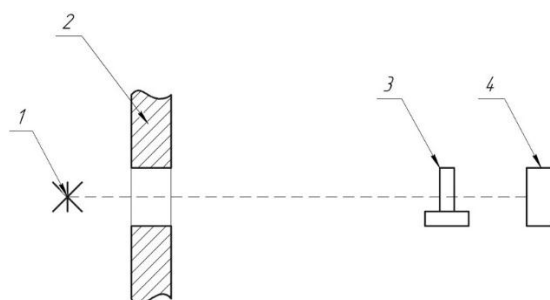


Рисунок 28 – Схема размещения макета и других объектов на поле каземата

На рисунке 28 приняты обозначения:

1 – источник импульсного рентгеновского излучения БИМ.234;

2 – броня каземата;

3 – объект исследования;

4 – система регистрации рентгеновского изображения.

В результате проведения эксперимента были получены и обработаны изображения объекта исследования, которые приведены на рисунках 29 – 30.

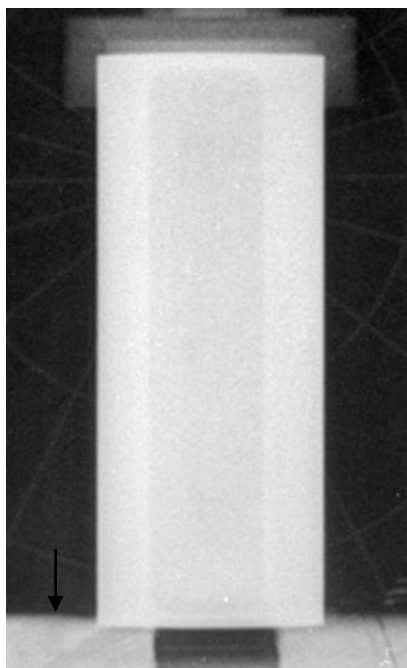


Рисунок 29 – Предварительный снимок исследуемого образца

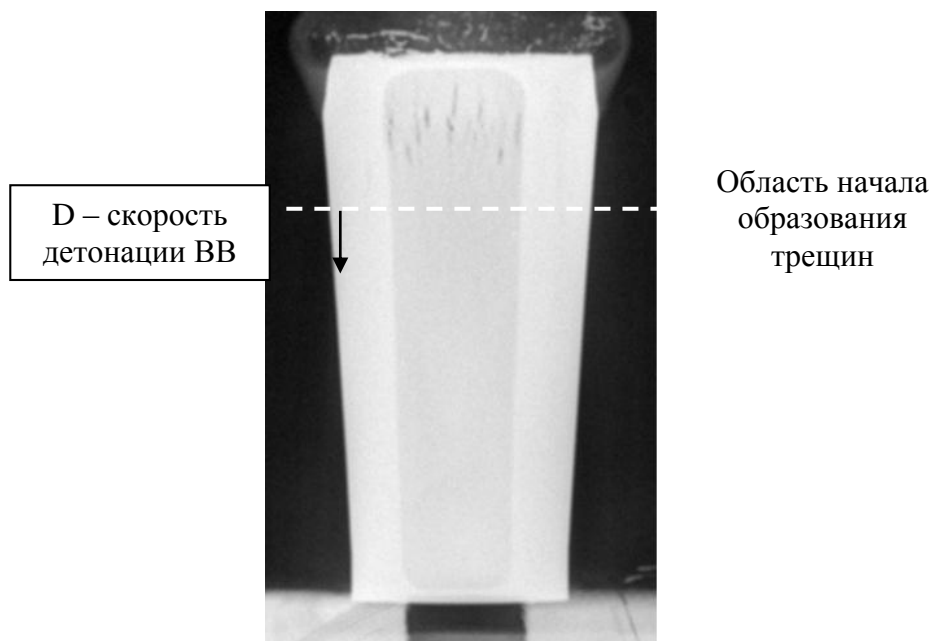


Рисунок 30 – Снимок исследуемого образца в момент взрыва

3.2.1 Обработка результатов эксперимента № 7

В результате проведения эксперимента по динамическому деформированию цилиндрического образца из спец. материала были получены изображения исследуемого образца, т.е. были получены предварительный снимок и снимок во время взрыва. Обработка снимков осуществлялась с помощью программы GetData Graph Digitizer в следующем порядке:

– экспертным методом определялись границы цилиндра по координатам на изображениях, получен массив данных координат (система координат x-y), с помощью введения масштабного коэффициента, равного 0,053557 совершен переход от системы исчисления координат в сантиметрах изображения к действительным мм, определен диаметр цилиндра, значение которого составило $(44 \pm 0,0072)$ мм;

– по полученным границам были построены графики, линии тренда, определены коэффициенты линейной регрессии и их стандартные отклонения. На основании автомодельности участка пластического течения при разлете цилиндрического образца, можно выразить тангенс угла при образующей конического участка свободной поверхности через отношение скорости разлета свободной поверхности и распространения детонационной волны по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V}{D}, \quad (13)$$

где α – угол при образующей конического участка свободной поверхности, $^{\circ}$;

V – скорость разлета свободной поверхности, км/с;

$D = 7,8$ км/с для пластического ВВ – скорость распространения детонационной волны.

На основании формулы 13 определены скорости поверхности цилиндра:

$$V_1 = \frac{D}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{D}{m_1} = \frac{7,8}{15,756} = 0,495 \text{ км/с,}$$

$$V_2 = \frac{D}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{D}{m_2} = \frac{7,8}{14,798} = 0,527 \text{ км/с,}$$

где m_1 и m_2 – угловые коэффициенты линейной регрессии для левой и правой стенок цилиндра соответственно,

– экспертным методом определялись координаты точки начала образования трещин, т.е. было определено значение диаметра образца на момент образования трещин, оно составило $(54,1806 \pm 0,0445)$ мм;

– динамический предел относительной деформации будет равен:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot 100\% = \ln\left(\frac{54,1806 \pm 0,0445}{44 \pm 0,0072}\right) \cdot 100\% = (20,81 \pm 0,08)\%,$$

$$S_{\text{отн}} = 0,4\%.$$

– скорость деформации определена из соотношения:

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{V_1}{r} = (1,83 \pm 0,05) \cdot 10^4 \text{ c}^{-1},$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{V_2}{r} = (1,95 \pm 0,05) \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}.$$

4 Аналитическая часть

В результате проведения экспериментов для образцов из стали 3 и спец. материала были получены значения динамического предела относительной деформации, а также значения скорости деформации. Результаты проведенных экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Данные по результатам экспериментов.

№ Эксперимента	Материал образца	Толщина слоя ВВ, мм	Динамический предел относительной деформации, %	Скорость деформации, $\cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$
1	Спец. материал	2	27,69±0,08	2,53±0,41
4		3	28,42±0,21	2,39±0,08
5		шашка диаметром 42 мм	14,0±2,3	5,32±0,22
			12,7±0,8	5,08±0,24
7		3	20,81±0,08	1,83±0,05
	1,95±0,05			
2	Сталь 3	2	49,45±0,62	2,12±0,01
3		2	21,53±0,11	2,86±0,08
6		шашка диаметром 42 мм	16,8±1,8	8,6±0,4

Определена зависимость динамического предела деформации от скорости деформации для образцов из стали 3. Представленные данные по зависимости динамического предела деформации от скорости деформации для стали 3 приведены на рисунке 31 вместе с экспериментами Иванова А.Г. 1974 года [21-23]. Из рисунка следует согласие этих данных, следовательно, можно говорить о корректности методики проведения экспериментов.

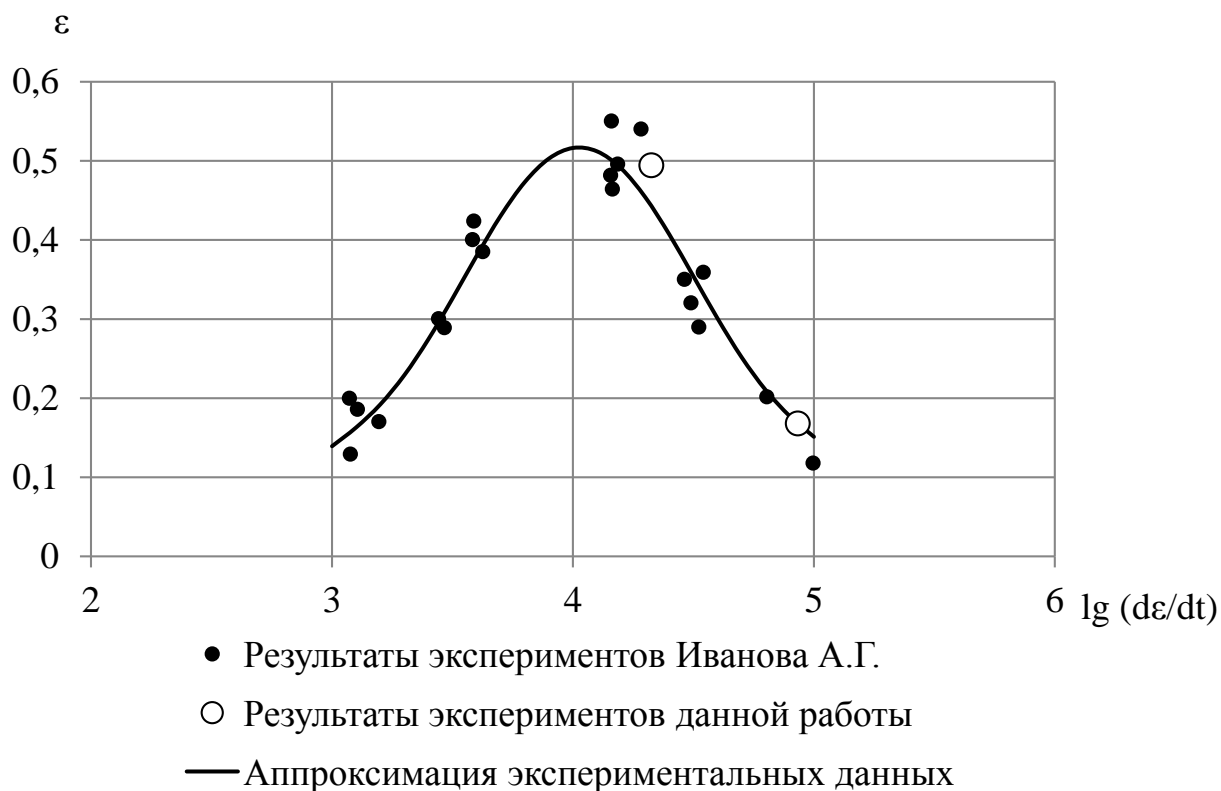


Рисунок 31 – Зависимость динамического предела деформации от скорости деформации для образцов из стали 3.

На основании полученных данных определена зависимость динамического предела деформации от скорости деформации для образцов из спец. материала, которая представлена на рисунке 32.

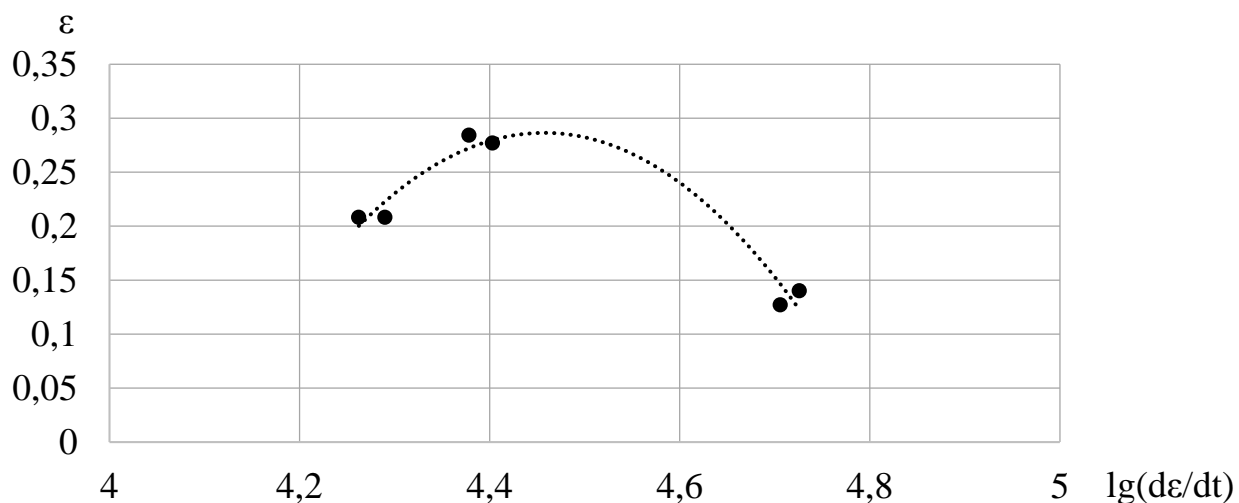


Рисунок 32 – Зависимость динамического предела деформации от скорости деформации для образцов из спец. материала

Исследуя графики зависимости динамического предела деформации от скорости деформации для образцов из спец. материала, а также из стали 3 можно говорить о том, что с увеличением скорости деформации в начальный период наблюдается увеличение значения динамического предела деформации, далее происходит его снижение. При сопоставлении графиков для образцов из спец. материала и для стали 3 выявлено соответствие характера данных зависимостей, также можно отметить, что положение максимума для значения предела деформации для спец. материала смещено в область более высоких скоростей деформации, в сравнении с его положением для стали 3.

Из использованных методов наиболее предпочтителен метод скоростной фоторегистрации. Метод импульсной рентгенографии подразумевает определение прорыва по визуально наблюдаемым трещинам, при этом скорость деформации определяется косвенно на основании автосъемки постановки эксперимента и табличного значения скорости детонации. Метод скоростной фоторегистрации напротив обеспечивает прямую привязку по времени регистрируемой щелевой развертки и более обоснованное определение скорости деформации, а также выделение момента прорыва по визуально наблюдаемым продуктам взрыва, прорывающимся через трещины в оболочке. Таким образом, метод скоростной фоторегистрации является наиболее точным.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Основной задачей данного раздела является оценка перспективности разработки и планирование финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, предлагаемого в рамках НИ. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на такие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, какой бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Объектом исследования в данной работе является спец. материал. В процессе выполнения выпускной квалификационной работы исследовались характеристики данного материала, а именно зависимость динамического предела пластической деформации от скорости пластической деформации путем обработки результатов экспериментов, в которых использовали методы скоростной фоторегистрации и импульсной рентгенографии, для регистрации процесса развития трещин в цилиндрической оболочке, нагружаемой изнутри взрывом взрывчатого вещества.

5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

5.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

В процессе работы рассматривались два варианта реализации данного исследования:

Вариант 1 – Получение данных с помощью метода скоростной фоторегистрации;

Вариант 2 – Получение данных с помощью метода импульсной рентгенографии.

Детальный анализ конструктивного исполнения необходим, т.к. каждый тип конструктивного исполнения имеет свои достоинства и недостатки. Данный анализ производится с применением оценочной карты, приведенной в таблице 3. Экспертная оценка производится по техническим характеристикам и экономическим показателям по 5 бальной шкале, где 1 – наиболее низкая оценка, а 5 – наиболее сильная. Общий вес всех показателей в сумме должен составлять 1.

Таблица 3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
1	2	3	4	5	6

Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
Удобство в эксплуатации	0,07	5	3	0,35	0,21
Простота конструкции и ремонтпригодность	0,2	4	3	0,8	0,6
Компактность	0,14	5	2	0,7	0,28
Безопасность	0,15	4	3	0,6	0,45
Экономические критерии оценки эффективности					
Цена	0,22	5	3	1,1	0,66
Предполагаемый срок эксплуатации	0,14	5	3	0,7	0,42
Затраты на ремонт	0,08	5	3	0,4	0,24
Итого	1	33	20	4,65	2,86

Расчет конкурентоспособности, на примере удобства эксплуатации, определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,07 \cdot 5 = 0,35,$$

где K – конкурентоспособность проекта; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл показателя.

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что вариант № 1 является наиболее предпочтительным и является наиболее выгодным и эффективным методом получения данных.

5.1.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 4 – SWOT-анализ.

	<p>Strengths (сильные стороны)</p> <p>S1. Техническая простота осуществления метода; S2. Одновременная регистрация предела динамической пластичности и скорости деформации; S3. Дешевизна проведения опытов; S4. Радиационная безопасность; S5. Относительно низкая трудоемкость методики.</p>	<p>Weaknesses (слабые стороны)</p> <p>W1. Предел динамической деформации определяется косвенно; W2. Требуется трудоемкий анализ результатов эксперимента; W3. Относительно устаревшая методика регистрации; W4. Оптический узел установки подвергается наиболее интенсивному износу в сравнении с другими комплектующими; W5. Необходимо выдерживать требования взрывобезопасности.</p>
<p>Opportunities (возможности)</p> <p>O1. Повышение стоимости конкурентных разработок; O2. Появление дополнительного спроса; O3. Снижение цен на комплектующие установки;</p>	<p>O1O2S1S2S3S5 – Ввиду технической простоты осуществления метода, возможности одновременно регистрировать величины как предела деформации, так и скорости деформации, низкой трудоемкости проведения экспериментов, а также низкой цены оборудования может появиться дополнительный спрос, а также повыситься стоимость конкурентных разработок; O3S1S4 – Техническая простота осуществления метода, а также низкая трудоемкость могут привести к снижению цен на комплектующие установки.</p>	<p>O1O3W3 – Ввиду относительной устарелости методики, стоимость конкурентных разработок увеличивается, а цены на комплектующие установки снижаются.</p>

<p>Threats (угрозы) Т1. Высокая динамика в развитии конкурентных разработок; Т2. Ограниченное финансирование со стороны государства; Т3. Отсутствие заинтересованных инвесторов проекта; Т4. Изменение нормативно-правовых требований в сфере безопасности; Т5. Изменение нормативно-правовых требований в сфере оплаты труда.</p>	<p>Т4Т5S1 – В случае изменения нормативно-правовых требований в сферах безопасности и оплаты труда возникнет необходимость в изменении осуществлении метода.</p>	<p>Т1W1W2W3W4W5 – Высокая динамика в развитии конкурентных разработок может привести к созданию методики, которая сможет функционально полностью заменить данную методику; Т3W1W3 – ввиду относительной устарелости методики, а также косвенного определения предела деформации возможно снижение количества заинтересованных инвесторов проекта; Т4W3W5 – при выполнении проекта необходимо выполнение требований взрывобезопасности, следовательно, изменение нормативно-правовых требований в сфере безопасности могут значительно повлиять на реализацию проекта.</p>
--	--	---

Таблица 5 – Связь сильных сторон с возможностями.

		Сильные стороны проекта				
		S1	S2	S3	S4	S5
Возможности проекта	O1	+	+	+	-	+
	O2	+	+	+	0	+
	O3	+	-	0	+	0

Таблица 6 – Связь слабых сторон с возможностями.

Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		W1	W2	W3	W4	W5
	O1	-	-	+	-	-
	O2	-	-	-	-	-
	O3	-	-	+	-	-

Таблица 7 – Связь сильных сторон с угрозами.

	S1	S2	S3	S4	S5
T1	0	-	-	-	-
T2	-	-	-	-	-
T3	-	-	-	-	-
T4	+	0	-	-	-
T5	+	0	-	-	-

Таблица 8 – Связь слабых сторон с угрозами.

	W1	W2	W3	W4	W5
T1	+	+	+	+	+
T2	-	-	-	-	-
T3	+	-	+	-	-
T4	-	-	+	-	+
T5	-	-	-	-	-

5.2 Планирование научно-исследовательских работ

5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Комплекс предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках исследования;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ;
- построить график проведения отдельных этапов исследования.

Для выполнения данного исследования (проекта) необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят начальник отдела (руководитель) и инженер-исследователь (дипломник). Для каждой из запланированных работ, необходимо выбрать исполнителя этой работы.

Разработанный список задач и производимых работ, в рамках проектирования, а также распределение исполнителей по этим работам, представлен в виде таблицы 9.

Таблица 9 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Обработка результатов измерений	5	Обработка полученных результатов эксперимента	Инженер
	6	Анализ полученных в результате обработки данных	
	7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
			Инженер
Составление отчетной документации	9	Составление пояснительной записки	Инженер
Контроль и координирование проекта	10	Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	Руководитель

5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта.

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ожі}$ определяется по формуле:

$$t_{ожі} = \frac{(3 \cdot t_{\min i} + 2 \cdot t_{\max i})}{5},$$

где $t_{\min i}$ – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой: при удачном стечении обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой: при неудачном стечении обстоятельств, чел.-дн.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

Где $Ч_i$ – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 10.

5.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для построения графика Ганта, следует, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}$$

где $k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

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

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

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

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

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Составление и утверждение технического задания»:

$$t_{ожжi} = \frac{3 \cdot t_{mini} + 2 \cdot t_{maxi}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ чел.} - \text{дн.}$$

$$T_{pi} = \frac{t_{ожжi}}{C_i} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \text{ раб.дн.}$$

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{366}{366 - 103 - 15} = 1,48.$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал} = 2,8 \cdot 1,48 = 4,14 \approx 4 \text{ кал. дн.}$$

Все полученные значения в календарных днях округляются до целого числа, а затем сводятся в таблицу 10.

Таблица 10 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Выбор направления исследований	2	-	5	-	3,2	-	3,2	-	5	-
Календарное планирование работ по теме	3	-	7	-	4,6	-	4,6	-	7	-
Составление и утверждение технического задания	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4	-
Подбор и изучение материалов по теме	-	5	-	8	-	6,2	-	6,2	-	9
Обработка полученных результатов эксперимента	-	3	-	5	-	3,8	-	3,8	-	6
Анализ полученных в результате обработки данных	-	15	-	20	-	17	-	17	-	25
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	-	1	-	2	-	1	-	1	-	1
Оценка эффективности полученных результатов	3	2	5	3	3,8	2,4	1,9	1,2	3	2
Составление пояснительной записки	-	15	-	25	-	19	-	19	-	28
Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	10	-	15	-	12	-	12	-	18	-

После расчета и сведения в таблицу временных показателей проектирования, на основе полученной таблицы строится диаграмма Ганта (Таблица 11).

Таблица 11 – Диаграмма Ганта.

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{кi} , кал.дн	Продолжительность выполнения работ													
				Февр.			Март			Апр.			Май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Выбор направления исследований	Руководитель	5	■													
2	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	7	■	■												
3	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4		■												
4	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	9			■											
5	Обработка полученных результатов эксперимента	Инженер	6				■										
6	Анализ полученных в результате обработки данных	Инженер	25				■	■	■								
7	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Инженер	1														
8	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	3														
		Инженер	2														
9	Составление пояснительной записки	Инженер	28														
10	Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	Руководитель	18														

Таблица 12 – Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	101
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	71
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	37

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

5.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям:

- материальные затраты;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

5.2.4.1 Материальные затраты

Таблица 13 – Материальные затраты

Наименование	Цена за ед., руб.	Количество, ед.	Суммарная стоимость, руб.
Комплект канцелярских принадлежностей ErichKrause Office	645	4	2580
Картридж для лазерного принтера HP 18A	5 299	1	5 299
Всего за материалы, руб.			7879
Транспортно-заготовительные расходы, руб.			1969
Итого по статье, руб.			9848

5.2.4.2 Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

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

Так как работы проводились с помощью оборудования, имеющегося в данной научно-технической организации, выполнен расчет амортизационных отчислений.

Расчет амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

Таблица 14 – Затраты на оборудование.

№	Наименование оборудования	Количество, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
1	Персональный компьютер	1	5	42,275	42,275
Итого:	42 275 руб.				

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации определяется по следующей формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где n – срок полезного использования в годах.

Амортизация определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m,$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.;

m – время использования, мес.

Рассчитаем норму амортизации для персонального компьютера, с учётом того, что срок полезного использования составляет 5 лет:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{5} = 0,2.$$

Общую сумму амортизационных отчислений находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot m = \frac{0,2 \cdot 42275}{12} \cdot 4 = 2819 \text{ руб.}$$

5.2.4.3 Основная заработная плата

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{он} \cdot T_p,$$

где $Z_{он}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для пятидневной рабочей недели:

$$Z_{он} = \frac{Z_m \cdot M}{F_0},$$

где Z_m – должностной оклад работника за месяц;

F_0 – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн. (Таблица 9);

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года (при отпуске в 28 рабочих дня – месяца, пятидневная рабочая неделя).

Должностной оклад работника за месяц:

$$Z_M = Z_{окл} \cdot (1 + k_d),$$

где $Z_{окл}$ – окладная часть, которая состоит из заработной платы в соответствии с тарифной сеткой $Z_{тс}$ и фиксированной премиальной части $Z_{пр}$, которая определяется начальником и, как правило, с течением времени не изменяется, руб;

k_d – коэффициент доплат и надбавок (в данной организации формируется из $k_3 = 0,2$ от окладной части – зональная надбавка и $k_c = 0,3$ от окладной части – доплата за секретность).

Таблица 15 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	103/15	103/15
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	24/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	214	214

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{окл}, руб$	k_d	$Z_M, руб$	$Z_{дн}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$Z_{осн}, руб$
Руководитель	61500	0,5	92250	4828	25	120700
Инженер	27500	0,5	41250	2159	48	103632
Итого:	224332					

5.2.4.4 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн},$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (принимаем равным 15%).

Размер дополнительной заработной платы для руководителя составит:

$$З_{доп.рук} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 120700 = 18105 \text{ руб.}$$

Размер дополнительной заработной платы для инженера составит:

$$З_{доп.инж} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 103632 = 15545 \text{ руб.}$$

5.2.4.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}),$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

Размер отчислений во внебюджетные фонды для руководителя составит:

$$З_{внеб.рук} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (120700 + 18105) = 41642 \text{ руб.}$$

Размер отчислений во внебюджетные фонды для инженера составит:

$$З_{внеб.инж} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (103632 + 15545) = 35754 \text{ руб.}$$

5.2.4.6 Накладные расходы

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

Накладные расходы в целом:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр} = (9848 + 2819 + 224332 + 33650 + 77396) \cdot 0,2 = 69609 \text{ руб.}$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ (название темы) по форме, приведенной в таблице 17.

Таблица 17 – Группировка затрат по статьям.

Статьи							
Материальные затраты, руб.	Амортизация, руб.	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
9848	2819	224332	33650	77396	348045	69609	417654

5.3 Определение ресурсоэффективности исследования

5.3.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. В рамках данного проекта будет рассмотрено 2 варианта исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения был выбран ближайший аналог:

Метод импульсной рентгенографии. Метод импульсной рентгенографии позволяет визуально зарегистрировать состояние исследуемого образца на определенный момент времени. Рентгенографическая установка представляет собой сложный комплекс. Существующие в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ

рентгенографические установки позволяют зарегистрировать до 9-ти кадров в одном опыте, т.е. получить до 9-ти изображений одного и того же образца на 9 разных моментов времени.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{ri} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Интегральный финансовый показатель для метода скоростной фоторегистрации составит:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{417654}{440892} = 0,95;$$

Интегральный финансовый показатель для метода импульсной рентгенографии составит:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{440892}{440892} = 1.$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

5.3.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

В данном разделе необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где: I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности; a_i – весовой коэффициент проекта; b_i – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 18.

Таблица 18 – Сравнительная оценка характеристик проекта.

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка метода скоростной фоторегистрации	Бальная оценка метода импульсной рентгенографии
1. Безопасность при использовании установки	0,3	4	3
2. Компактность	0,1	5	2
3. Технические характеристики	0,3	4	5
4. Ремонтопригодность	0,15	4	4
5. Простота эксплуатации	0,15	5	3
Итого:	1	4,25	3,65

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,3 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,3 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 = 4,25,$$

$$I_{p2} = 0,3 \cdot 3 + 0,1 \cdot 2 + 0,3 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 = 3,65.$$

5.3.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп.1}}{I_{финр}} = \frac{4,25}{0,95} = 4,47;$$

$$I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп.2}}{I_{финр}} = \frac{3,65}{1} = 3,65.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cp}):

$$\mathcal{E}_{cp.1} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.1}} = \frac{4,47}{4,47} = 1;$$

$$\mathcal{E}_{cp.} = \frac{I_{исп.2}}{I_{исп.1}} = \frac{3,65}{4,47} = 0,82.$$

Таблица 19 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности.

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,95	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,25	3,65
3	Интегральный показатель эффективности	4,47	3,65
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,82

5.4 Выводы по разделу

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации эксперимента, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;

2. При проведении планирования был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей. Были определены: общее количество календарных дней для выполнения работы – 101 день, общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер – 71 и общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель - 37;

3. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 417654 руб;

4. По факту оценки эффективности ИР, можно сделать выводы:

- Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,95, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;

- Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,25, по сравнению с 3,65;

- Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,47, по сравнению с 3,65, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

6 Социальная ответственность

Объектом исследования в данной работе является спец. материал. Область его применения – конструирование образцов вооружения, военной и специальной техники.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Трудовым кодексом РФ прописаны и утверждены права работника на:

- рабочее место, которое соответствует нормам охраны труда;
- обязательное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения угрозы опасности здоровью работника вследствие нарушения правил охраны труда;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты согласно правилам охраны труда, за счет работодателя;
- обучение безопасным методам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;
- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным

актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда;

– получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и(или) опасных производственных факторов.

Трудовым кодексом РФ рекомендуется устанавливать продолжительность рабочего времени не более 40 часов в неделю, работодатель обязывается вести учет рабочего времени каждого работника [24].

6.1.1. Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства:

- «Санитарные нормы микроклимата» СНиП 4088-86;
- «Инструкция по охране труда при работе на персональных электронных вычислительных машинах» №55;
- «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, электронно-вычислительным машинам и организации работ» СанПиН 222/2.4.1.340-03;
- Санитарные нормы допустимых уровней шума на рабочих местах» СанПиН 3223-03;
- Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ» СНиП 2.2.2.542-03;
- СНиП 21-01-97 от 1998-01-01 Пожарная безопасность зданий и сооружений;

– ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1976.

6.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Для обеспечения нормальных условий труда санитарные нормы устанавливают объем производственного помещения на одного работающего не менее 20 м³. Высота вспомогательных помещений должна быть 3,3 м, а площадь на одного работающего не менее 6 м². Выпускная квалификационная работа выполнялась в помещении площадью 45 м², без перегородок, высотой 3,6 м, в котором работает 6 человек. Таким образом нормы к размерам помещения были соблюдены.

Важную роль играет планировка рабочего места, которая должна удовлетворять требованиям удобства обслуживания устройств электронно-вычислительной машины, соблюдения правил охраны труда. Рост профессиональных заболеваний почти всегда зависит от неправильной организации труда, в частности, от неправильного выбора основных параметров рабочего места. Каждое рабочее место должно оборудовано в соответствии антропометрическими особенностями работающего, что должно обеспечить рост производительности труда и снижение процента профессиональных заболеваний. Движения работников должны быть такими, чтобы группы мышц его были нагружены равномерно, а лишние непроизводительные движения устранены.

Одними из самых важных требований, предъявляемых к рабочему месту программиста являются эргономические и антропометрические требования к рабочей мебели. В помещениях используются столешницы длиной 1600 мм и шириной 900 мм, а размеры под столешницей соответствуют требованиям «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, электронно-вычислительным машинам и организации работ» Санитарные нормы и правила,

СанПиН 222/2.4.1.340-03. Рабочие стулья должны быть снабжены подъемно-поворотным устройством, обеспечивающим регулировку высоты сиденья и спинки, а также устройством, регулирующим изменение угла наклона спинки. Основные требования к рабочему месту оператора персональной электронно-вычислительной машины приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Требования к рабочему месту оператора персональной электронно-вычислительной машины

Параметр	Значение
Высота поверхности стола над полом, мм	705
Высота пространства для ног, мм	600
Ширина пространства для ног, мм	500
Размеры подставки для ног, мм·мм	400·300
Глубина пространства для ног, мм	650
Высота рабочего сиденья над полом, мм	450
Глубина сиденья, мм	380
Высота верхнего края спинки над сидением, мм	360
Высота нижнего края спинки над сидением, мм	170
Угол наклона сиденья, °	0 – 4

Рабочее место оператора персональной электронно-вычислительной машины представлено на рисунке и 1 и должно удовлетворять следующим условиям:

- свободная поза;
- достаточность пространства для ног и рук работающего;
- свобода движения в зоне рабочего места.

Для исключения монотонности работы и утомления предусмотрено применять оптимальный режим труда и отдыха в течение рабочего дня – обеденный перерыв – 48 минут и дополнительные перерывы для отдыха по 3 минуты каждые полчаса работы [25,26].

6.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. На инженера, при работе на ПЭВМ и установке, воздействуют следующие факторы: температура и влажность воздуха; шум; электромагнитное поле низкой частоты; освещенность; наличие излучения. А также психофизиологические факторы.

6.2.1 Микроклимат

С целью создания нормальных условий труда установлены нормы производственного микроклимата. Эти нормы устанавливают оптимальные и допустимые значения температуры, относительной влажности с учетом тяжести выполняемой работы и сезонов года. Перечисленные параметры оказывают значительное влияние на функциональную деятельность человека, на его самочувствие и здоровье, а также на надежность работы средств вычислительной техники. Под оптимальными микроклиматическими параметрами принято понимать параметры, обеспечивающие сохранение нормального функционального и теплового состояния организма без напряжения реакций терморегуляции, создающие ощущение теплового комфорта, являющиеся предпосылкой высокого уровня работоспособности при длительном и систематическом воздействии на человека. Для отвода избытка тепло, подачи свежего воздуха и поддержания нормативных параметров микроклимата должна быть предусмотрена автоматическая система вентиляции, отопления и кондиционирования воздуха, которая должна быть выполнена в соответствии с главой «Санитарные нормы микроклимата» № 4088-86. Данная система обеспечивает автоматическое поддержание параметров микроклимата в необходимых пределах в течение всех сезонов года, очистку воздуха от вредных веществ и пыли, создание небольшого избыточного давления в чистых

помещениях для исключения поступления неочищенного воздуха. Таким образом, действующие санитарные нормы для вычислительных центров устанавливают конкретные оптимальные и допустимые значения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха для рабочей зоны производственных помещений. Требования к микроклимату помещений в разные периоды времени года представлены в таблице 21 [27].

Таблица 21 – Основные микроклиматические параметры

Период года	Категория работ	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Легкая 1Б	21 – 23	40 – 60	не более 0,1
Теплый	Легкая 1Б	22 – 24	40 – 60	не более 0,2

6.2.2 Электромагнитное излучение

Основным вредным фактором для инженера-исследователя является электромагнитное излучение. В таблице 22 приведены временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей.

Таблица 22 – Временные допустимые уровни (ВДУ) электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электрического поля		20 кВ/м

Безопасные уровни излучений регламентируются нормами. Для того, чтобы снизить вредное влияние электромагнитного излучения при работе с ПК необходимо соблюдать следующие общие гигиенические требования [28]:

1) Продолжительность непрерывной работы взрослого пользователя не должна превышать 2 ч. Предусматриваются обязательные перерывы в работе на ПК, во время которых рекомендуется делать простейшие упражнения для глаз, рук и опорно-двигательного аппарата.

2) Рабочее место с ПК должно располагаться по отношению к оконным проемам так, чтобы свет падал сбоку, предпочтительнее слева. При наличии нескольких компьютеров расстояние между экраном одного монитора и задней стенкой другого должно быть не менее 2 м, а расстояние между боковыми стенками соседних мониторов – 1,2 м. Экран монитора должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 60÷70 см, но не ближе 50 см.

3) Для ослабления влияния рассеянного рентгеновского излучения от монитора ПК рекомендуется использовать защитные экраны из металлической сетки и металлических прутков в виде навесов и допустимая величина защитного сопротивления заземления экранирующих устройств не должна быть более 4 Ом [29].

6.2.3 Шум

С физиологической точки зрения шум – это всякий неблагоприятный воспринимаемый звук, поскольку ухудшает условия труда, оказывая вредное воздействие на организм человека.

Основными источниками шума при выполнении исследовательской работы в помещении являются принтер, компьютер, вентиляторы системы охлаждения, установка «MicroArc 3.0 System». Предельно допустимые уровни звука представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряженности в дБА.

Категория напряженности трудового процесса	Категория тяжести трудового процесса				
	легкая физическая нагрузка	средняя физическая нагрузка	тяжелый труд 1 степени	тяжелый труд 2 степени	тяжелый труд 3 степени
Напряженность легкой степени	80	80	75	75	75
Напряженность средней степени	70	70	65	65	65
Напряженный труд 1 степени	60	60			
Напряженный труд 2 степени	50	50			

Фактический уровень шума в лаборатории составляет 60 дБА. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной защиты (СКЗ) и средства индивидуальной защиты (СИЗ). СКЗ: устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования; изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения; применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения. СИЗ – применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны. В качестве материалов для шумозащитных экранов применяют минеральную вату, композитные материалы, пластмассы, поликарбонаты, древесина, металлы, кирпичную кладку, бетон [30].

6.2.4 Освещенность

В помещениях рабочих мест предпринят комплекс мер по созданию оптимальной световой среды и организации рационального естественного и искусственного (смешанного) освещения. Естественное освещение должно быть односторонним. Для общего освещения используются потолочные светильники рассеянного светораспределения с люминесцентными лампами «теплого» белого света. Светильники должны быть расположены сбоку от рабочих мест, что исключает засветку экранов прямыми световыми потоками. Во второй половине дня, при ярком солнце, в помещение может попадать световой поток прямых солнечных лучей повышенной яркости и, чтобы ограничить слепящее воздействие светопроемов, на окнах должны быть предусмотрены шторы. Искусственное освещение в помещении и на рабочих местах создает хорошую видимость информации на экране, машинописного и рукописного текста и других рабочих материалов. При этом в поле зрения работающих должны быть обеспечены соотношения яркости рабочих и окружающих поверхностей, максимально ограничено отражение от экрана и функциональной клавиатуры в результате отражения в них световых потоков от светильников и источников света. Для лучшего восприятия информации на экране и повышения чувствительности глаз, стены должны быть окрашены в оливково-зеленый цвет и иметь матовую фактуру. Уровень освещенности при работе операторов и программистов с дисплеями негативного изображения, одновременно с документацией должен составлять не менее 500 лк, что соответствует нормативным величинам по СанПиН 222/2.4.1/340-03. На рабочем месте также должно быть предусмотрено и аварийное освещение [25].

В помещении, где выполнялась выпускная квалификационная работа, обеспечено в соответствии с нормами общее равномерное освещение без слепящего воздействия на орган зрения работающих и без ярких пятен отражения светильников на экранах (осуществляется при помощи

люминесцентных ламп АБ белого света мощностью 40 Вт). Окраска стен, потолка, пола и оборудования выполнена в светлых тонах.

6.2.5 Электробезопасность

В производственных процессах используются два рода тока – постоянный и переменный. Они оказывают различное воздействие на организм при напряжениях до 500 В. Наибольшую опасность представляет переменный ток частотой 50 Гц, которая является стандартной для отечественных электрических сетей.

Все производственные электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности); до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью); свыше 1000 В (помещения особо опасные).

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает предельно допустимые напряжения и токи, протекающие через тело человека. При неаварийном режиме работы электроустановок постоянного и переменного тока частотой 50 и 400 Гц. Для переменного тока 50 Гц допустимое значение напряжения прикосновения составляет 2 В, а сила тока – 0,3 мА, для тока частотой 400 Гц – соответственно, 2 В и 0,4 мА; для постоянного тока – 8 В и 1,0 мА (не более 10 минут в сутки). При этом безопасные номинальные значения составляют: $U < 36$ В, $I < 0,1$ А, $R_{\text{зазем}} < 4$ Ом.

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает тепловое, химическое и биологическое воздействие.

Термическое действие тока подразумевает появление на теле ожогов различных форм и размеров, перегревание кровеносных сосудов и нарушение функциональности внутренних органов, которые находятся на пути протекания тока.

Электролитическое действие проявляется в расщеплении крови и иной органической жидкости в тканях организма, вызывая существенные изменения ее физико-химического состава.

Биологическое действие вызывает нарушение нормальной работы мышечной системы. Возникают непроизвольные судорожные сокращения мышц. Кроме того, такое действие оказывает влияние на органы дыхания и кровообращения, такие как легкие и сердце. Оно может привести к нарушению их нормальной работы, в том числе и к абсолютному прекращению их функциональности.

Для обеспечения защиты от случайного прикосновения к токоведущим частям необходимо применять следующие способы и средства: защитные оболочки; защитные ограждения (временные или стационарные); защитные барьеры.

Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, применяют следующие способы: защитное заземление (преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением); зануление (преднамеренное электрическое соединение с нулевым защитным проводником металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением); применение безопасного разделительного трансформатора (предназначен для питания цепей сверхнизким напряжением); малое напряжение; защитное отключение (быстродействующая защита, обеспечивающая автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности поражения током). Средства индивидуальной защиты подразделяются на изолирующие, вспомогательные и ограждающие. К основным изолирующим средствам в работе с электроустановками до 1000 В относят диэлектрические перчатки, инструмент с изолированными ручками. К дополнительным – диэлектрические галоши, коврики, диэлектрические подставки [31].

6.2.6 Нервно – психические перегрузки

Работа с ПЭВМ, связанная с напряжением многих систем организма, приводит к перегрузкам нервной системы и негативно влияет на психофизиологическое состояние. Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. В таблице 24 приведены значения продолжительности перерывов в зависимости от категории и нагрузки [25].

Таблица 24 – Продолжительность перерывов при работе с ПЭВМ

Категория работы с ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПЭВМ			Суммарное время регламентированных перерывов при 8-часовой смене, мин.
	группа А, знаки	группа Б, знаки	группа В, часов	
1	до 20000	до 15000	до 2	50
2	до 40000	до 30000	до 4	70
3	до 60000	до 40000	до 6	90

6.3 Экологическая безопасность

Негативное воздействие на окружающую среду могут оказывать отходы, включающие в себя энергосберегающие светильники и ПЭВМ, после выхода их из строя и утилизации. Применяемые методы утилизации таких отходов позволяют снизить негативное воздействие.

Снижение загрязнения возможно также за счёт совершенствования оборудования, производящего электроэнергию, применения более экономичных и результативных технологий, использования новых методов получения

электроэнергии и внедрения современных методов и способов очистки и обезвреживания отходов производства. Эффективное использование электроэнергии также оказывает положительное воздействие, например, современные ПЭВМ используют режимы с пониженным энергопотреблением при длительном простое.

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Под чрезвычайной ситуацией понимается обстановка, сложившаяся на производственной территории в результате стихийного бедствия, техногенной аварии (катастрофы), которая может повлечь или повлекла за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде.

Наиболее вероятной ЧС при выполнении ВКР является возникновение пожара. Пожар в рабочем помещении разработчика может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера. К причинам неэлектрического характера относятся неосторожное обращение с огнём (курение, оставление без присмотра нагревательных приборов).

Основными причинами электрического характера являются короткое замыкание и перегрузки сети.

Режим короткого замыкания – появление в результате резкого возрастания силы тока, электрических искр, частиц расплавленного металла, электрической дуги, открытого огня, воспламенившейся изоляции.

Пожарная опасность при перегрузках – чрезмерное нагревание отдельных элементов, которое может происходить при ошибках проектирования в случае длительного прохождения тока, превышающего номинальное значение.

Пожарная безопасность объекта должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Пожарная защита должна обеспечиваться применением средств пожаротушения, а также применением автоматических установок пожарной сигнализации.

Для тушения пожаров в рабочей зоне необходимо применять углекислотные (ОУ-5 или ОУ-10) и порошковые огнетушители (ОП-10), которые обладают высокой скоростью тушения, большим временем действия, возможностью тушения электроустановок, высокой эффективностью борьбы с огнём.

Рабочее помещение должно быть оборудовано пожарными извещателями, которые позволяют оповестить дежурный персонал о пожаре.

Согласно Постановлению Правительства № 390, в зданиях и сооружениях при одновременном нахождении на этаже более 10 человек должны быть разработаны и на видных местах вывешены планы эвакуации людей в случае пожара.

План эвакуации представляет собой заранее разработанную схему, на которой указаны пути эвакуации, эвакуационные и аварийные выходы, установлены правила поведения людей, порядок и последовательность действий в условиях чрезвычайной ситуации.

Выведение людей из зоны пожара должно производиться по плану эвакуации.

Порядок действий при возникновении пожара:

1. Сообщить руководству (дежурному).
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС.
3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

6.5 Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены вопросы социальной ответственности, к которым относятся профессиональная социальная безопасность, экологическая безопасность, а также безопасность в ЧС и правовые и организационные аспекты обеспечения безопасности.

Проанализированы вредные и опасные факторы, возникающие в ходе исследовательского процесса. К ним относятся отклонение микроклимата в

помещении, недостаточная освещённость рабочей зоны, опасность пожара и поражение электрическим током. Все эти факторы при превышении установленных норм негативно влияют на здоровье человека, вызывая долгосрочные ухудшения его состояния или травмы.

В части «Экологическая безопасность» были рассмотрены возможные негативные последствия, влияющие на окружающую среду, в ходе рабочего процесса.

В части «Безопасность при чрезвычайных ситуациях» кратко проанализирована вероятностная ЧС, которая может произойти непосредственно на рабочем месте.

Заключение

В результате выполненной работы рассмотрены общие вопросы упругопластики твердых тел, описаны отличия статических нагрузок от динамических, приведены основы исследований свойств материалов в условиях ударно-волнового нагружения, также изучены методы регистрации быстропротекающих процессов в динамических исследованиях.

Проведена обработка результатов экспериментов по регистрации процессов пластической деформации и разрушения цилиндрической оболочки, нагружаемой изнутри детонацией, определены значения динамического предела пластической деформации и скорости пластической деформации для каждого эксперимента.

Для образцов из спец. материала значения динамического предела относительной деформации составляют:

При скорости деформации $(2,53 \pm 0,41) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ – $(27,69 \pm 0,08) \%$;

При скорости деформации $(2,39 \pm 0,08) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ – $(28,42 \pm 0,21) \%$;

При скорости деформации $(1,83 \pm 0,05) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ – $(20,81 \pm 0,08) \%$;

При скорости деформации $(1,95 \pm 0,05) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ – $(20,81 \pm 0,08) \%$;

При скорости деформации $(1,83 \pm 0,05) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ – $(20,81 \pm 0,08) \%$;

При скорости деформации $(5,32 \pm 0,22) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ – $(14,0 \pm 2,3) \%$;

При скорости деформации $(5,08 \pm 0,24) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ – $(12,7 \pm 0,8) \%$.

Для образцов из стали значения динамического предела относительной деформации составляют:

При скорости деформации $(2,12 \pm 0,01) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ – $(49,45 \pm 0,62) \%$;

При скорости деформации $(2,86 \pm 0,08) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ – $(21,53 \pm 0,11) \%$;

При скорости деформации $(8,6 \pm 0,04) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ – $(16,8 \pm 1,8) \%$.

Проанализирована зависимость предела динамической пластичности конструкционных материалов от скорости деформации. Полученная зависимость будет использована для тестирования моделей динамической пластичности изделий из спец. материала.

Список использованных источников

1. Огородников В. А., Пушков В. А., Тюпанова О. А. Основы физики прочности и механики разрушения. – 2007.
2. Евстифеев А. Д. и др. Исследование прочностных характеристик акрилонитрилбутадиенстирол пластика при динамических нагрузках //ЖУРНАЛ ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ. – 2018. – Т. 88. – №. 3. – С. 392-396.
3. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. доктора техн. наук А.Л. Михайлова. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – 2015. 322 с.
4. Огородников В. А., Боровкова Е. Ю., Ерунов С. В. Прочность некоторых марок стали и армко-железа при ударно-волновом сжатии и разгрузке в области давлений 2ч200 ГПа //Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40. – №. 5. – С. 109-117.
5. Батьков Ю. В., Жерноклетов М. В. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. – РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.
6. Н.И. Куракин, В.В. Даниленко, Н.П. Козерук. Электроконтактная методика регистрации x-t диаграмм // Физика горения и взрыва, – 1989. – Т. 25. – № 5, С. 89-92.
7. Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов //АС Дубовик. – 1975.
8. Саламандра Г. Д. Фотографические методы исследования быстропротекающих процессов. – Наука, 1974.
9. Гарнов В. В., Горюнов Б. Г., Сицинская Н. М. Высокоскоростная фоторегистрирующая аппаратура для регистрации ядерных взрывов и других быстропротекающих процессов //Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40. – №. 6. – С. 132-137.
10. Методика выполнения измерений временных интервалов фотохронографическим методом. – Саров: ИФВ. – 2008. 32 с

11. Kuropatkin Y. P. et al. Uncored betatron BИМ-М a source of bremsstrahlung for flash radiography //Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference (Cat. No. 97CH36127). – IEEE, 1997. – Vol. 2. – P. 1669-1673.
12. Тонер Г. Рентгеноимпульсная техника. Физика быстропротекающих процессов //Мир, – 1971. – Т.1. – С. 336 – 381.
13. Павловский А. И. и др. Сильноточные безжелезные бетатроны //Доклады Академии наук. – Российская академия наук, 1965. – Т. 160. – №. 1. – С. 68-70.
14. Комрачков В. А., Ковтун А. Д., Макаров Ю. М. ПРИМЕНЕНИЕ импульсной РЕНТГЕНОГРАФИИ //Физика горения и взрыва. – 1999. – Т. 35. – №. 2.
15. Цукерман В. А., Манакова М. А. Источники коротких рентгеновских вспышек для исследования быстропротекающих процессов //ЖТФ. – 1957. – Т. 27. – №. 2. – С. 391.
16. Фёдоров А. В. и др. Экспериментальное исследование срывного разрушения капель и струй при их выбросе с поверхности жидкости //Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52. – №. 4. – С. 115-121.
17. Barker L. M., Hollenbach R. E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface //Journal of Applied Physics. – 1972. – Vol. 43. – №. 11. – P. 4669-4675.
18. Asay J. R., Barker L. M. Interferometric measurement of shock-induced internal particle velocity and spatial variations of particle velocity //Journal of Applied Physics. – 1974. – Vol. 45. – №. 6. – P. 2540-2546
19. Баранов В. К. и др. Оптогетеродинное измерение скорости нескольких быстро движущихся объектов //труды международной конференции XII Харитоновские тематические научные чтения, г. Саров. – 2010. – С. 297-302.
20. Danielson J. R. et al. Measurement of an explosively driven hemispherical shell using 96 points of optical velocimetry //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2014. – Vol. 500. – №. 14. – P. 142008.

21. Рыжанский В. А. и др. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве. – 2001.
22. Иванов А. Г. и др. Взрывное разрушение труб //Физика горения и взрыва. – 1974. – Т. 10. – С. 127.
23. Иванов А. Г. и др. Пластичность, разрушение и масштабный эффект при взрывном нагружении стальных труб //Физика горения и взрыва. – 1974. – Т. 10. – №. 4. – С. 603.
24. Трудовой кодекс Российской Федерации (с изменениями на 16 декабря 2019 года) // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dokipedia.ru>.
25. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации URL: <https://dokipedia.ru>
26. СНиП 2.2.2.542-03 Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации URL: <https://dokipedia.ru>
27. СанПиН 2.2.4.548-96. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации URL: <https://dokipedia.ru>
28. ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере // Законы, Кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://legalacts.ru>
29. ТОИ Р-45-048-97. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональных электронно-вычислительных машинах // Законы, Кодексы и нормативно-правовые акты Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://legalacts.ru>

30. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки. // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dokipedia.ru>

31. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dokipedia.ru>

32. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dokipedia.ru>

33. Постановление П. Р. Ф. от 25.04. 2012 № 390 «О противопожарном режиме» //Собрание законодательства Российской Федерации от 7 мая 2012 № 19, ст. – 2012. – Т. 2415.

34. ГОСТ Р. 12.1. 007-76 Вредные вещества //Классификация и общие требования безопасности. М., Издательство стандартов. – 1976.

Приложение А
(справочное)

Abstract
Literature review
Analysis

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM83	Гайдамак Мария Александровна		

Консультант школы отделения ИЯТШ ОЯТЦ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Кузнецов М.С.	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Сумцова О.В.			

Abstract

Graduation qualification work 11 p., 32 fig., 24 tables, 34 references, 2 app.

Key words: mechanical properties, dynamic limit of plastic deformation, strain rate, explosive experiment, high-speed photo-registration method, pulsed radiography method, linear regression method.

The research object is the special material.

The research goal is to investigate the dependence of the dynamic plasticity limit of structural materials on the strain rate.

The paper presents the results of explosive experiments. The results were processed and analyzed using the methods of high-speed photographic recording and pulsed radiography.

As results of the work, the values of the limit of dynamic plasticity and strain rate for special material as well as the nature of the dependence of these quantities are determined.

1 Literature review

1.1 General issues of elastoplastic behavior of rigid bodies

External forces cause changes in dimensions and shape of bodies, so all real bodies undergo deformation to their fracture point. The degree, nature and type of deformation depend on the properties, shapes and dimensions of materials, as well as on the way the external forces are applied.

In engineering analysis, fracture is supposed to occur instantaneously if some criterion quantity assumes a critical value. As criterion quantities we consider principal stress, relative elongation (strain), principal tangential stress, specific strain energy or total strain energy. Each of these criteria is applicable under certain conditions for some class of materials.

Rheological behavior of materials is characterized by two limiting cases: plastic flow (yield strength σ_T) or brittle fracture (tensile strength σ_B). It is necessary to note that the same material can be both brittle and plastic depending on the loading conditions. The values of yield point and strength of a material depend on many factors: shape and dimensions of the specimen, material structure, ambient conditions, and loading conditions.

If strain is constant ($\epsilon = \text{const}$), stress decreases with time (relaxation phenomenon), while if stress is constant ($\sigma = \text{const}$), strain increases with time (creep phenomenon).

In case of cyclic loading, failure occurs upon reaching the fatigue limit σ_f , which depends on the number of loading cycles N_c . Both creep and fatigue of materials depend of the history and conditions of load application [1].

Loading can be static and dynamic depending on its temporal evolution.

Loads are called static if their magnitude, direction and point of application remain constant or change slowly and insignificantly. Thus, one can assume that all structural components receiving static load stay in equilibrium. An example of static load is the gravity load produced by a structure.

Dynamic loads are characterized by rapid changes in their magnitude, direction or point of application.

Dynamic loads include impact loads, sudden loads and repeated varied loads. Examples of impact load include forging of metals or driving of piles; pressure of a wheel rolling on a track illustrates sudden load; repeated varied loads are experienced, for example, by components of crank mechanisms. Dynamic loads also include inertial load, such as the flywheel force.

Many materials respond differently to dynamic and quasistatic load. Early publications in this area belong to B. Hopkinson and W. Manson, who used a dropping indenter to produce tensile momentum. Gins used a spring mechanism to apply sudden load and a strain gage to measure strain. He was among the first researchers, who attempted to record a dynamic stress-strain curve. Later, Brouw and Vincent used a pendulum impact tester and piezoelectric crystals to measure stresses and observed stress-strain curves directly on their oscilloscope screen. Until 1940, stress measurements always involved one of two methods. Stress calculations were based on the relations of the theory of elastic wave propagation and were therefore limited by the elastic range. However, in 1940, Fanning and Bassett developed a method for measuring impact strains using strain gages with electrical resistance, and in 1948, Brown and Edmonds used a pendulum impact tester similar to that of Brown and Vincent. This allowed them to record time histories of tensile stress pulses, which did not distort voltage fluctuations arising in the probe. Most researchers, apart from Hopkinson and Manson, ignored the influence of the propagating stress wave in the specimen, believing that the stress measured at the end of the specimen was equivalent to the stress in the bulk of the specimen. In 1930, Guest concluded that when the impact velocity was high enough, the neglect of stress waves, propagating and reflected in the test setup, could lead to significant errors in the results. This was shown in 1948 by Clark and Duwez, who applied the theory of plastic wave propagation to tensile testing. Clark and Wood in 1949 described a new design of a tensile testing machine, in which the force was applied pneumatically and reached its maximum value within 5 μ s. They called this type of loading “fast”, meaning that dynamic loading was applied at velocities, at which the effect of stress wave propagation in the machine was negligible. This differs from impact loading when wave effects must be taken into account.

Campbell and Duby in 1956 were the first to produce shock loading in a machine designed specifically to analyze the test results in terms of wave propagation. They were able to measure the yield point of soft steel with exposure time of 25 μs and maximum strain rate of the order of 1000 s^{-1} [2].

At present, dynamic response of materials at strain rates of the order of 10^2 – 10^4 s^{-1} is studied by the Kolsky method using the split Hopkinson pressure bar or its modification. Initially, this method was intended only for uniaxial compressive testing. It has been constantly improved and today is used in its compressive, tensile, torsional, shear and biaxial modifications.

Studies of materials response to high strain-rate dynamic loads are of undoubted scientific and applied interest. For example, shock-wave loading of rigid bodies can lead to rearrangement of lattice, changes in volume and temperature, phase transformations, changes in electrical resistance and conductivity, etc. In addition, shock waves serve as a tool for studying materials response to extremely high strain rates ($10^4 - 10^9 \text{ s}^{-1}$) and pressures ($10^0 - 10^3 \text{ GPa}$), several orders of magnitude greater than those achieved under static and quasistatic loads.

Shock-wave loading is a supersonic compression wave with a sharp increase in material density and pressure. The width of the shock wave front is of the order of the mean free path of an elementary particle and amounts to 10^{-6} m . In solving practical problems and in theoretical studies, in view of the smallness of its width, the shock front is replaced by a discontinuity surface, crossing which is accompanied by a stepwise change in the materials parameters.

Strength effects and elastic-to-plastic transition in materials are associated with a loss of stability of the shock wave. In this case, during the transition to the plastic state, the shock wave divides into elastic (elastic precursor) and plastic components [3].

1.2 Techniques for recording transient processes in dynamic tests

Measurements of the physical parameters of unsteady fast processes, which include shock-wave processes, have their own specific features. The time scale of such

measurements is extremely short (most often, a few dozens of microseconds), and they must be taken remotely, because it is difficult not to destroy both the test specimen and various objects located next to it for one reason or another during explosion or impact. The measurements must be as comprehensive as possible, because the test system (assembly or specimen) cannot be recovered to re-validate the results. A large number of special methods to obtain the relevant information at the required level have been developed in an effort to resolve problems associated with the specific features of explosion and shock measurements. As a rule, the name of a particular experimental technique corresponds to the physical principle underlying the measurements. For electrical techniques: electrical-contact measurements involve closure of electrical circuits, capacitive methods employ changes in capacitor capacity; electromagnetic measurements are based on magnetic flux variations and, as a result, appearance of emf in the circuit, etc.

Experimental techniques can be divided into two main types:

- discrete, when recorded signals correspond to specific events in space;
- continuous, when signals carrying information on the state of a certain parameter of the test specimen, for example, a change in the motion of a given surface, are recorded continuously over time.

The most important component of any technique and any measuring system is its probe (transducer, detector) that records or converts the controlled quantity into a signal convenient for measurement. The probe can be mounted directly on the test specimen or located remotely, in particular, inside a protective shelter. Probes and their corresponding measurement layouts are generally classified based on the physical quantity that can be measured as a result of the experiment (velocity, pressure, etc.).

Below is a summary of some physical principles that underlie the techniques for recording materials response to high-strain-rate dynamic loading (as a result of explosion or high-velocity impact) [5].

1.2.1 Electrical - contact method

The method of electrical - contact probes is based on measuring the closing time of conductive metal contacts connected to electrical voltage (U) from 50 V to

200 V (depending on the measuring equipment used). As a rule, electrical contacts are made of PETV-2 0.28-mm-diameter wire and mounted on a support in a certain order to form nodes of a coordinate grid in space. Knowing the position of the electrical contacts in space and the time of their closing, one can infer the parameters of the recorded process, in particular, the trajectory of the surface or its velocity. The contact positioning error does not exceed 0.5 mm. The equipment that supplies voltage to electrical contacts and measures the time of their closure most often constitutes a single unit, a multifunctional measurement system. The error in measuring the time of electrical contact closing of such a system does not exceed 0.035 μs . The integrated software of such a measurement system automatically processes the inputs (recorded parameters defined initially) and presents the outputs in a convenient readable form. In addition, one can always monitor the source information in the form of a recorded oscillogram in the analog or digital form [5,6].

1.2.2 Method of electrical resistance

The method of electrical resistance is based on a change in the strength of electrical current through an alternating resistor (resistive sensor) as a result of changes in its electrical resistance when interacting with the moving surface of the test specimen. A typical resistive sensor is a piece of wire with high ohmic resistance (usually nichrome wire) fixed in a tube having a diameter of about 0,5 mm. If the end time of recording needs to be measured accurately, a usual copper wire is placed into the tube next to the nichrome wire with its end shifted to a predetermined distance. The moving surface of the test specimen shortens the length of the resistive sensor, which leads to a change in voltage recorded by the oscilloscope.

Based on the waveform one can establish the time when the test specimen surface starts moving, the end time of recording, and velocity as a result of its processing.

1.2.3 High-speed photography

The method of high-speed photography means shooting of dynamic phenomena that occur during transient processes by means of a speed photo recorder,

capable of operating in the “time magnifier” mode with a speed of $2,5 \cdot 10^4$ to $2,5 \cdot 10^6$ frames / sec (frame-by-frame shooting) or in the streaking mode, when a narrow area of the test object is cut out (by means of a narrow slit) and projected (swept in time) onto a photosensitive element (film) at a speed of up to 3 km/s. The optical phenomena of interest are projected through a lens and swept in time on a fixed photosensitive element located in an arc (centered on the axis of rotation of the mirror) using a rotating flat metal mirror.

Images of an object can be taken both against backlighting (basically explosive backlighting) or with the object’s own emission (if the object can emit light). When the camera is used in the «time magnifier mode», it produces a series of discrete photographic frames with images of the test object. Based on these frames, one can observe the changes in the test object over time and draw corresponding conclusions. When the camera is used in the streaking mode (streaking camera), it records continuous temporal evolution of a certain area of the test object (seen through the slit). As an output one basically obtains an $x - t$ diagram of the motion of test objects (change in the object position in time). Based on the diagram, one can determine the velocity of the object and draw conclusions on the processes experienced by the test object. The error of high-speed photography in measuring time intervals is no worse than $\Delta\tau = \pm 0,05 \mu\text{s}$, and the error of measuring spatial coordinates depends on the lens magnification and is generally no worse than $\Delta\tau = \pm 0,5 \text{ mm}$. Thus, using the method of high-speed photography, one can get a general idea, or a qualitative picture, of the process and determine some quantitative characteristics, for example, velocity of the test object [7-10].

1.2.4 Pulsed X-radiography

There are a lot of transient phenomena, which cannot be studied in detail by conventional optical techniques. In such cases, one can use pulsed X-radiography of fast processes with very short exposure times. The main property of X-rays is their high penetrating power, which removes most of the limitations associated with the screening of the phenomenon of interest by explosion products or powder gases. The method of

pulsed X-radiography makes it possible to visualize the state of the test specimen at a specific point in time. A radiographic unit is a complex system. The radiographic units available at the RFNC-VNIIEF Institute of Detonation Physics are capable of taking up to 9 frames in one shot, i.e. up to 9 images of the same specimen at 9 different points in time. Based on the ratio of X-ray attenuation and density of the material one can determine not only the density of the material behind the front of strong detonation and shock waves, but also its mass using the known material density (subject to some conditions) [11].

1.2.5 Laser - heterodyne interferometry

The method of laser-heterodyne interferometry (PDV – Photonic Doppler Velocimetry), which is the product of evolution and progress in laser interferometry for velocity measurements, is based on the use of optical heterodyning and analysis of the frequency response of the interference signal (the sum of the reference wave and the wave reflected from a moving surface). The signal wave (probe beam) reflected from the moving surface continuously changes its phase component, and when it interferes with the reference wave it has a certain beat frequency. This frequency is directly proportional to the velocity of the moving surface and can be recorded by modern equipment for digitizing and spectral analysis of the signal to produce a spectrogram of velocity profile over time.

The radiation is transmitted over the fiber optic guide from the laser to the probe. The latter is a lens, which focuses the light onto the test surface and gathers a sufficient amount of reflected or scattered light. The Doppler-shifted light received from the moving surface is sent over the fiber optic guide to the detector. Part of the probing (reference) radiation without the phase shift is diverted and transmitted directly from the laser to the detector. The reflected beam and the reference beam traveling in the same direction in the same fiber interfere and cause amplitude modulation of the resulting signal with a phase change recorded by the detector. The detector signal is recorded by a wide-band oscilloscope.

In the PDV method, the signal carrying the velocity information is a waveform recorded by a high-speed photodetector, which monitors the beats of the interference signal that occur in a single-mode fiber as a result of superposition of the reference light and the reflected signal. Short - time Fourier analysis of this signal allows extracting velocity spectra of the test surface [16].

The use of several methods based on different physical principles as applied to the same phenomenon makes the results more reliable. This paper discusses processing the results of experiments, in which high-speed photography and pulsed X-radiography were used to monitor crack development in a cylindrical shell explosively loaded from the inside. Based on the results of such processing, the dynamic yield strength of the test material and the strain rate were obtained [17-20].

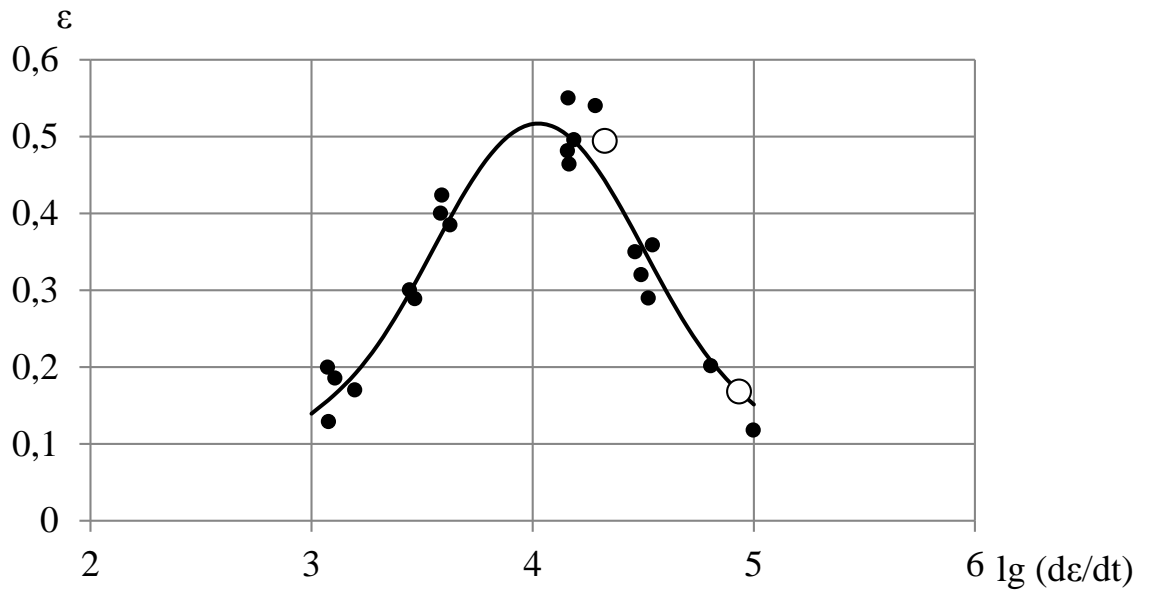
Analysis

As a result of the experiments, for the specimens of steel 3 and special material, the values of their relative dynamic yield stress and strain rate were obtained. The results of the experiments are summarized in Table 2.

Table 2 – Summary of experimental results.

Number of experiment	Test material	HE layer thickness, mm	Relative dynamic yield stress, %	Strain rate, $*10^4 \text{ s}^{-1}$
1	Special material	2	27,69±0.08	2,53±0.41
4		3	28,42±0.21	2,39±0.08
5		42 mm diameter charge	14,0±2.3	5,32±0.22
			12,7±0.8	5,08±0.24
7		3	20,81±0.08	1,83±0,05
				1,95±0,05
2	Steel 3	2	49,45±0.62	2,12±0,01
3		2	21,53±0.11	2,86±0,08
6		42 mm diameter charge	16,8±1.8	8,6±0,4

The dynamic yield stress of the steel 3 specimens was plotted as a function of strain rate. The plots of dynamic yield stress as a function of strain rate for steel 3 are shown in Figure 31 together with the 1974 experiments of A.G. Ivanov [21-23]. The figure shows that the data closely match each other; hence, one can conclude that the experimental procedure is correct.



- – Results of last experiments;
- – Current results;
- – Approximation of experimental data.

Figure 31 – Dynamic yield stress of steel 3 specimens as a function of strain rate.

The data obtained were used to plot the dynamic yield stress as a function of strain rate for the specimens of special material, as shown in Figure 32.

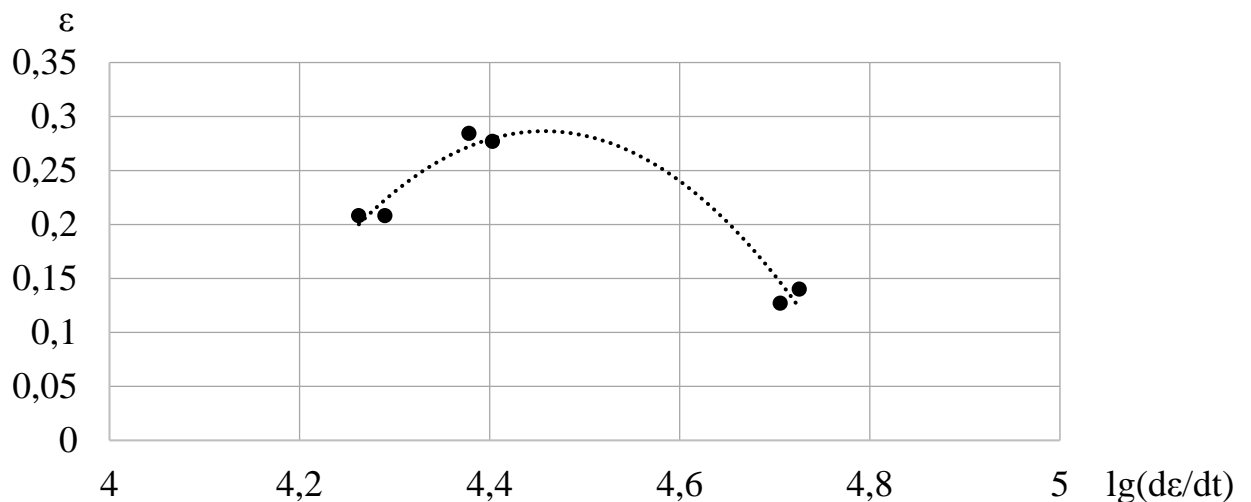


Figure 32 – Dynamic yield stress of specimens of special material as a function of strain rate.

Looking at the plots of dynamic yield stress versus strain rate for the specimens of special material and steel 3, one can conclude that the value of dynamic yield stress first grows and then decreases with increasing strain rate. Comparison of the plots for

the specimens of special material and steel 3 indicates that these curves have a similar slope. One can also note that the maximum value of yield stress for the special material lies in the range of higher strain rates compared to that of steel 3.

High-speed photography is the most preferable method of those used. In pulsed radiography, the outbreak is identified based on the visible cracks, while the strain rate is established indirectly based on the self-similarity of the experimental setup and the tabulated value of detonation velocity. High-speed photography, on the contrary, provides a direct time reference for the recorded streaking trace and more sound estimation of the strain rate; it enables identifying the outbreak time based on the visible detonation products erupting through the cracks in the shell. Thus, the method of high-speed photography is more accurate.

Приложение Б (обязательное)

Рис. 1

Рис. 2

Остальное - см. Рис. 1

ФЮРА 14.04.02.183 СБ

Таблица 1

Обозначение	Д, мм	Л, мм	Л1, мм	д, мм	Материал п.1 спец. материал	Примечание
ФЮРА 14.04.02.183-01	44	111	182	2	сталь 17п3	
ФЮРА 14.04.02.183-02	44	111	182	2	сталь 17п3 ГОСТ 380-2005	
ФЮРА 14.04.02.183-03	42	150	221	2	сталь 17п3 ГОСТ 380-2005	
ФЮРА 14.04.02.183-04	44	111	182	3	спец. материал	
ФЮРА 14.04.02.183-05	44	150	221	-	сталь 17п3 ГОСТ 380-2005	см. Рис. 2
ФЮРА 14.04.02.183-06	44	150	221	-	спец. материал	см. Рис. 2
ФЮРА 14.04.02.183-07	44	150	221	2	спец. материал	

Формат Лист /из	Обозначение	Наименование	Приме- чание
		<i>Детали</i>	
1	ФЮРА 14.04.02.183.001	Оболочка	1
2	ФЮРА 14.04.02.183.003	Распределитель	1
3	ФЮРА 14.04.02.183.006	Диск из пенопласта	1
4	ФЮРА 14.04.02.183.007	Подставка	1
		<i>Стандартные изделия</i>	
7		Разетка под детонатор	1
8		Электродетонатор	1
		<i>Материалы</i>	
11		Пластиковые ВВ	1
12		Швырок ВВ на основе октагена	1

ФЮРА 14.04.02.183 СБ

Имя/Ист.	№ докум.	Лист	Дата	Масса	Максимум
Разработ.	Габришев Г.А.	1/1		11	11
Исполн.					
Смет.					

**Макет цилиндра
Сборочный чертёж**

Имя/Ист. № докум. Лист Дата

Разработ. Габришев Г.А. 1/1

Исполн.

Смет.

Формат А2

Копировать