

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 12.04.01 Приборостроение  
 Отделение контроля и диагностики

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

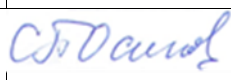
<b>Тема работы</b> <b>Математическое моделирование системы отслеживания шва в сварке</b> <b>электронным пучком</b>
--

УДК 620.179.152:621.791.053

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ81	Густомясов Максим		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов Сергей Павлович	К.Т.Н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	К.Т.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД	Федорчук Юрий Матрофанович	Д.Т.Н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вавилова Галина Васильевна	К.Т.Н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

### по направлению 12.04.01 «Приборостроение»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные и общепрофессиональные компетенции</i>		
Р1	Применять навыки эффективной индивидуальной и командной работы, включая руководство командой, работу по междисциплинарной тематике с учетом этики и корпоративных интересов, в том числе и на иностранном языке.	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК- 1, ОПК-3, ПК-12, ПК-16, ПК-17, ПК-18, ПК-22), ), СУОС ТПУ (УК-1, УК-3, УК-4, УК-5, УК-6), CDIO Syllabus (2.1, 2.3, 2.4, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.2, п. 2.3, п. 2.4, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса, 19.032 Специалист по диагностике газотранспортного оборудования, 40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-
Р2	Применять навыки управления разработкой и производством продукции на всех этапах ее жизненного цикла с учетом инновационных рисков коммерциализации проектов, в том числе в нестандартных ситуациях.	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОПК-1, ПК-6, ПК -8, ПК-16, ПК-18, ПК-19, ПК-20), СУОС ТПУ (УК-2, УК-6), CDIO Syllabus (2.1, 2.4, 2.5, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.6, 4.7, 4.8), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, п. 2.3, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 29.006 Специалист по проектированию систем в корпусе, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам)
Р3	Собирать, хранить, обрабатывать, использовать, представлять и защищать информацию при соблюдении требования информационной безопасности и корпоративной культуры.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-4, ПК-17, ПК-19), СУОС ТПУ (УК-5, УК-6), CDIO Syllabus (1.1, 2.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI , требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
		измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса)
Р4	Применять навыки планирования, подготовки, проведения теоретических и экспериментальных исследований, а также представления и интерпретации полученных результатов.	Требования ФГОС (ОПК-1, ОПК-2 , ПК-1, ПК-2 , ПК-15, ПК-17), СУОС ТПУ (УК-1), Критерий 5 АИОР (п.1.1, п.1.2, п.1.4), CDIO Syllabus (2.1, 2.2, 4.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами)
Р5	Разрабатывать нормативную, техническую и методическую документацию в области неразрушающего контроля и измерительной техники.	Требования ФГОС (ПК-3, ПК-9 , ПК- 11, ПК-17), CDIO Syllabus (1.2, 4.4), Критерий 5 АИОР (п.1.3, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник)
Р6	Быть готовым к комплексной профессиональной деятельности при разработке инновационных и эффективных методов и средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (ПК-5, ПК-6, ПК-8, ПК-10, ПК-11, ПК-13, ПК-14, ПК-18, ПК-20, ПК-21, ПК-22), СУОС ТПУ (УК-1), CDIO Syllabus (1.2, 1.3, 2.3, 4.1, 4.4, 4.5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.3, п. 1.4, п.1.5, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам)

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
Р7	Разрабатывать и внедрять энерго- и ресурсоэффективные технологические процессы производства приборных систем с использованием высокотехнологичных средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (ПК-7, ПК-8, ПК-10, ПК-11, ПК-12, ПК-14, ПК-21), CDIO Syllabus (1.3, 4.1, 4.2, 4.5, 4.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса, 19.032 Специалист по диагностике газотранспортного оборудования)

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение  
 Уровень образования магистр Отделение  
 контроля и диагностики  
 Период выполнения: (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года)

Форма предоставления работы:

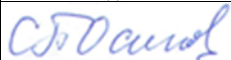
<b>магистерская диссертация</b> <small>(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)</small>
--

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

Срок сдачи студентом работы:	
------------------------------	--

Дата контроля	Название раздела(модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
03.02.2020	Литературный обзор по теме	15
20.02.2020	Подготовка оборудования к проведению экспериментов.	10
12.03.2020	Изучение оборудования, методов расчета, программного обеспечения, подготовка материалов к проведению экспериментов.	11
23.03.2020	Проведение экспериментальных исследований	17
12.04.2020	Анализ результатов экспериментов	20
20.04.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	12
27.04.2020	Социальная ответственность	9
14.05.2020	Заключение	6

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов Сергей Павлович	К.Т.Н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Вавилова Галина Васильевна	К.Т.Н.		

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

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности  
 Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение  
 Отделение контроля и диагностики

**УТВЕРЖДАЮ:**  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Вавилова Г.В.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ81	Густомясову Максиму

Тема работы:

Математическое моделирование системы отслеживания шва в сварке электронным пучком	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	51-56/с от 20.02.20

Срок сдачи студентом выполненной работы:	5.06.2020
--	-----------


#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	Экспериментальная установка электроннолучевой 3д печати
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1. Закономерности формирования и алгоритмы обработки цифровых изображений. 2. Финансовый менеджмент, ресурсо-эффективность и ресурсосбережение. 3. Социальная ответственность 4. Заключение и выводы
<b>Перечень графического материала</b>	1. Презентация, выполненная в MS PowerPoint
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультанты</b>
1. Литературный обзор; 2. Материалы и методы исследования; 3. Экспериментальная часть; 4. Заключение.	Осипов Сергей Павлович

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	Якимова Татьяна Борисовна
6. Социальная ответственность.	Федорчук Юрий Митрофанович
<b>Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
<b>Математическое моделирование системы отслеживания шва в сварке электронным пучком</b>	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	10.10.2019
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов Сергей Павлович	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ81	Густомясов Максим		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1БМ81	Густомясов Максим

<b>Школа</b>	ИШНКБ	<b>Отделение школы</b>	ОКД
<b>Уровень образования</b>	магистратур	<b>Направление/специальность</b>	12.03.01 Приборостроение

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами. Оклады в соответствии с окладами сотрудников «НИ ТПУ»: оклад доцента – 35120 руб., оклад исполнителя равен минимальному размеру оклада (1 квалификационный уровень) -12130 руб
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	- районный коэффициент- 1,3; - накладные расходы – 16%; - норма амортизации 10%.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	В соответствии с налоговым кодексом Российской Федерации. Отчисления во внебюджетные фонды – 30,2 %

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения исследования	Технико-экономическое обоснование исследовательской деятельности
2. Планирование и формирование бюджета исследования	Планирование этапов работы, определение календарного графика и трудоемкости работы, составление сметы затрат
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Расчет сравнительной эффективности проекта

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

Диаграмма Ганта

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н.	15.02.2020	



## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1БМ81	Густомясову Максиму

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОКД</b>
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	12.04.01 Приборостроение

Тема ВКР:

<b>Математическое моделирование системы отслеживания шва в сварке электронным пучком</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Экспериментальная установка электронно лучевой 3D печати титановым порошком</i>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Производственная безопасность:</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>1.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p><i>Вредные факторы:</i>  <i>Недостаточная освещенность, Проведен расчет освещения рабочего места; представлен рисунок размещения светильников на потолке с размерами в системе СИ;</i>  <i>Нарушения микроклимата, оптимальные и допустимые параметры;</i>  <i>Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ;</i>  <i>Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ;</i>  <i>Опасные факторы:</i>  <i>Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R заземления, СКЗ, СИЗ;</i>  <i>Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения, Приведена схема эвакуации.</i></p>
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p>	<p><i>Наличие промышленных отходов (бумага-черновики, вторцвет- и чермет, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника, обрезки монтажных проводов,) и способы их утилизации;</i></p>

<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p>	<p><i>Рассмотрены 2 ситуации ЧС:</i>  <i>1) природная – сильные морозы зимой, (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, транспорте);</i>  <i>2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии, промышленного шпионажа), представлены мероприятия по обеспечению устойчивой работы</i></p>
<p><b>4. Перечень нормативно-технической документации.</b></p>	<p><i>-ГОСТы, СанПиНы, СНиПы</i></p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	15.02.2020 г.
--	---------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД	Федорчук Юрий Митрофанович	д.т.н.		15.02.2020 г.

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ81	Густомясов Максим		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 126 с., 25 рис., 30 табл., 32 источника, 1 прил.

Ключевые слова: электронная микроскопия, электронно-лучевая сварка, математическое моделирование, электронный пучок, сканирование сварных швов.

Объектом исследования является экспериментальная установка для электроннолучевой сварки.

Цель работы – разработка математической модели системы отслеживания шва в сварке электронным пучком, основанной на формировании цифровых радиографических изображений в поле вторичных электронов и фотонов.

В ходе исследований, проведенных в рамках выпускной квалификационной работы, была создана математическая модель системы отслеживания шва в сварке электронным пучком. Экспериментально доказана эффективность применения данной модели к любой электронно-сварочной установке. Для простейшего детектора излучения (пластины-детектора) без использования физических фильтров были получены электронные изображения сварных швов, отличающиеся высокой четкостью. Эмпирически доказана независимость сканирования от механических характеристик электронно-сварочной установки. Доказано, что отсутствие источников электронов с необходимой мощностью пучка не является препятствием для получения достаточного качества измерений.

Область применения: результаты исследований могут быть применены при проектировании новых и модернизации эксплуатируемых электронно-сварочных установок в авиастроении, ракетостроении, атомной промышленности и точном машиностроении с целью повышения эффективности отмеченных установок и повышения качества сварки.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСМ – атомно-силовой микроскоп (или атомно-силовая микроскопия);

СЗМ – сканирующий зондовый микроскоп (или сканирующая зондовая микроскопия);

СТМ – сканирующий туннельный микроскоп (или сканирующая туннельная микроскопия);

СТС – сканирующая туннельная спектроскопия;

ССТ - сканирующая силовая микроскопия;

ТЭМ – трансмиссионный электронный микроскоп (или трансмиссионная электронная микроскопия);

СЭМ – сканирующий электронный микроскоп (или сканирующая электронная микроскопия);

ОК – объект контроля

ИРИ – источник рентгеновского излучения

РРИ – регистратор рентгеновского излучения

ПР – пространственное разрешение

ЭР – эффективность регистрации

РК – радиационный контраст

ФП – фотопреобразователь

ППД – полупроводниковые детекторы

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ОСШ – отношение сигнал/шум

ПК – производительность контроля

МКО – массовый коэффициент ослабления излучения

ЛКО – линейный коэффициент ослабления излучения

РО – рабочий орган

## Оглавление

Введение.....	17
1 Физические основы сканирования поверхности электронным пучком	21
1.1 Электроны, рассеянные упруго от поверхности изделия.....	23
1.2 Электроны, испытавшие неупругое рассеяние.....	24
1.3 Эффект поглощения .....	25
2 Оценка разрешающей способности метода измерения профиля поверхности объекта сканированием электронным пучком .....	26
2.1 Связь радиационного контраста и пространственного разрешения .....	27
2.2 Вид принимаемых сигналов в электронной микроскопии.....	28
2.3 Перспективы развития систем сканирования поверхности электронным пучком .....	29
3 Детектор электронов.....	32
3.1 Детектор вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли (SE).....	32
3.2 Регистратор электронов для работы в режиме низкого вакуума (LVSTD) .....	34
3.3 Детекторы обратно отражённых электронов (BSE).....	35
3.4 Полупроводниковый BSE-детектор (LE 4Q-BSE) .....	38
3.5 Катодолюминесцентные детекторы (CL).....	40
3.6 Детектор вторичных ионов (SITD) .....	44
4 Техническая реализация эксперимента .....	48
4.1 Устройство растрового электронного микроскопа .....	48
4.2 Экспериментальная установка электроннолучевой 3D печати .....	49
4.3 Детектор излучения .....	50
4.4 Формирование растровых изображений .....	50

4.5 Тестовый эксперимент .....	51
5 Эксперимент .....	54
5.1 Параметры измерения и оборудование .....	54
5.2. Проведение эксперимента .....	56
5.3. Математическая модель системы отслеживания шва в сварке электронным пучком .....	59
6. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	64
6.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения 64	
6.2. SWOT-анализ.....	67
6.3. Планирование научно-исследовательских работ.....	70
6.3.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	70
6.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ.....	71
6.3.3. Разработка графика проведения научного исследования.....	72
6.4. Бюджет научно-технического исследования .....	75
6.4.1. Расчет материальных затрат НИИ.....	75
6.4.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.....	76
6.4.3. Основная заработная плата исполнителей темы .....	77
6.4.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)....	78
6.4.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.....	78
6.5. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	79

7. Раздел «Социальная ответственность».....	82
7.1. Производственная безопасность .....	82
7.1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения .....	82
7.1.1.1 Нехватка естественного света, малая освещенность .....	83
7.1.1.2 Низкое качество воздуха рабочей зоны.....	87
7.1.1.3 Повышенный уровень шума .....	88
7.1.1.4 Высокое электромагнитное и ионизирующее излучение в помещениях.....	91
7.1.2 Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения .....	92
7.1.2.1 Поражение электрическим током .....	92
7.1.2.2. Пожарная безопасность.....	94
7.1.2.3 Источник излучения .....	99
7.2 Экологическая безопасность .....	100
7.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	101
7.4 Перечень нормативно-технической документации.....	102
Заключение .....	104
Список публикаций студента .....	105
Список использованных источников .....	106
Приложение А .....	110

## **Abstract**

In the course of research, a mathematical model of the tracking system of a weld in electron beam welding was developed. The effectiveness of applying this model to any electronic welding installation has been experimentally proven. For the simplest radiation detector (detector plate) without the use of physical filters, electronic images of welds, which are distinguished by high definition, were obtained. Empirically proven independence of the scan from the mechanical characteristics of the electronic welding installation. It is proved that the absence of electron sources with the necessary beam power is not an obstacle to obtaining a sufficient measurement quality.



## Введение

Электронно-лучевая сварка является одним из наиболее точных способов соединения фрагментов изделий из металлов и сплавов. Этот вид сварки достаточно широко применяется со второй половины XX века в различных отраслях промышленности, особенно в тех, в которых выдвигаются особые требования к качеству и надёжности сварных соединений. Среди таких отраслей можно выделить авиастроение, ракетостроение, атомная энергетика, точное станкостроение, автомобилестроение.

Данный вид сварки имеет ряд преимуществ, такие как:

- Процесс электронно-лучевой сварки проходит в высоком вакууме, что положительно влияет на чистоту сварного шва от примесей и загрязнений.
- Уровни плотности энергии электронного пучка имеют высокие значения. Сфокусированный электронный пучок позволяет локально нагреть до температуры плавления любой металл на маленькой площади (до  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ ). Это даёт возможность сваривать тугоплавкие материалы, например, титан, вольфрам, ниобий, тантал, цирконий, а также материалы с высокой теплопроводностью (медь, алюминий).

Отмеченные выше преимущества приводят к возможности создания так называемого «кинжального реза». Сфокусированный электронный пучок создает канал, состоящий из паров и плазмы, позволяющий производить сварку деталей глубиной от 5 см и более.

Однако из-за маленькой площади проплавления и формирования объёмной зоны проплавления в виде конуса появляется необходимость точного наведения электронного пучка на зону шва. Высококачественная сварка электронным пучком возможна при повторении движущейся точкой, связанной с осью пучка, осевой линии сварного шва (траектории сварки).

Для манипулирования пространственным положением оси пучка электронов необходимо отслеживание траектории сварки с целью включения его (отслеживания) в обратную связь управления положением пучка. Для наведения

электронного пучка на сварочный шов используются два основных метода отслеживания траектории сварного шва: метод анализа оптических изображений; способ отслеживания траектории шва по его изображению в поле вторичного ионизирующего излучения. Поле вторичного ионизирующего излучения формируется вторичными электронами и вторичными фотонами.

Оптический метод обладает рядом достоинств и недостатков. К достоинствам этого метода относится наличие и доступность на рынке научного оборудования соответствующих оптических регистраторов и электромеханических (роботизированных) манипуляторов, лёгкость их взаимного сопряжения и согласования с технологическим процессом, простота наблюдения и управления траекторией перемещения электронного пучка по траектории сварки.

Принято считать, что основной недостаток оптического метода связан с различием изменений параметров компонентов систем оптического контроля, что приводит к снижению точности оценки отслеживаемой траектории и , следовательно точности наведения электронного пучка на зону формируемого сварного шва. Оптические системы контроля требуют периодической отстройки на специальных эталонах, что затрудняет их использование в технологии электронно-лучевой сварки.

Существует и второй способ управления перемещением электронного пучка, свободный от указанного выше недостатка оптического метода. Направление и интенсивность электронного пучка регулируется электромагнитными полями, создаваемыми электромагнитными катушками. При необходимости сканирования электронным пучком зоны, близкой к сварному шву, к формированию процедуры сканирования подключаются те же катушки, что обеспечивают наведение луча на точку. Такой подход исключает значительные отклонения от траектории сварки.

Электроннолучевая сварка широко применяется в промышленности более полувека. Но до сих пор основная масса производств не оборудовано системами автоматического наведения на сварной шов. Причина не в отсутствии

необходимых технологий. Уже достаточно давно системы сканирования, реализованные в различных видах микроскопов (оптический микроскоп или растровый электронный микроскоп), адаптированы и установлены на новейших установках электроннолучевой сварки.

Причина заключается в высокой стоимости данного дополнительного сварочного оборудования. На данный момент времени никто не занимается модернизацией имеющегося оборудования.

Нет возможности просто заменить систему наведения на шов. А заменить уже имеющееся на более современное нерентабельно, так как новое оборудование стоит десятки, а то и сотни миллионов рублей (в зависимости от мощности).

### **Цель и задачи проекта**

**Объект исследования** – экспериментальная установка для электроннолучевой сварки.

**Предметом исследования** является математическое моделирование системы отслеживания шва в сварке электронным пучком.

**Практическая новизна** заключается в возможности модернизации оборудования исследуемого типа на основе предлагаемого способа отслеживания траектории шва в процессе сварки.

**Целью исследований** является разработка математической модели системы отслеживания шва в сварке электронным пучком, основанной на формировании цифровых радиографических изображений в поле вторичных электронов и фотонов.

Для реализации цели, отмеченной выше, предполагается решить ряд задач:

- проанализировать существующие типы систем сканирования поверхности электронным пучком;
- исследовать способы формирования радиографических изображений сварных швов;

- разработать математическую модель системы отслеживания шва в сварке электронным пучком;

- провести экспериментальную проверку сканирования траектории сварного шва электронным пучком.

**Методы исследования.** При решении сформулированных выше задач проводились экспериментальные исследования по отслеживанию шва на установке электроннолучевой сварки. В процессе исследований использовались методы обработки экспериментальных результатов, методы обработки изображений, методы имитационного моделирования.

**Апробация выпускной квалификационной работы.** Актуальность исследований, цель, основные задачи и их последовательное решение докладывались на отчетах по научно-исследовательской работе магистрантов отделения контроля и диагностики ИШ НКБ.

**На защиту выносятся:**

- результаты анализа существующих типов систем сканирования поверхности электронным пучком;

- результаты сравнения способов формирования радиографических изображений сварных швов;

- математическая модель системы отслеживания шва в сварке электронным пучком;

- оценка эффективности применения функции сканирования к стандартным установкам электроннолучевой сварки.

## 1 Физические основы сканирования поверхности электронным пучком

Под физическими основами сканирования поверхности объекта исследований электронным пучком понимается совокупность физических закономерностей взаимодействия электронов с материалом изделия, формирования и регистрации полей вторичного ионизирующего излучения (ИИ) и связи их характеристик (полей) с параметрами поверхности объекта. Для понимания принципов сканирования электронным пучком рассмотрим принцип работы растрового микроскопа.

К рассматриваемой нами задаче близка задача сканирующей электронной микроскопии, поэтому рассмотрим принципы сканирования для этого метода исследования объектов.

На рисунке 1 приведена стилизованная схема сканирования поверхности испытуемого объекта узким пучком электронов. Здесь под узким пучком электронов подразумевается модель точечного мононаправленного источника ИИ (электронов). На схеме вычленены основные сценарии взаимодействия электронов с веществом. С отмеченными сценариями ассоциируют соответствующие эффекты взаимодействия.

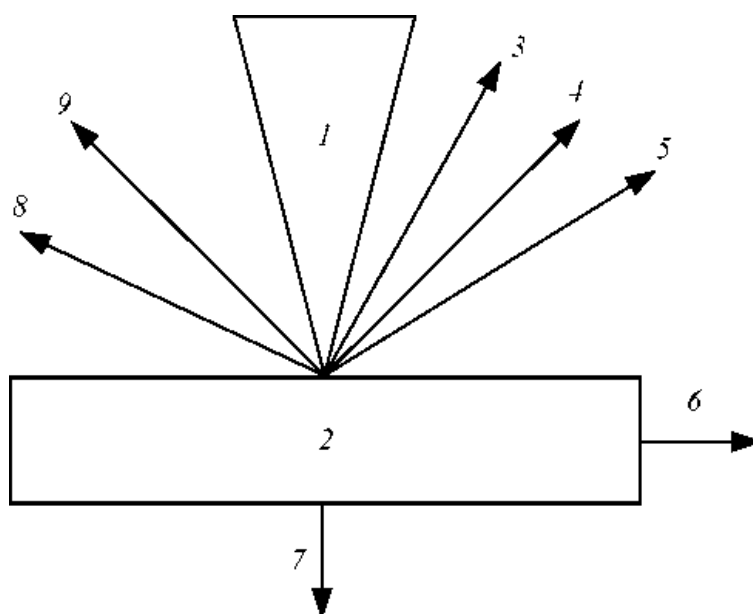


Рисунок 1. Сценарии взаимодействия электронов 1 с веществом объекта исследований 2:  
3 – отражение электронов от поверхности (альбеда электронов); 4 – процесс образования вторичных электронов (рассеяние); 5 – процесс образования Оже-электронов; 6 – поглощение электронов; 7 – трансмиссия (перенос) электронов; 8 – процесс католюминесценции; 9 – процесс формирования рентгеновского излучения

С каждым эффектом взаимодействия электронов с веществом связывают некую безразмерную характеристику, называемую сечением взаимодействия

электронов с веществом, определяющую вероятность взаимодействия электронов с веществом по одному из указанных сценариев. Не следует забывать, что сумма всех вероятностей для отмеченных выше сценариев взаимодействия электронов с веществом равна нулю.

При условии физической и технической реализуемости возможности вычленения эффектов взаимодействия электронов с веществом и регистрации параметров соответствующих полей ИИ можно выделить и ассоциируемые с отмеченными выше полями измерительные сигналы. Чисто гипотетически таких измерительных сигналов, несущих информацию об объекте исследований, может быть не более семи.

Следует отметить, что вклад сечения того или иного взаимодействия электронов в интегральное (общее) сечение взаимодействия зависит от параметров материала объекта исследований (плотности и атомного номера) и от энергии электронов. Отмеченные вклады определяют информативность того или иного поля ИИ для рассматриваемой задачи.

Результатом сканирования поверхности объекта контроля должно быть некоторое радиографическое изображение, в настоящее время, как правило, это изображение является цифровым радиографическим изображением (ЦРИ).

Принято считать, что для получения ЦРИ для электронной микроскопии и рассматриваемой задачи (оценки рельефа поверхности объекта с выделением зон интереса) наибольшей информативностью обладают поля отражённых, вторичных и поглощённых электронов. Информативность оставшихся полей применительно к электронной микроскопии признаётся незначимой, и, в лучшем случае, эти поля ИИ используются для уточняющих оценок. Подчеркнём, что использование того или иного поля ионизирующего излучения, формируемого при сканировании объекта испытаний с фиксированными параметрами (плотностью и эффективным атомным номером) электронным пучком, определяется, прежде всего энергией электронов. При невозможности отстроить информацию об одном поле ИИ от информации от другого поля качество необходимых оценок ухудшается.

Последовательно рассмотрим особенности формирования ЦРИ для наиболее информативных полей ИИ.

### 1.1 Электроны, рассеянные упруго от поверхности изделия

Под рассеянными от поверхности изделия электронами понимаются электроны, испытавшие упругое рассеяние с материалом объекта в направлении от поверхности объекта, которая упруго отразилась от поверхности образца. Сечение этого взаимодействия зависит от энергии электронов и от эффективного атомного номера материала. Под упругим взаимодействием подразумевается сохранность энергии частицы на прежнем уровне. Напомним, что пучок электронного излучения близок к монохроматическому. Упомянутый факт (равенство энергии первичного и вторичного электронов) позволяет сделать в процессе физического эксперимента вывод о свершившемся факте упругого рассеяния.

Следует отметить, что рассеяние происходит, строго говоря, не от поверхности объекта, а в некотором приповерхностном слое, глубина которого зависит от энергии электронов. Эта глубина тем выше, чем выше энергия электронов и чем меньше значение эффективного атомного номера. Электроны, рассеянные глубоко под поверхностью, могут исказить информацию о профиле поверхности исследуемого объекта.

Сечения упругого рассеяния электронов увеличивается с ростом эффективного атомного номера.

Описанные физические закономерности взаимодействия электронов с веществом по сценарию упругого рассеяния (отражения от поверхности) являются основой принципа физической реализуемости построения цифрового радиографического изображения поверхностного слоя изделия для электронов, рассеянных упруго от поверхности испытуемого изделия и, соответственно, способа построения профиля поверхности и способа отслеживания траектории сварного шва.

Общий вклад в цифровые сигналы с радиометрических детекторов вносят не только электроны, рассеянные однократно, но и электроны, рассеянные многократно.

В этом пункте идёт об электронах, испытавших взаимодействие с материалом объекта по сценарию упругого рассеяния.

Количество электронов, испытавших упругое рассеяние, зависят также от угла рассеяния. Зависимость отмеченного количества электронов от угла рассеяния описывается угловым распределением упругого рассеяния электронов, именно эта функция используется при выборе взаимного пространственного расположения источника электронов и их регистратора.

В электронном микроскопе источник электронов и регистратор расположены в достаточной близости друг от друга. Отметим, что конечное изображение в электронном микроскопе называется электронным изображением, но, тем не менее, может быть отнесено к классу цифровых радиографических изображений.

Любые изображения характеризуются, помимо скорости формирования изображений, контрастом и разрешающей способностью. Под контрастом понимается различие в яркостях соседних областях изображения. Под разрешающей способностью, в свою очередь, понимается способность различать отдельно два расположенных фрагмента изображения. Мерой разрешающей способности является расстояние между фрагментами в нанометрах (микрометрах, миллиметрах).

В электронных микроскопах уровень разрешающей способности изменяется от десятков нанометров для электронных пучков с небольшой энергией до сотен нанометров для электронных пучков с большими энергиями.

## 1.2 Электроны, испытавшие неупругое рассеяние

Второе информативное поле составляют электроны, энергия которых отлична от энергии электронов первичного пучка. В эту группу электронов можно отнести и электроны, испытавшие однократное неупругое рассеяние и многократное рассеяние, причём в цепочке рассеяний должно присутствовать хотя бы одно неупругое. К этой же группе относятся и вторичные частицы, выбитые из материала образца первичным потоком. Идентифицировать природу электрона практически невозможно, поэтому логично назвать рассматриваемое поле полем электронов, испытавших неупругое рассеяние. Эти электроны имеют меньшую по сравнению с первичными энергию, поэтому сечение их взаимодействия с веществом существенно



выше, чем для первичных электронов. Указанный факт обуславливает высокую чувствительность метода, основанного на рассматриваемом поле, к изменению рельефа испытываемого объекта.

Низкоэнергетические электроны позволяют получить высокую разрешающую способность, близкую к 10 нанометрам. Такие электроны регистрируются электронно-оптическим преобразователем с последующей трансформацией аналогового сигнала в цифровой сигнал.

Количество фотонов из рассматриваемой группы зависит от угла между осью пучка первичных электронов и направлением наблюдения. Зависимость же количества электронов от эффективного атомного номера испытываемого материала принято считать несущественной. Зависимость сечения рассматриваемого взаимодействия от плотности материала линейна.

Из анализа вышесказанного следует вывод о соблюдении принципа физической реализуемости относительно оценки профиля поверхности в районе сварного шва на основе анализа изображений, полученных в поле электронов, испытавших неупругое рассеяние с материалом объекта.

### 1.3 Эффект поглощения

Эффект поглощения является наиболее значимым среди эффектов взаимодействия электронов с веществом. При этом виде взаимодействия часть энергии пучка электронов передаётся материалу объекта (поглощённая доза). Измерить поглощённую дозу в режиме реального времени непосредственно в объекте исследований затруднительно, поэтому в качестве её оценки используют разность между интегральной энергией пучка первичных электронов и общей энергией рассеянных электронов (упругое и неупругое взаимодействие). Строго говоря, для тонких изделий необходимо учитывать трансмиссию излучения.

Разрешающая способность метода, основанного на оценке эффекта поглощения, недостаточно высока, поэтому этот метод в электронной микроскопии применяется редко.

## **2 Оценка разрешающей способности метода измерения профиля поверхности объекта сканированием электронным пучком**

Выше отмечено, что любая система визуализации характеризуется контрастом (контрастной чувствительностью) и разрешающей способностью (пространственным разрешением). Не является исключением сканирующий электронный микроскоп и любая система визуализации структуры поверхности (приповерхностного слоя) объекта на основе сканирования её узким пучком ускоренных электронов.

Разрешающая способность анализируемых систем ограничивается снизу рядом физических и технических факторов, характеризующих степень отклонения реальной реализации метода измерения от идеальной модели. Выше подчёркнуто, что в идеальной модели метода формирования специфических цифровых радиографических (электронных) изображений источник излучения является монохроматическим и точечным моно направленным. Идеальный детектор состоит из множества точек. Исходя из этого, среди упомянутых факторов, влияющих (снижающих) на разрешающую способность анализируемых систем, можно выделить следующие:

- форму сечения и характерные размеры фокусного пятна (излучающей поверхности) электронного пучка;
- пространственно-угловое распределение интенсивности (потока) электронного пучка;
- пространственно-энергетическим распределением интенсивности (потока) электронного пучка;
- размер апертуры единичного детектора (формирующего один пиксель цифрового изображения);
- контраст изображения локальной неоднородностью поверхности объекта (траектория будущего сварного шва) с учётом параметром детектирующей электроны системы;
- форма и размеры области интереса на поверхности объекта исследования;

– материал объекта исследований.

Следует отметить, что форма и характерные размеры пучка электронов определяются конструктивными особенностями анализируемых систем и качеством производственной реализации технических решений. Принято считать, что форма фокусного пятна электронного микроскопа близка к кругу. Диаметр отмеченного круга для лучших образцов микроскопов не превосходит 10 нанометров, что является залогом создания необходимого уровня плотности энергии на поверхности испытуемого объекта.

## 2.1 Связь радиационного контраста и пространственного разрешения

Термин радиационный контраст применяется в радиационных методах контроля и означает отношение величины цифрового сигнала, вызванного локальной неоднородностью объекта, к уровню цифрового сигнала окружающего фона. Для рассматриваемого случая на величину радиационного контраста оказывает влияние энергия первичных электронов, эффективный атомный номер и плотность материала объекта, размеры и материал локальной неоднородности, поперечные размеры апертуры детектора, степень близости детектора к «детектору полного поглощения».

Применительно к исследуемой задаче локальными неоднородностями являются неровности поверхности объекта.

Связь радиационного контраста и пространственного разрешения заключается в следующем – если размеры неровности поверхности объекта в направлении просвечивания малы, то радиационный контраст, вызванный этой неровностью, близок к нулю и в этом случае нет необходимости рассуждать о пространственном разрешении. С оценкой разрешающей способности и радиационного контраста связано и недостаточное количество регистрируемых электронов. Если число электронов мало, то изображение локальной неоднородности (неровности поверхности) зашумлено настолько, что невозможно обнаружить эту неоднородность и невозможно сделать заключение о множественности этих неоднородностей. Для выявления локальной неоднородности в радиационной дефектоскопии используют правило трёх сигм. Это правило гласит: если отношение сигнал/шум больше трёх, то вероятность выявления неоднородности превышает

99,725 %. Для отдельного выявления двух неоднородностей необходимо, чтобы ОСШ для пиков, вызванных неоднородностями, и седла между ними превышало некий уровень, например, 3. Повышение ОСШ достигается повышением регистрируемых частиц, в нашем случае – электронов, что эквивалентно повышению тока электронного пучка, что чревато ухудшением пространственного разрешения, связанным с уширением пучка электронов.

Для иллюстрации проиллюстрируем сказанное выше на примере сигналов с электронных микроскопов.

## 2.2 Вид принимаемых сигналов в электронной микроскопии

Для оценки разрешающей способности и (или) контрастной чувствительности применяются специальные тестовые объекты, представляющие собой шаговые либо периодические неровности на «идеальной» поверхности. По своей сути, эти тестовые объекты абсолютно эквивалентны проволочным и канавочным эталонам для оценки пространственного разрешения и чувствительности в цифровой радиографии (рентгенографии). Шаговый тестовый объект характеризуется расстоянием между неровностями и их высотой. На рисунке 2 приведены изображение шагового тестового объекта BCR-97A/G-7 с шагом 400 нанометров и соответствующие сигналы для электронного микроскопа Stereoscan 360 FE.

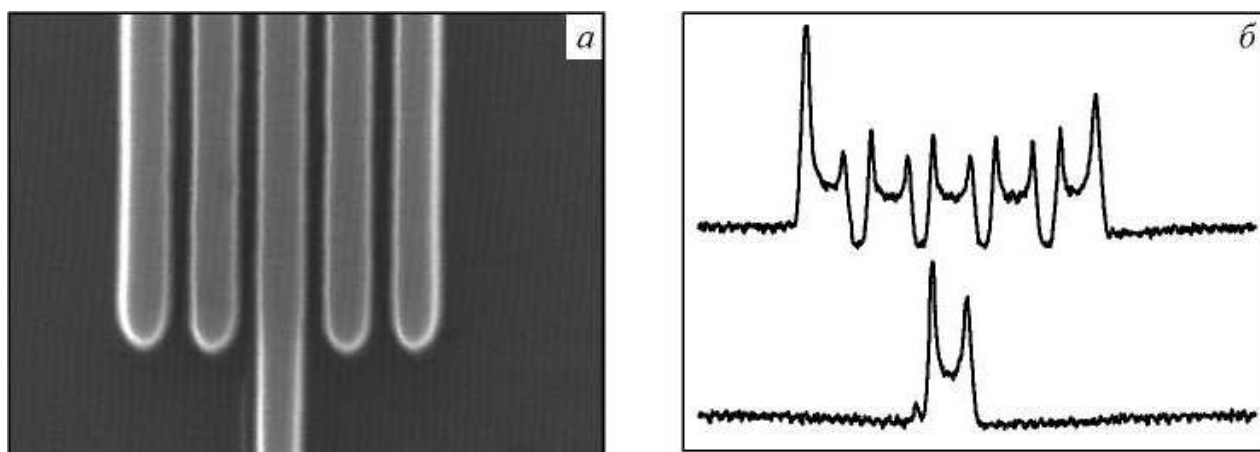


Рисунок 2. Изображение тестового объекта BCR-97A/G-7 (а) и сигналы (б) для него.

Приведённые на рис. 2.а сигналы иллюстрируют некоторые сложности с оценкой разрешающей способности, вызванные наличием шумов.

## 2.3 Перспективы развития систем сканирования поверхности электронным пучком

Развитие систем сканирования поверхности электронным пучком имеет своей целью повышение качества измерений (например, отслеживание траектории сварного шва), которое невозможно без совершенствования технических решений, связанных с формированием цифровых радиографических (электронных) изображений, и разработки новых и модернизации известных цифровых алгоритмов их обработки.

### *2.3.1 Совершенствование технических решений применительно к формированию электронных изображений*

Последние два десятилетия характеризуются бурным ростом промышленной и научной сенсорики. На рынке научного и промышленного оборудования появились разнообразные регистраторы ионизирующих излучений, в том числе и электронов. Вместе с традиционно используемыми комбинированными детекторами (сцинтиллятор + оптическая цифровая система) применяются и детекторы прямого действия. Особые изменения коснулись цифровых оптических систем. В результате улучшились технические характеристики рассматриваемых систем. Дополнительные положительные моменты применительно к анализируемым системам связаны с развитием промышленной робототехники и микрокомпьютеров.

### *2.3.2 Совершенствование методов и алгоритмов обработки цифровых электронных изображений*

Одновременно с совершенствованием технических решений применительно к рассматриваемой задаче совершенствовались методы, алгоритмы и реализующие их программы для цифровой обработки формируемых изображений.

Совершенствование методов и алгоритмов обработки цифровых электронных изображений проходило по двум основным направлениям. Первое из них можно назвать классическим или традиционным, оно связано с обработкой любых изображений (оптических, рентгеновских, инфракрасных, ультразвуковых и т.п.) без привязки к соответствующему физическому полю. Второе же направление является

до сих пор новым и связано с привлечением в рассматриваемую область знания методов и алгоритмов вычислительной томографии, позволяющих исследовать внутреннее «содержание» объекта исследований, например, о пространственном распределении плотности.

С первым направлением связаны алгоритмы: контрастирования; повышения резкости изображения; устранения фоновых помех; фильтрации фильтрами низких, промежуточных высоких частот; сегментации; подавления помех; устранения систематических искажений; измерения расстояний и площадей. Приведённый список не является исчерпывающим.

Кратко опишем второе направление. Электронные изображения, полученные при вариации углов между осями пучка и детекторов, можно интерпретировать как набор некоторых двумерных проекций. Математические методы позволяют восстановить по достаточному набору двухмерных проекций можно восстановить информацию по внутренней структуре объекта исследований. Одной из известных характеристик систем формирования изображений (систем визуализации) является функция рассеяния точки (ФРТ)  $h$ . ФРТ представляет собой реакцию исследуемой системы на возмущающее воздействие единичной амплитуды –  $\delta$  функцию. Применительно к системам визуализации – реакция на точечный источник (для нашего случая – точечная непрозрачная для радиации локальная неоднородность).

Проиллюстрируем аппарат применения ФРТ. Пусть мы имеем идеальное двумерное изображение объекта  $\mathbf{F}$ , тогда реальное изображение объекта  $\mathbf{F}_R$  описывается выражением

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F} \otimes \mathbf{h} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

здесь символ  $\otimes$  – двумерная свёртка;  $\mathbf{n}$  – матрица шумов (изображение фона).

На первом этапе методами калибровки из правой части уравнения (1) устраняется шумовое изображение (калибровка по фону), а для решения оставшегося уравнения применяется широко известное свойство преобразования Фурье. Отмеченное свойство гласит – преобразование Фурье от свёртки равняется произведению Фурье преобразований сворачиваемых функций. Функция  $h$  является известной. На втором этапе находится преобразование Фурье от реального

изображения, откалиброванного по фону. На третьем этапе полученное изображение делится на Фурье преобразование функции  $h$ . На четвертом этапе к полученной функции применяется обратное преобразование Фурье. Результатом четвертого этапа является оценка идеального изображения.

На качество восстановленного (идеального) изображения существенно влияет точность оценки ФРТ.

Следует отметить, что на точность оценки ФРИ на стадии калибровок влияет ряд негативных факторов. Среди которых выделяют несовершенство или флуктуации геометрических параметров пучка электронов, к которым относят размеры фокусного пятна сходимости (расходимости) пучка. На точность измерения ФРТ также влияет скапливание заряда и вибрация установки.

Для растровых электронных микроскопов необходимо получение функции рассеяния точки в каждой точке растра.

### 3 Детектор электронов

#### 3.1 Детектор вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли (SE)

Детектор вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли – это детектор, который входит в стандартную комплектацию любого СЭМ. С помощью этого детектора собираются изображения, передающие рельеф поверхности образца, так как сигнал вторичных электронов очень чувствителен к топографии поверхности. Вторичные электроны (SE, secondary electrons) — это электроны, которые оказались выбитыми из образца первичным электронным пучком. Вторичные электроны имеют малую энергию (<50 эВ), поэтому мельчайшие препятствия, встретившиеся на пути вторичных электронов, поглощают их, откуда и проистекает чувствительность сигнала вторичных электронов к рельефу поверхности.

На рисунке 3 показаны внешний вид и внутреннее устройство детектора вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли.

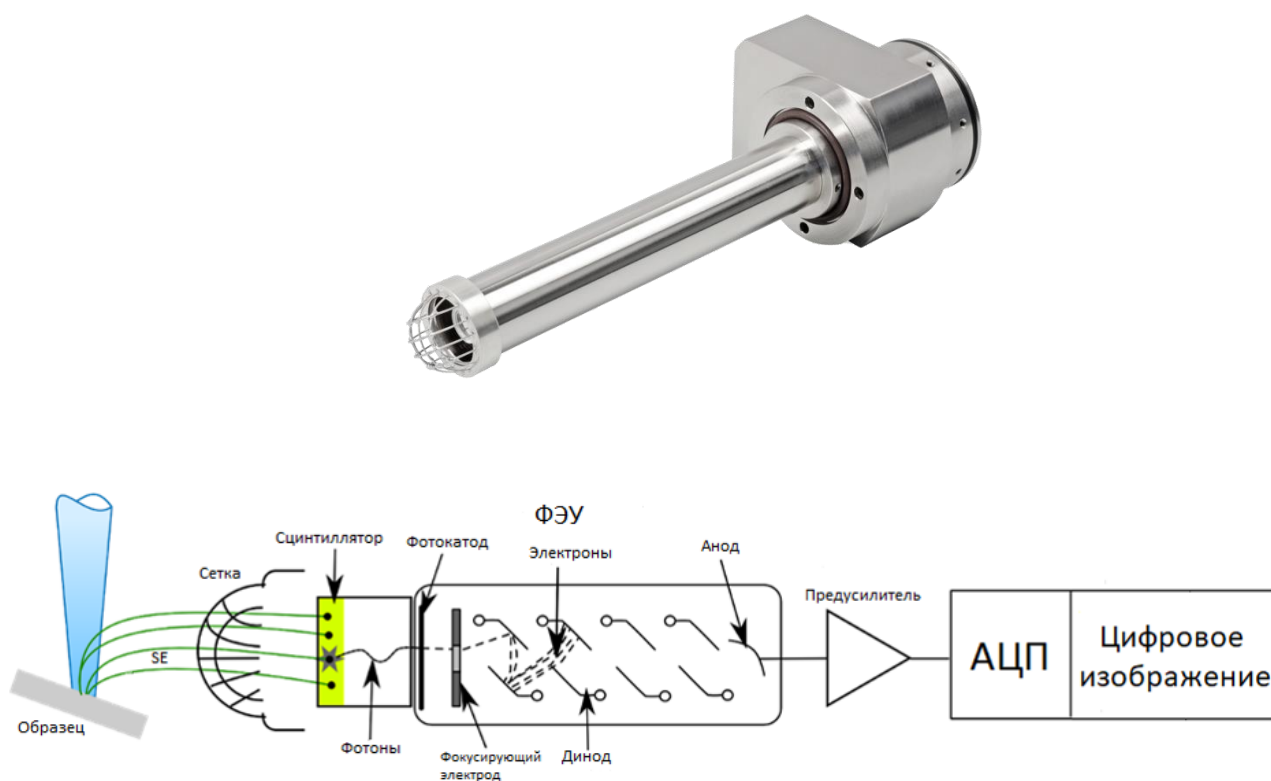


Рисунок 3. Внешний вид и внутреннее устройство детектора вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли

На металлическую сетку (коллектор) подается небольшой положительный потенциал  $\sim +270$  В, который притягивает SE-электроны. На высокоэнергетические



первичные и отраженные электроны этот потенциал существенного влияния не оказывает. Энергия вторичных электронов слишком мала, чтобы возбудить свечение сцинтиллятора, расположенного внутри SE-детектора, поэтому на пути между сеткой и сцинтиллятором SE-электроны разгоняются высоким напряжением  $\sim 10$  кВ, поданным на алюминиевую плёнку, покрывающую сцинтиллятор. В результате такого воздействия электроны ускоряются и приобретают энергию достаточную для того, чтобы при взаимодействии электронов с материалом сцинтиллятора привести к образованию световых фотонов, которые регистрируются фото-приёмным устройством с преобразованием световой энергии в электрическую с последующей трансформацией в АЦП аналогового сигнала в цифровой сигнал (ЦС). Величина ЦС и яркость соответствующего пикселя цифрового изображения зависит от профиля поверхности в точке прицеливания электронного луча.

Свойства цифровых электронных изображений:

электронные изображения характеризуют превышение (занижение) текущей точки прицеливания луча относительно ближайшего фона, иногда такой контраст называется топографическим;

топографический контраст в сканирующей электронной микроскопии выше от выступов внешней поверхности изделия, что обусловлено отсутствием дополнительного ослабления потока электронов с указанных участков материнским (основным) материалом изделия;

пространственное разрешение сканирующего электронного микроскопа наилучшее при регистрации изображений именно во вторичных электронах;

детектор вторичных электронов доминирует в тех приложениях, где изучаются рельефные объекты (не шлифы), например, в биологии, фрактографии, аддитивных технологиях и во многих других сферах;

эффективность сбора SE-электронов детектором Эверхарта-Торнли велика, потому что этот детектор собирает не только те SE-электроны, что оказались направленными в сторону детектора Эверхарта-Торнли, но и те SE-электроны, которые изначально вылетели из образца в другую сторону, но изменили свои траектории благодаря притягивающей сетке. Для сравнения, BSE-детектор собирает

только тот полезный сигнал, угол рассеяния которого пришёлся в телесный угол сбора BSE-детектора. Благодаря эффективному сбору полезного сигнала изображение, собираемое детектором Эверхарта-Торнли, остаётся ярким почти при всех положениях столика образцов: перемещайте столик по оси Z в широких пределах, наклоняйте его в разные стороны на большие углы — детектор Эверхарта-Торнли от этого не потеряет своей способности накапливать SE-сигнал.

### 3.2 Регистратор электронов для работы в режиме низкого вакуума (LVSTD)

Детектор LVSTD (Low Vacuum Secondary Tescan Detector) – это детектор вторичных электронов, разработанный для изучения топографии поверхности непроводящих электрический ток образцов без специального токопроводящего покрытия в режиме низкого вакуума. Детектор также подходит для изучения поверхности пористых и влагосодержащих образцов.

Детектор LVSTD (рисунок 4) конструктивно похож на стандартный детектор вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли.

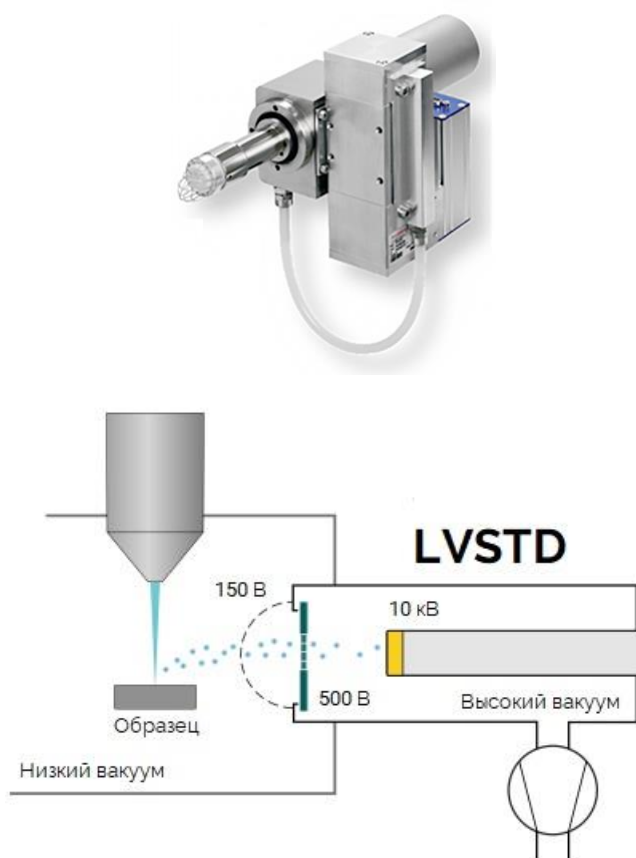


Рисунок 4. Внешний вид (слева) и внутреннее устройство (справа) детектора вторичных электронов для низкого вакуума LVSTD

Различие детекторов заключается в том, что этот детектор Эверхарта-Торнли находится в камере образцов в обособленном пространстве, внутри которого высокий вакуум создаётся откачкой дополнительным небольшим турбомолекулярным насосом. Остальное пространство камеры находится в низком вакууме, поскольку используется режим низкого вакуума. Область с высоким вакуумом отделена от области с низким вакуумом тонкой мембраной, прозрачной для вторичных электронов. Примечание: детектор Эверхарта-Торнли в своём классическом исполнении не функционирует в режиме низкого вакуума, поэтому, чтобы не терять топографический контраст в низком вакууме, был разработан детектор LVSTD.

### 3.3 Детекторы обратно отражённых электронов (BSE)

Детектор обратно отражённых электронов (BSE, backscatteredelectrons) служит для наблюдения композиционного контраста. Другой перевод названия детектора BSE — детектор обратно рассеянных электронов.

Отражённые электроны — это та часть первичного электронного пучка, которая упруго отразилась от поверхности образца. Свойство материала отражать от себя электроны меняется в зависимости от атомного номера, поэтому BSE-изображения позволяют визуализировать разницу в среднем атомном номере между компонентами образца. Более того, известно, что чем светлее выглядит объект на BSE-изображении, тем выше его средний атомный номер. Поэтому если вы, например, на BSE-снимках видите светлые включения в более тёмной матрице, то вы понимаете, что включения состоят из чего-то более тяжёлого, чем матрица.

Поскольку первичный электронный пучок направлен сверху вниз, а поверхность образца обычно расположена в камере СЭМ горизонтально, то оказывается, что отражённые электроны распространяются в основном обратно вверх, к полюсному наконечнику электронной колонны. Поэтому именно там, под объективом, и располагается внутрикамерный BSE-детектор, когда находится в своём рабочем положении. Детектор отражённых электронов, в отличие от детектора вторичных электронов, не имеет притягивающей сетки, так как не нуждается в ней. Энергия BSE-электронов примерно равна энергии электронов первичного пучка

(обычно энергию первичного пучка выбирают в диапазоне 10 – 20 кэВ), т.е. энергия BSE-электронов достаточно велика для того, чтобы BSE-электроны смогли долететь до BSE-детектора без дополнительного стимулирования в виде притягивающей сетки.

Свойства изображений в отражённых электронах:

BSE-изображения — это изображения прежде всего с композиционным контрастом. Иногда, при правильной подготовке шлифов, можно добиться ориентационного контраста;

чем светлее вещество на BSE-снимке, тем оно тяжелее;

BSE-детектор обычно используется вместе с WDS- или EDS-спектрометром для рентгеноспектрального микроанализа. Детектор BSE позволяет визуализировать микрочастицы или микровключения, отличающиеся составом от окружения, а детектор EDS позволяет этот состав определить;

пространственное разрешение BSE-изображений несколько хуже, чем SE-изображений, потому что область выхода из образца BSE-сигнала чуть шире, чем область выхода SE-сигнала;

детектор отражённых электронов доминирует в тех приложениях, где изучаются образцы с полированной поверхностью, прежде всего это материаловедение, геология и минералогия;

BSE-детектор собирает только те отражённые электроны, которые после рассеяния от поверхности образца попали в конус, образованный телесным углом детектирующего элемента BSE-детектора. Поэтому чем дальше образец отодвинут от BSE-детектора, тем тусклее BSE-изображение, так как телесный угол сбора сигнала уменьшается.

Компания TESCAN предлагает BSE-детекторы двух типов — сцинтилляционные и полупроводниковые.

Сцинтилляционные BSE-детекторы.

На рисунке 5 показаны фотография детектора обратно отражённых электронов сцинтилляционного типа и фотография его сцинтиллятора, которым является синтетический высокочувствительный YAG-кристалл. Кольцеобразный

YAG-монокристалл с токопроводящим покрытием располагают на оптической оси микроскопа под объективом, отверстие в кольце нужно для прохождения первичного электронного пучка. Попав на сцинтиллятор BSE-детектора, отражённые электроны вызывают в сцинтилляторе вспышку света, которая по световоду направляется в фотоумножитель и регистрируется там.

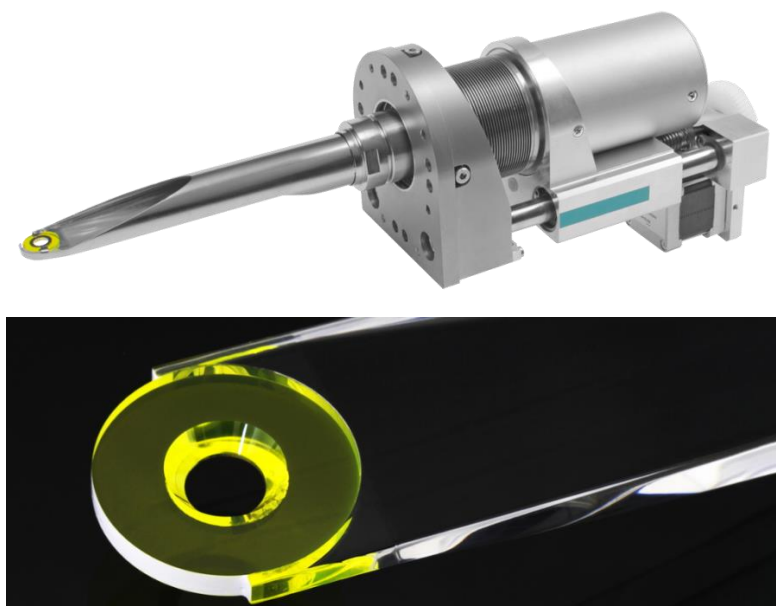


Рисунок 5. Внешний вид детектора обратно отражённых электронов сцинтилляционного типа и фотография сцинтиллятора, который является детектирующим элементом

Варианты исполнения BSE-детектора сцинтилляционного типа:

BSE-детектор может быть фиксированным под полюсным наконечником объективной линзы либо выдвижным/выдвигаемым. Последний лучше, так как выдвижной механизм дает возможность убирать BSE-детектор из-под объектива в случае, если этот детектор не используется, что позволяет работать с другими детекторами при меньших рабочих расстояниях;

Если BSE-детектор оснащён механизмом выдвижения/выдвижения, то этот механизм может быть моторизованным или ручным. Моторизованный управляется кнопкой из программного обеспечения;

Сцинтилляционный BSE-детектор типа LowEnergy (LE BSE), является чувствительным и в области малых энергий первичного пучка. Детектор LE BSE способен регистрировать BSE-изображения начиная от энергии первичного пучка 0,2 кэВ (для обычного BSE этот порог составляет  $\sim 3$  кэВ). Подробнее см. ниже.

Сцинтилляционный BSE-детектор с алюминиевым покрытием, что нужно для совместного одновременного накопления BSE-изображений и катодоллюминесцентных изображений с помощью компактной версии CL-детектора. Алюминиевое покрытие нужно для того, чтобы свечение сцинтиллятора BSE-детектора не мешало бы катодоллюминесцентному детектору;

Сцинтилляционный BSE-детектор с водяным охлаждением, который разработан для совместного применения со столиками, позволяющими разогревать образец до высоких температур. Стандартный BSE-детектор при высоких температурах мог бы повредиться, а охлаждаемый может работать благодаря автоматической системе охлаждения с циркуляцией воды. Этот же BSE-детектор служит защитным экраном, защищающим электронно-оптическую колонну от теплового излучения, идущего от нагреваемого столика образцов.

#### 3.4 Полупроводниковый BSE-детектор (LE 4Q-BSE)

Четырёхсегментный полупроводниковый детектор отражённых электронов также, как и детектор сцинтилляционного типа, располагается под полюсным наконечником объективной линзы и имеет ручной либо моторизованный механизм выдвижения/выдвижения. Детектор LE 4Q-BSE и состоит из 4 диодов, которые симметрично окружают центральное отверстие, сделанное для прохода первичного электронного пучка. Все четыре диода имеют одинаковую форму и площадь и называются квадрантами. Чтобы различать квадранты, они пронумерованы по часовой стрелке и отмечены как Q1, Q2, Q3, Q4.

LE 4Q-BSE детектор позволяет получать изображения как с композиционным, так и с топографическим контрастом. Это зависит от того, каким образом микшируется сигнал от каждого из квадрантов (сигналы диодов складываются или вычитаются). Предлагается четыре режима работы детектора LE 4Q-BSE:

СОМРО (композиционный контраст): сложение сигналов от всех четырех квадрантов ( $Q1 + Q2 + Q3 + Q4$ ). Эта комбинация скрывает топографическую часть сигнала и усиливает композиционную

ТОРО (топографический контраст): сложение сигналов от двух соседних квадрантов и вычитание сигналов от двух других квадрантов ( $Q1+Q2-Q3-Q4$ ). В этом

случае композиционный контраст, который является одинаковым для каждого квадранта, вычитается, и остается только топографический контраст

CUSTOM: в этом режиме пользователь может складывать, инвертировать или отключать сигнал любого квадранта, чтобы выделить необходимую информацию .

COLOR: специальный режим псевдоокрашивания, разработанный TESCAN, в котором сигналу от каждого квадранта назначается цвет из цветовой модели HSV, в которой координатами цвета являются тон, насыщенность и яркость . Итоговое цветное изображение HSV создается путем сложения сигналов от всех четырех квадрантов в соответствии с их цветом. Этот подход гарантирует, что ни композиционный, ни топографический контраст не будет потерян.

У детектора LE 4Q-BSE детектирующим элементом является не сцинтиллятор, а полупроводниковый диод, поступление BSE-электронов в который вызывает не вспышку света (как в случае сцинтиллятора), а появление электрон-дырочных пар. На полупроводниковый диод приходит запирающее напряжение. Слой полупроводника вблизи границы p-n-перехода обладает высоким удельным электросопротивлением. При взаимодействии электронов с полупроводником образуются электронно-дырочные пары. К обособленному полупроводниковому детектору прикладывается необходимая разность потенциалов с целью эффективного сбора всех электрических зарядов, возникающих при взаимодействии электронов с материалом ППД. В результате воздействия электрического поля образованные заряды перемещаются к соответствующим электродам. Собранный электрический заряд трансформируется в электрический сигнал с последующим его усилением и преобразованием в цифровой сигнал.

Полупроводниковый BSE-детектор, в отличие от сцинтилляционного, можно разбить на квадранты, что даёт дополнительные приёмы формирования электронных изображений (см. выше). Но при этом полупроводниковый BSE медленнее реагирует на входной сигнал, чем сцинтилляционный BSE, т.е. показывает более шумные картинки при быстрых скоростях сканирования. И, в отличие от сцинтилляционного BSE, полупроводниковый BSE не может одновременно работать с включённой инфракрасной подсветкой камеры образцов.

На заметку: преимущества сцинтилляционного BSE-детектора типа LowEnergy (LE-BSE)

Детектор LE-BSE позволяет с высокой чувствительностью и достаточным отношением сигнал/шум регистрировать обратно отражённые электроны при работе с низкими энергиями первичного электронного пучка. Сцинтилляционный кристалл со специальной обработкой поверхности обеспечивает повышенную чувствительность детектора LE-BSE при работе с ускоряющим напряжением (HV)  $\geq 0.2$  кВ (для обычного BSE этот порог чувствительности составляет  $\sim 3$  кВ). При этом в области традиционно используемых средних и высоких HV чувствительность детектора LE-BSE ничуть не уступает чувствительности обычного сцинтилляционного BSE.

При получении изображений во вторичных электронах таких непроводящих материалов, как керамика, полимеры, стекло наблюдаются сильные артефакты зарядки. Накопить изображения этих проблемных для СЭМ материалов удаётся при низких ускоряющих напряжениях и с использованием детектора LE-BSE.

### 3.5 Катодолюминесцентные детекторы (CL)

Детектор катодолюминесцентного излучения используется для изучения люминесцентных материалов, испускающих видимый свет при облучении их пучком электронов.

Компания TESCAN выпускает следующие виды CL-детекторов:

Панхроматический CL-детектор со спектральным диапазоном 350 – 650 нм;

Панхроматический CL-детектор с расширенным спектральным диапазоном 185 – 850 нм;

Цветной CL-детектор Rainbow CL со спектральным диапазоном 350 – 850 нм.

Каждый из вышеперечисленных CL-детекторов может быть компактным либо полновесным. Полновесные CL-детекторы имеют либо моторизованное устройство выдвижения/выдвижения, либо ручное. Компактные CL-детекторы имеют ручное устройство выдвижения/выдвижения. В компактном варианте CL-детектор не имеет параболического зеркала, что снижает его чувствительность. Однако в этом случае нет конфликта между CL-детектором и BSE-детектором за место под



полюсным наконечником объективной линзы, поэтому CL- и BSE-снимки могут накапливаться одновременно. В полновесном варианте CL-детектор имеет параболическое зеркало и становится более чувствительным, но под пучок электронов в каждый момент времени можно вдвинуть либо BSE-детектор, либо CL-детектор с его массивным параболическим зеркалом, поэтому BSE- и CL-снимки можно собирать лишь последовательно. Параболическое зеркало позволяет собирать видимый свет с большого телесного угла и направлять его в световод. Чем шире телесный угол сбора, тем выше чувствительность CL-детектора. Однако слишком большой телесный угол означает слишком громоздкую конструкцию CL-детектора, что будет ограничивать размещение других устройств на камере SEM, поэтому разработчики CL-детекторов ищут компромиссы.

Панхроматический CL-детектор собирает суммарную интенсивность светового сигнала во всём своём спектральном диапазоне. Цветной CL-детектор имеет четыре канала: R-, G-, B-каналы и панхроматический канал. Перед каждым каналом установлен свой фильтр, пропускающий дальше в канал лишь определённую часть спектрального диапазона CL-излучения.

На рисунке 6 приведена поясняющая схема к вопросу о формировании катодоллюминесцентного излучения: благодаря воздействию первичного электронного пучка электрон твёрдого тела перешёл из валентной зоны в зону проводимости, при последующей рекомбинации этого электрона обратно в валентную зону генерируется фотон видимого света (CL-излучение). Энергия фотона (а значит и оттенок CL-излучения) меняется при появлении донорных и акцепторных подуровней.

Рассмотрим принцип работы катодоллюминесцентного детектора. Катодоллюминесценция — это способность образца испускать видимый свет при облучении его пучком электронов. Принцип формирования катодоллюминесцентного излучения удобно объяснять с помощью зонной теории твёрдого тела. В металлах всегда есть свободные электроны. В полупроводниках таких свободных электронов значительно меньше. Большинство электронов находятся в связанных с атомами состояниях .

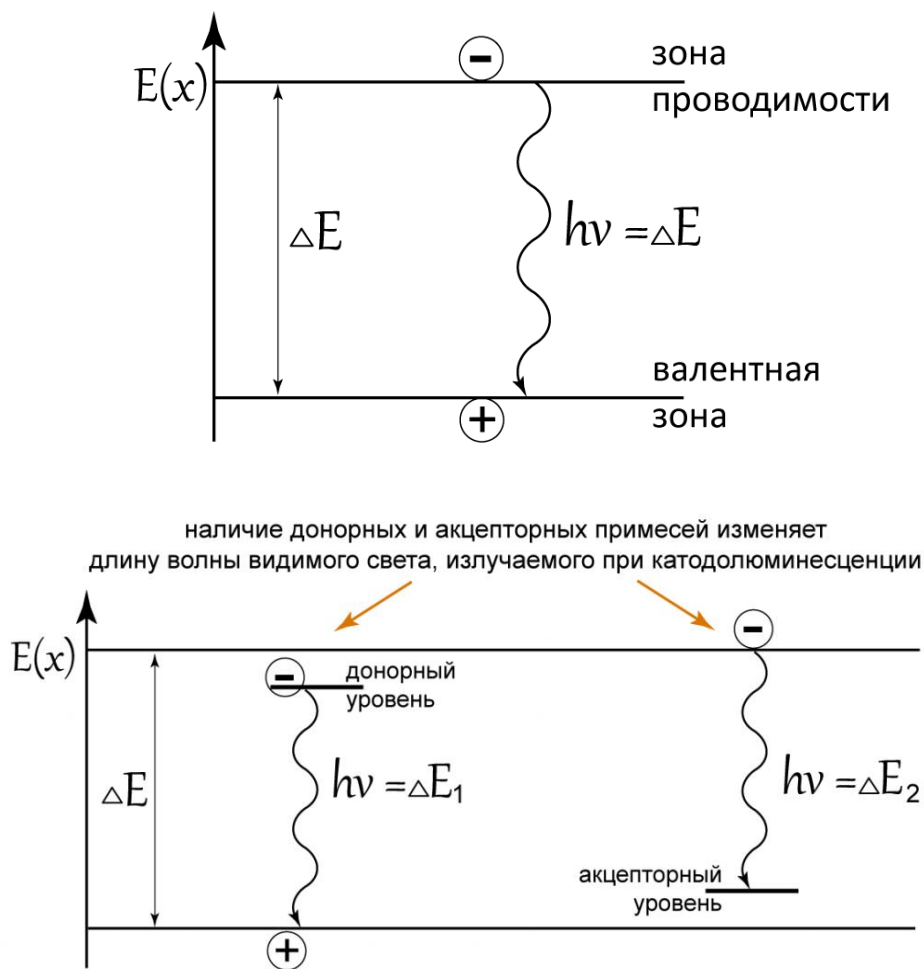


Рисунок 6. Формирование катодолуминесцентного излучения

Чтобы перевести электрон в свободное состояние, в котором он легко перемещается по твердому телу, необходимо передать этому электрону энергию, называемой энергией активации. Эта добавочная энергия передается при сканировании по образцу электронным пучком. Когда электрон переходит из связанного состояния в свободное, то вместо нейтрального атома остается положительный ион – дырка. Происходит процесс генерации электронно-дырочных пар. Однако в полупроводнике постоянно происходит и противоположный процесс, то есть захват освобожденных электронов атомом, потерявшим свой электрон. Этот процесс называют процессом рекомбинации. Указанный процесс сопряжен с выделением избыточной энергии, приводящей к колебаниям кристаллической решетки. В результате отмеченного возбуждения возникает катодолуминесцентное излучение, которое регистрирует CL-детектор. Если вещество имеет донорные или акцепторные примеси, то внутри запрещенной зоны появляются подуровни, и значит

рекомбинация электрона с этих подуровней (на эти подуровни) будет сопровождаться испусканием фотона, энергия которого будет изменена по сравнению с чистым веществом, что отразится на оттенке катодolumинесцентного излучения. Поэтому CL-сигнал интересен тем, что, потенциально, способен менять оттенок при самом незначительном видоизменении вещества (появлении микропримесей, изменении плотности дислокаций). Например, на CL-снимках хорошо видна зональность цирконов (минералов, используемых в геохронологии).

CL-излучение имеет следующие характеристики, которые могут быть детектированы:

Интенсивность светового потока;

Преимущественный цвет излучения (поскольку речь идёт об излучении в видимом диапазоне, то, в отличие от других диапазонов шкалы электромагнитных волн, у CL-излучения есть такая характеристика как цвет);

Спектр CL-излучения, т.е. разложение CL-излучения по длинам волн;

Скорость затухания CL-сигнала, что доступно для наблюдения, если у электронного микроскопа имеется быстро срабатывающий прерыватель пучка (BeamBlaker);

Зависимость формы CL-спектра от тока пучка электронов или от энергии пучка электронов.

В соответствии с этим бывают разные типы CL-детекторов, которые отличаются тем, какую CL-информацию они собирают, а также ценой.

Панхроматический CL-детектор. По ходу движения пучка электронов регистрирует суммарную интенсивность светового потока от каждой точки на поверхности образца. Изображение строится чёрно-белым, где яркость в градациях серого пропорциональна интенсивности светового потока в данном пикселе.

Цветной CL-детектор (Rainbow CL в линейке TESCAN). То же, что панхроматический, только помимо суммарной интенсивности детектирует также такую характеристику как цвет CL-излучения. CL-снимки – это снимки в реальных цветах (настолько, насколько реальным является происходящее в темноте вакуумной камеры микроскопа).

CL-спектрометр, где каждой точке поверхности образца ставится в соответствие CL-спектр, разложенный по длинам волн, а не просто цветной либо чёрно-белый пиксель.

Компания TESCAN выпускает панхроматические и цветные CL-детекторы, а CL-спектрометры – это оборудование стороннего производителя, которое может быть установлено на колонну TESCAN, равно как и на колонны других производителей микроскопов.

### 3.6 Детектор вторичных ионов (SITD)

Детектор вторичных ионов расширяет аналитические возможности двулучевых микроскопов TESCAN FIB-SEM. SITD-детектор позволяет регистрировать положительно заряженные вторичные ионы (SI), генерируемые образцом при облучении образца первичным ионным пучком (поэтому детектор SITD устанавливается только на двулучевые микроскопы FIB-SEM, у которых есть первичный ионный пучок).

Принцип действия детектора вторичных ионов похож на принцип действия хорошо известного детектора вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли с той разницей, что у детектора SITD дополнительно есть так называемый конверсионный электрод (conversionelectrode), ударяясь о который, вторичные ионы генерируют вторичные электроны, а уже вторичные электроны регистрируются детектором, похожим на детектор Эверхарта-Торнли. На колоннах TESCAN FIB-SEM детектор Эверхарта-Торнли и детектор SITD — это два разных устройства, занимающих два разных порта на камере микроскопа (а не одно устройство, которое инвертирует свою работу). Это означает, что изображение с детектора вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли и изображение с детектора SITD могут быть накоплены одновременно.

Сигнал вторичных ионов позволяет получить новый тип контраста. Вторичные ионы испускаются из очень тонкого поверхностного слоя образца, поэтому сигнал вторичных ионов очень чувствителен к поверхностным свойствам образца и этот сигнал тем выше, чем тяжелее материал; за исключением оксидов, так как кислород значительно увеличивает выход вторичных ионов, в результате чего

оксиды на SITD-изображениях становятся очень яркими. Это делает SITD-детектор идеальным инструментом для обнаружения коррозии.

Сигнал вторичных ионов обычно слабее сигнала вторичных электронов, генерируемых первичным ионным пучком, поэтому при работе со STID-детектором необходимо выбирать более длительное время сканирования и более высокие токи зонда, чем при работе с SE-детектором.

Детектор прошедших электронов (HADF R-STEM). Детектор прошедших электронов HADF R-STEM позволяет проводить анализ тонких пленок и ламелей с высокой разрешающей способностью. Исследование образцов методами просвечивающей электронной микроскопии с помощью соответствующего прибора является популярным методом исследований в лабораториях, не имеющих доступа к просвечивающему электронному микроскопу. В комплекте с детектором HADF R-STEM поставляется 8-ми позиционный держатель для TEM-сеточек (рисунок 7).

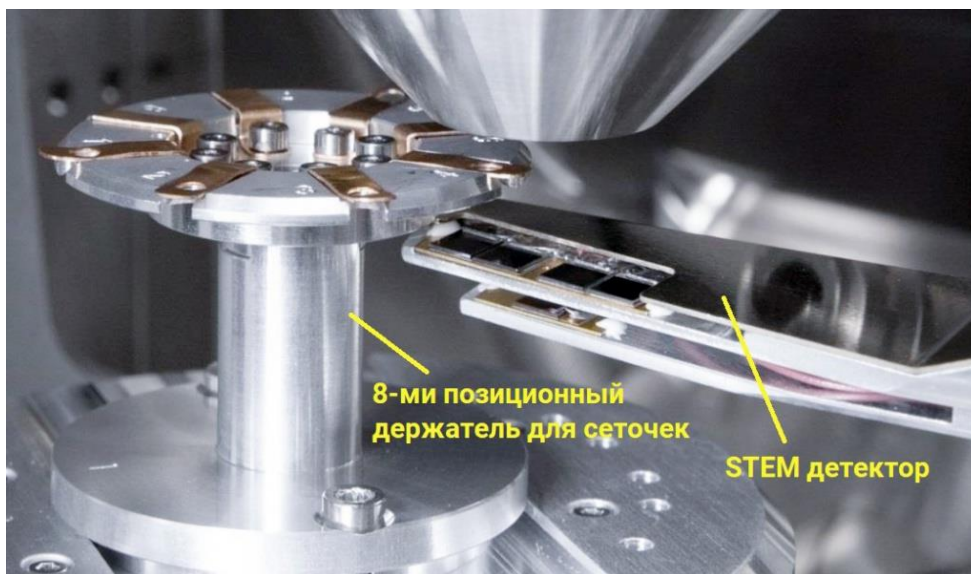


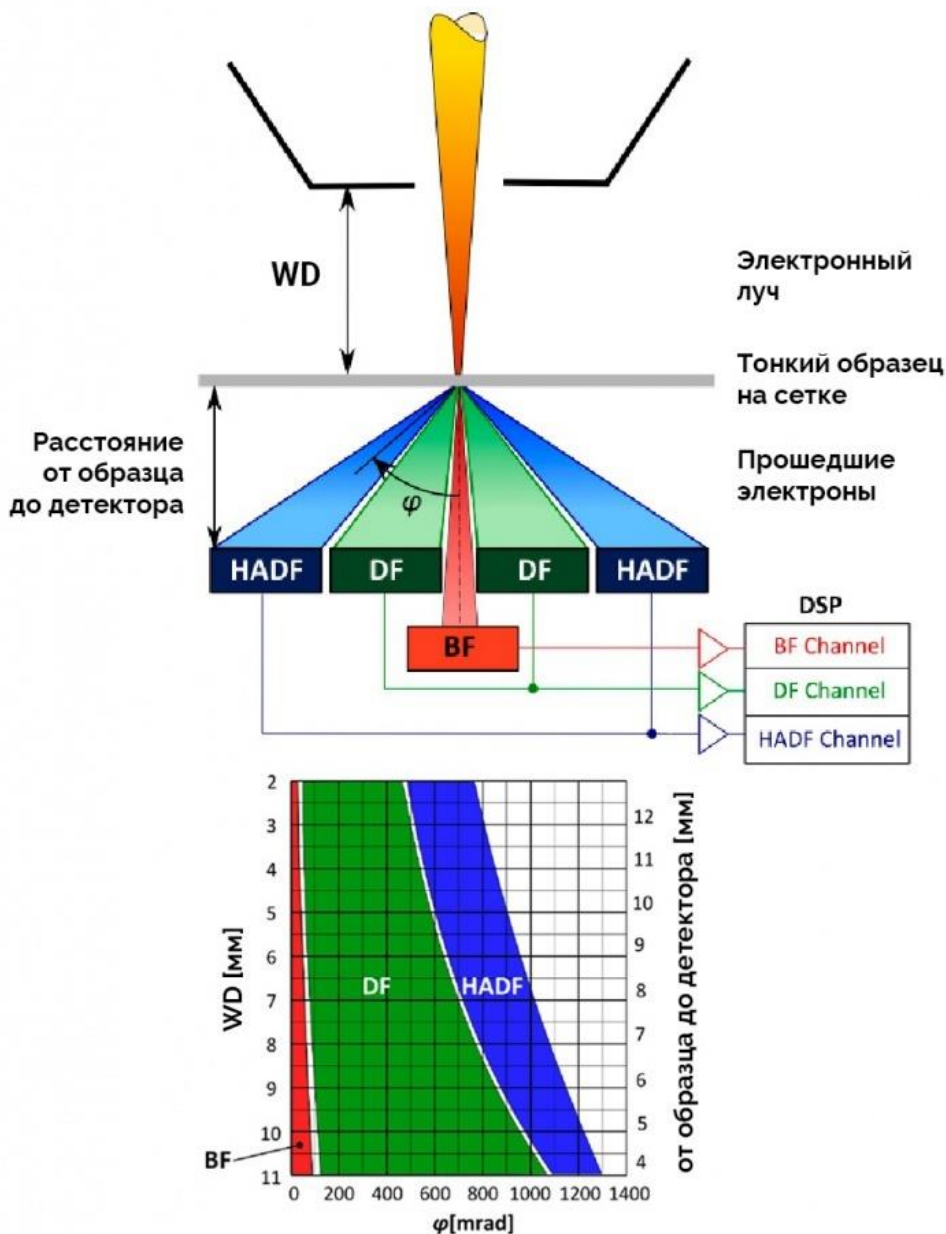
Рисунок 7. Вид внутри камеры образцов СЭМ: 8-ми позиционный держатель для TEM-сеточек и выдвинутой детектор прошедших электронов HADF R-STEM, подведённый под изучаемый в данный момент образец-сеточку

Прошедшие электроны, рассеянные под разными углами, несут разную информацию об исследуемом образце (рисунок 8):

изображение светлого поля (BF, brightfield) передаёт контраст, вызванный разной способностью к поглощению электронов у составляющих, образующих тонкую фольгу; а также контраст дифракции Брэгга;

изображение тёмного поля (DF) содержит частично ориентационный контраст и частично контраст рассеяния от лёгких элементов;

на изображениях высокоуглового тёмного поля (HADF) максимально подчёркивается материальный контраст и минимально — контраст дифракции Брэгга.



The Bright Field - BF; The Dark Field - DF; The High Angle Dark Field - HADF

Рисунок 8. Месторасположение и функционал трёх датчиков детектора прошедших электронов HADF R-STEM: датчика светлого поля (BF, brightfield), датчика тёмного поля (DF, darkfield) и датчика высокоуглового тёмного поля (HADF, highangledarkfield)

Удобно то, что в конструкции детектора HADF R-STEM датчики и держатель с образцом — это не сцепленные друг с другом устройства. Тот факт, что датчики

можно вдвигать под образец и выдвигать, означает, что можно собирать сигнал прошедших через образец электронов и при этом перемещать образец над детектором или наблюдать несколько образцов в карусели, не открывая камеру, или менять WD, на котором находится образец, а датчики при этом не будут смещаться. Углы рассеяния электронов зависят от материала образца, толщины фольги и энергии первичного пучка. Также сегменты детектора получают разные порции рассеянных электронов в зависимости от расстояния от сегмента детектора до образца. Поэтому, когда рабочее расстояние WD, при котором находится образец, меняется, а детектор HADF R-STEM при этом остаётся в фиксированном положении, это влияет на тип сигнала, обнаруживаемого каждым сегментом/каналом. Изменяя WD, можно искать такое положение образца, при котором достигается наилучший контраст.

При получении изображений светлого поля размер апертуры перед BF-датчиком может быть выбран вручную с помощью переключения рычажка на детекторе HADF R-STEM (что делается рукой в перчатке!). Доступны четыре размера апертур: 1 мм, 500 мкм, 300 мкм и 100 мкм. Чем меньше размер апертуры, тем более узкий телесный угол сбора изображений BF и тем, следовательно, лучше контраст при исследовании легких материалов.

Также с помощью детектора HADF R-STEM можно получить изображение в псевдоцветах (ColorSTEM), где BF-каналу соответствует красный цвет, DF-каналу – зеленый, а HADF-каналу – синий. На изображении ColorSTEM есть шанс уловить тонкие вариации свойств материала (небольшие изменения способности материала рассеивать электроны), которые остались бы скрытыми, если бы пользователь расположил перед собой три чёрно-белых изображения с каналов BF, DF и HADF и принялся бы их сравнивать.

## 4 Техническая реализация эксперимента

### 4.1 Устройство растрового электронного микроскопа

Для реализации проекта нам необходимо разобраться в устройстве РЭМ

Схема растрового электронного микроскопа приведена на рисунке 9.

Если рассматривать основные узлы РЭМ, то стандартный РЭМ состоит из следующих основных узлов:

электронной пушки 1–3, эмиттирующей электроны;

электроннооптической системы 4–10, формирующей электронный зонд и обеспечивающей его сканирование на поверхности образца 12;

системы, формирующей изображение 11–17.

РЭМ имеет вакуумную камеру.

Составными частями микроскопа являются механические узлы (шлюзы, гониометрический стол и т. д.), обеспечивающие установку и перемещение образца.

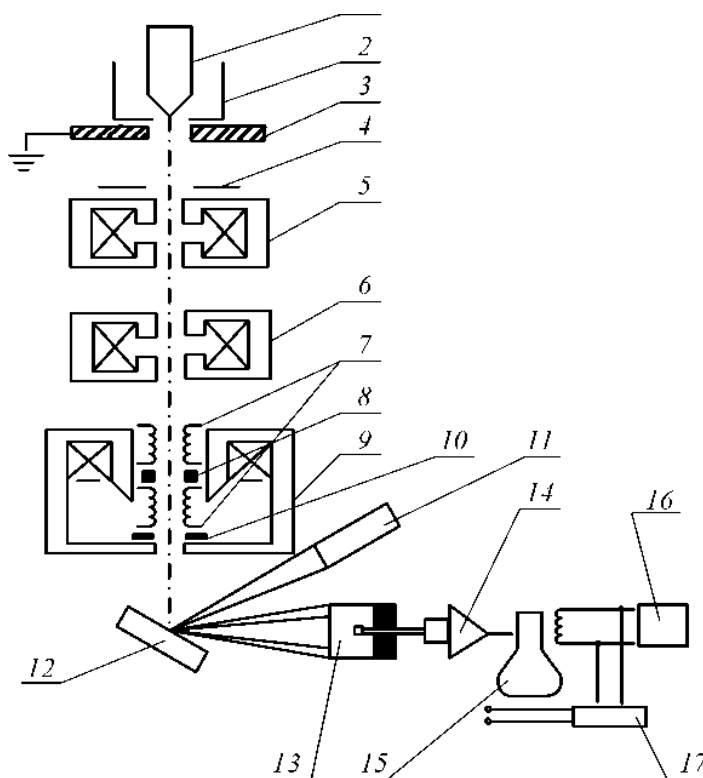


Рисунок 9. Принципиальная схема растрового электронного микроскопа:

- 1 – катод; 2 – цилиндр Венельта; 3 – анод; 4, 10 – диафрагмы;  
5, 6, 9 – электромагнитные линзы; 7 – электромагнитная отклоняющая катушка;  
8 – стигматор; 11 – рентгеновский спектрометр; 12 – образец;  
13 – вторичные электроны; 14 – усилитель; 15 – электронно-лучевая трубка;  
16 – генератор развертки; 17 – блок управления увеличением



## 4.2 Экспериментальная установка электроннолучевой 3D печати

Сравним устройство электроннолучевой пушки, установленной на экспериментальном стенде (рисунок 10), с указанным выше растровым электронным микроскопом.

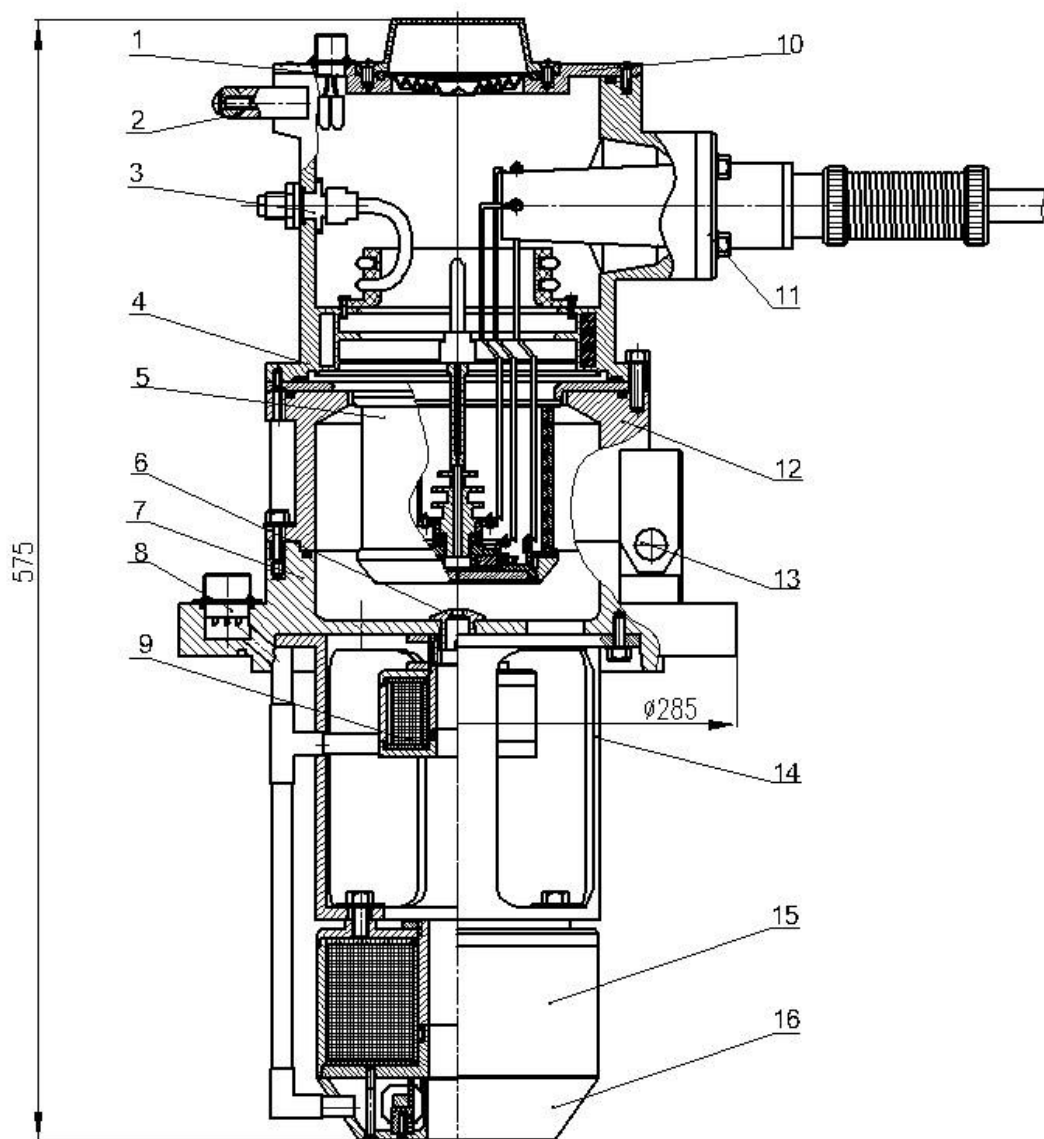


Рисунок 10. Схема источника электронов с плазменным эмиттером:

1 – датчики температуры; 2 – ручка; 3 – газовый ввод; 4 – верхний корпус; 5 – разрядная камера; 6 – ускоряющий электрод (экстрактор); 7 – нижний корпус (фланец источника); 8 – электрический разъем; 9 – дополнительная линза; 10 – составная крышка; 11 – кабельный ввод; 12 – средний корпус; 13 – шарнир; 14 – крепление основной линзы; 15 – основная фокусирующая линза; 16 – система отклонения и развертки пучка.

В результате сравнения схем РЭМ и источника электронов с плазменным эмиттером можно сделать вывод о том, что принцип работы по испусканию и фокусировке электронного пучка одинаковый. Различия заключаются лишь в мощности пучка.

### 4.3 Детектор излучения

Для проведения экспериментов необходимо выбрать детектор излучения.

Для получения изображений, используя информацию о поглощении первичных электронов, необходимо знать величину интегральной энергии первичных электронов, и обобщённую энергию электронов, испытавших упругое и неупругое рассеяние, и, строго говоря, общую энергию первичных электронов, не испытавших взаимодействия с объектом исследования. Цифровые сигналы несут в себе суммарную информацию о поверхности объекта без возможности отдельного учёта сигналов из основной части материала объекта и его поверхностного слоя.

В результате сканирования поверхности объекта испытаний возмущение в цифровой сигнал, вызванное выпуклостью (наростом) или вогнутостью (канавкой), легко обнаруживается достаточно простым регистратором электронов.

В качестве регистратора рассеянных электронов используем стальную пластину площадью  $10^4$  мм<sup>2</sup> с общим сопротивлением, близким к 600 Ом. Пространственное положение стальной пластины выбирается из условия передачи максимума энергии рассеянных от объекта (в объекте) электронов материалу пластины. Энергия электронов, переданная такому простому регистратору, превращается в электрическую энергию с трансформацией аналогового сигнала в цифровой сигнал с последующей его записью в память компьютера. Подобный подход к регистрации сигналов использовался на заре создания первых электронных микроскопов, разумеется, что реализация метода не включала цифровой блок, а запись велась стрелочным регистратором или нестационарный сигнал выводился на экран видеоконтрольного устройства (ВКУ).

### 4.4 Формирование растровых изображений

Совокупность аналоговых сигналов (цифровых сигналов) с регистратора рассеянных электронов представляет собой некоторое виртуальное изображение, которое превращается в реальное после передачи всей информации в аналоговое либо в цифровое видеоконтрольное устройство. Напомним последовательность формирования электронных растровых изображений. Сканирование поверхности

испытуемого объекта тонким пучком ускоренных электронов управляется специальными отклоняющими катушками по некоторой программе, в которой хранится информация о траектории перемещения электронного луча по зоне интереса, принадлежащей поверхности объекта. В рассматриваемом случае сканирование осуществляется по параллельным линиям. В результате описанного сканирования и формируется растровое изображение.

#### 4.5 Тестовый эксперимент

Для начала чтобы понять возможность самого сканирования на экспериментальной электроннолучевой установке проведем предварительный эксперимент.

Возьмем и отсканируем деталь с ярко выраженным рельефом. Например, гайку М16.

Изображение, полученное на установке, представлено на рисунке 11.

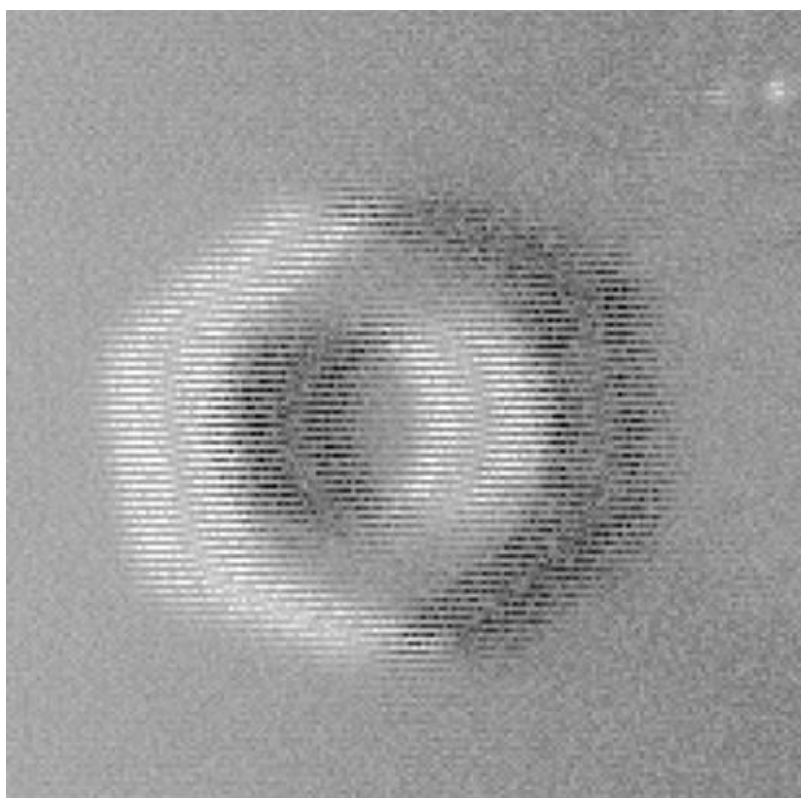


Рисунок 11. Исходное изображение

Анализирую исходное изображение, видно, что в процессе работы сбивается строчная развертка. Это нежелательное явление возможно устранить, для этого достаточно провести корреляционный анализ, что и продемонстрировано на рисунке 12.

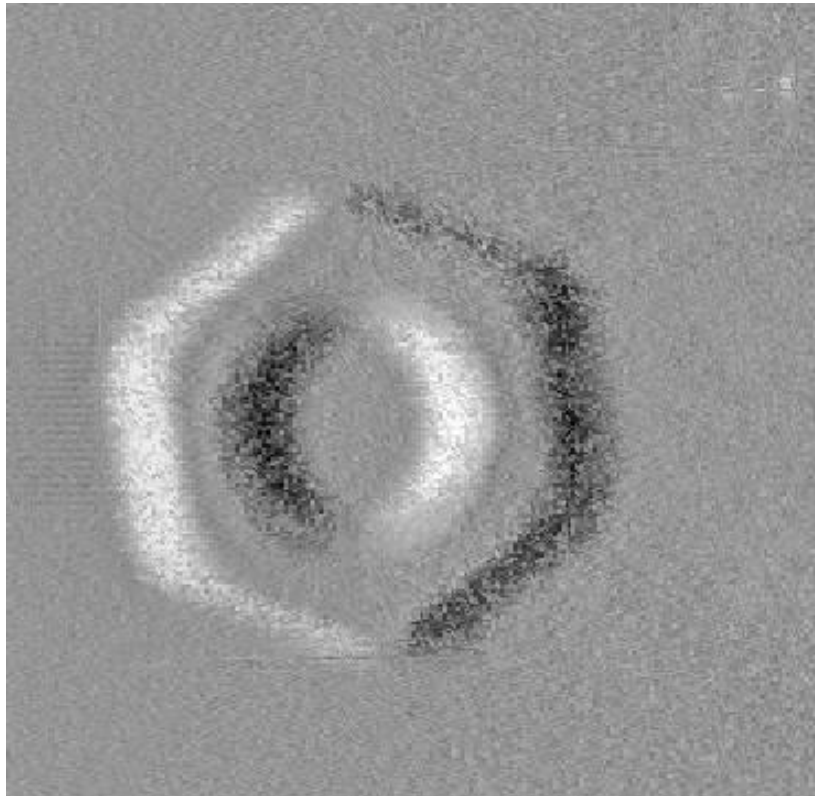


Рисунок 12. Восстановленное изображение

У восстановленного изображения присутствует высокочастотный шум, который возможно удалить. Результаты этой операции приведены на рисунке 13.

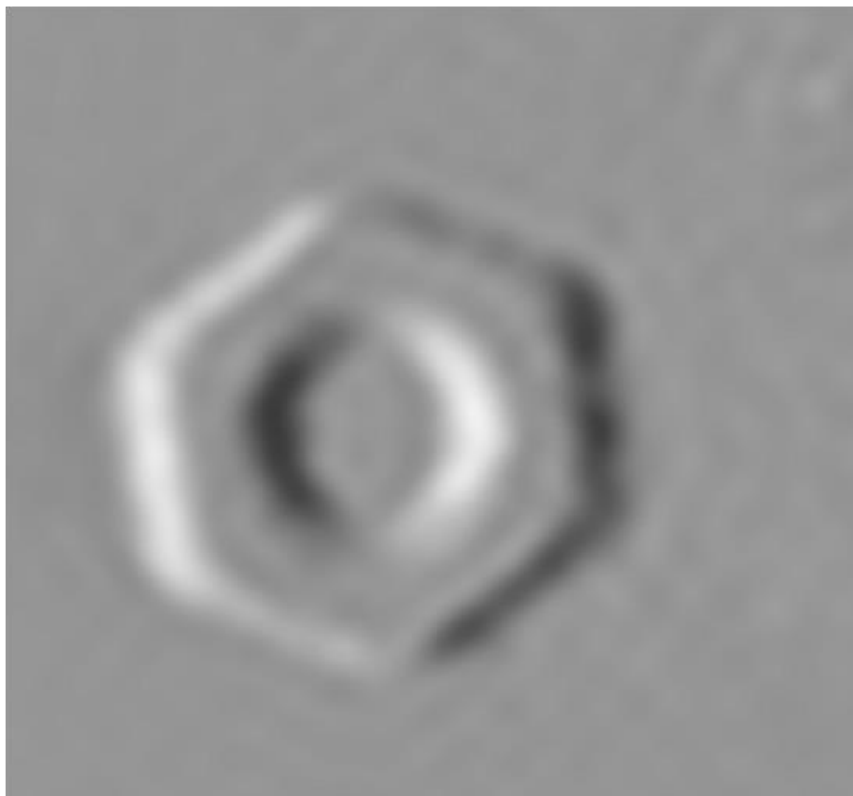


Рисунок 13. Восстановленное изображение, с подавленным высокочастотным шумом.

Для иллюстрации на рисунке 14 соединены исходное изображение и конечный результат.

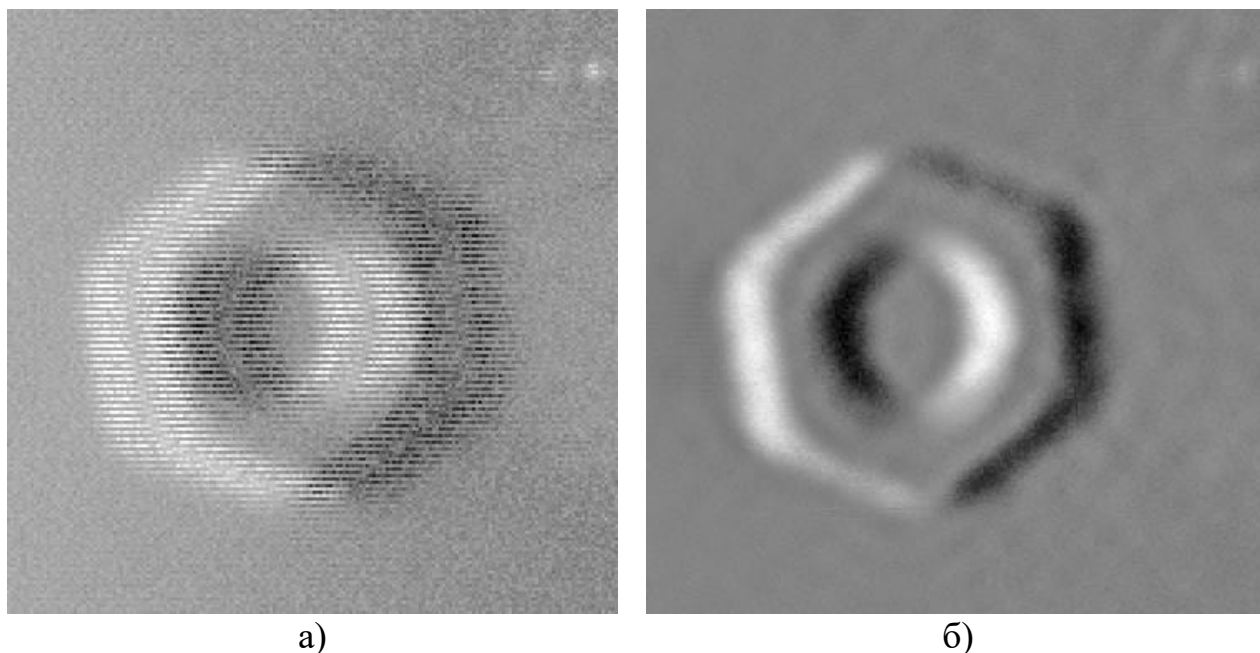


Рисунок 14. Исходное изображение а), и восстановленное изображение б).

Таким образом мы экспериментально доказали возможность отслеживания траектории сварного шва с помощью систем сканирования поверхности электронным пучком.

## 5 Эксперимент

### 5.1 Параметры измерения и оборудование

Возвращаясь непосредственно к исследованиям, связанным с темой данной диссертации, приступим к описанию экспериментальной установки по сканированию сварного шва.

Возьмем частный известный случай. Пусть имитация сварного шва представляет собой зазор между двумя пластинами (см. рисунок 15).



Рисунок 15. Имитация формируемого сварного шва

Из исследований линейных мер нам известны виды сигналов при электронном сканировании подобного зазора. Следует отметить, что в АСМ рельефные прямоугольные структуры в принципе не применимы в силу особенностей конструкции структуры. Узкая и глубокая щелевидная канавка не позволяет современным кантилеверам достигнуть ее дна. Тем не менее описанный выше вид сигнала нам подходит.

На рисунке 16 для иллюстрации приведено изображение микроскопического скола и сигналы щелевидной канавки. Сигналы получены с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ S-806 и для удобства представления сдвинуты относительно своего истинного положения.

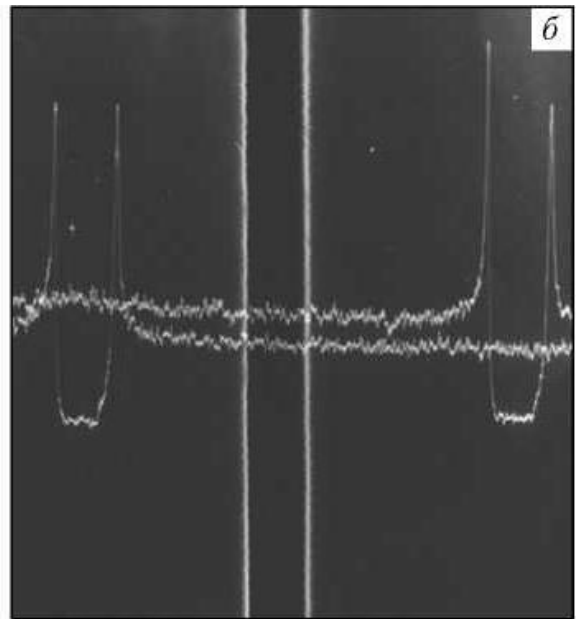
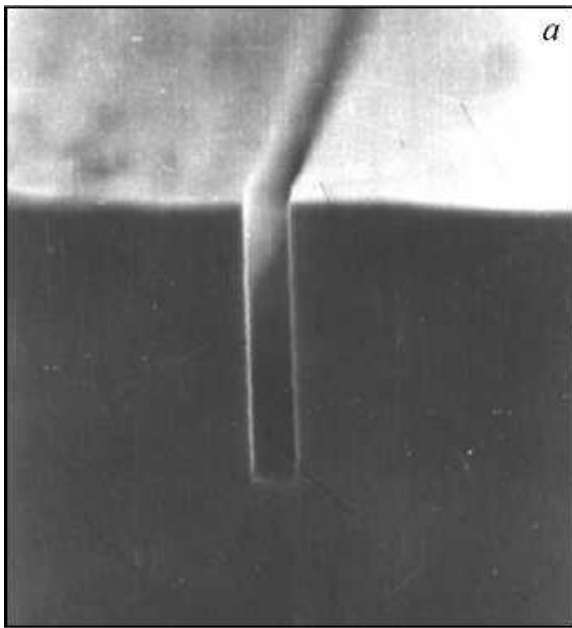


Рисунок 16. Изображение микроскопического скола (а) и изображения (б) с сигналами щелевидной канавки РПС с шириной 150,7 нм и глубиной 850 нм, выполненные на РЭМ S-806..

Для проведения эксперимента нам необходимо записывать одновременно три сигнала:

– сигнал  $U_x$  – сигнал, соответствующий току поданному на катушки отвечающие за отклонения луча по оси  $X$

– сигнал  $U_y$  – сигнал, соответствующий току поданному на катушки отвечающие за отклонения луча по оси  $Y$

– сигнал  $R$  – сигнал, соответствующий току на пластине-детекторе отраженных и вторичных электронов

Запись сигналов производится с помощью 4-х канального АЦП E20-10 L-CARD (см. рисунок 17).



Рисунок 17. Внешний вид АЦП E20-10 L-CARD

Сканирование испытательного образца будет проводиться построчно, в виде змейки (см. рисунок 18).

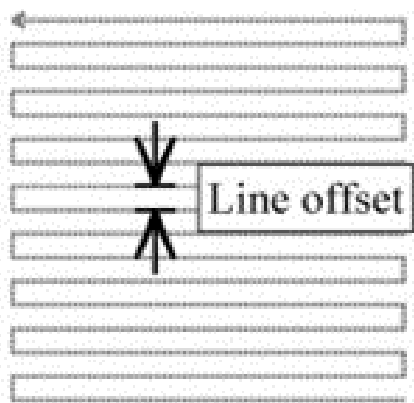


Рисунок 18. Траектория сканирования испытательного образца

## 5.2. Проведение эксперимента

Для набора статистических данных мы провели 10 серий экспериментов, изменяя и регулируя параметры, от которых максимально зависит контраст изображения. К варьируемым параметрам относятся:

- сила тока электронного пучка;
- скорость сканирования;
- кратность сканирования по одной и той же строке;
- сопротивление на пластине-детекторе;
- размер зазора сварного шва.

В ходе эксперимента мы получили устойчивый сигнал (см. рисунок 19), достаточный для получения изображения.

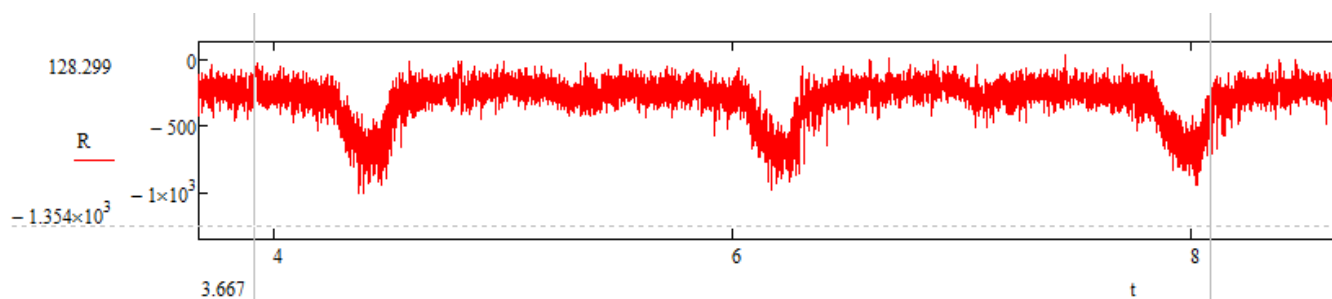


Рисунок 19. Сигнал с детектора

Согласно концепции обработки информационных сигналов, закладываемой в разрабатываемую математическую модель, полученный сигнал был



продифференцирован, с последующим выделением основной частота сигнала. Весь сигнал был разделен на отрезки, соответствующие строкам сканирования.

На рисунке 20 проиллюстрированы результаты этапов обработки сигналов.

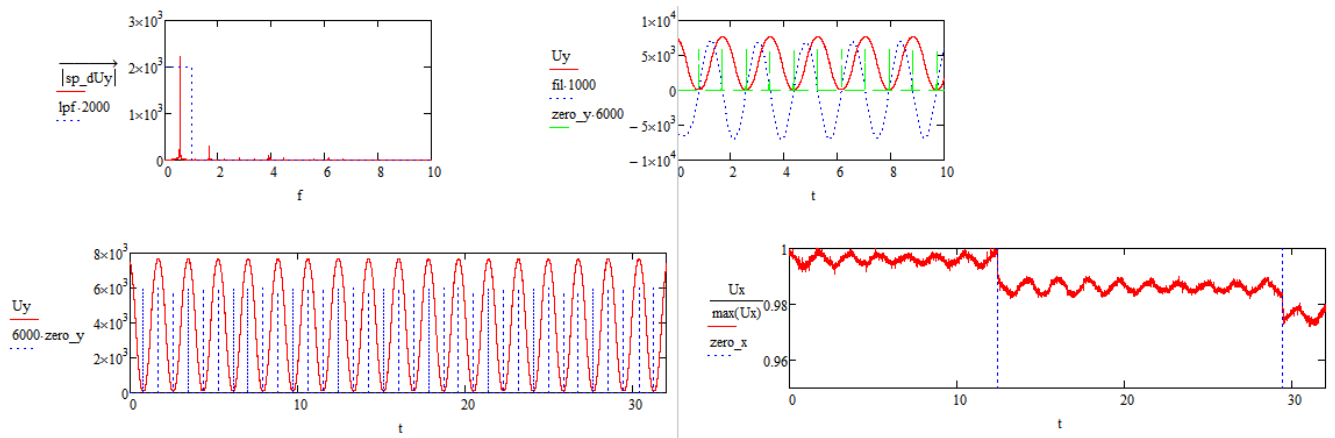


Рисунок 20. Результаты этапов обработки сигналов

На рисунке 21 приведён внешний вид сигнала после цифровой обработки.

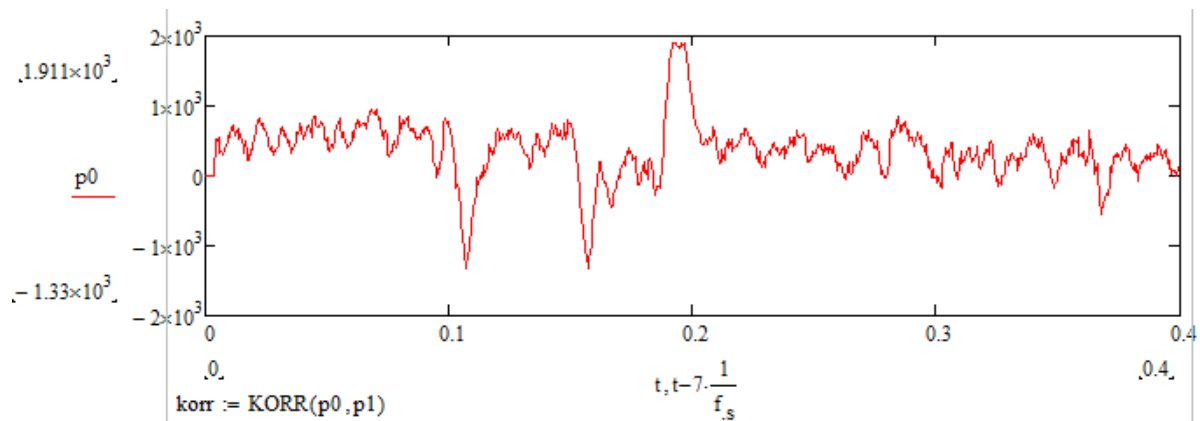


Рисунок 21. Внешний вид сигнала после цифровой обработки

Результатом проведенных математических преобразований мы получили следующее изображение сварного шва (см. рисунок 22).

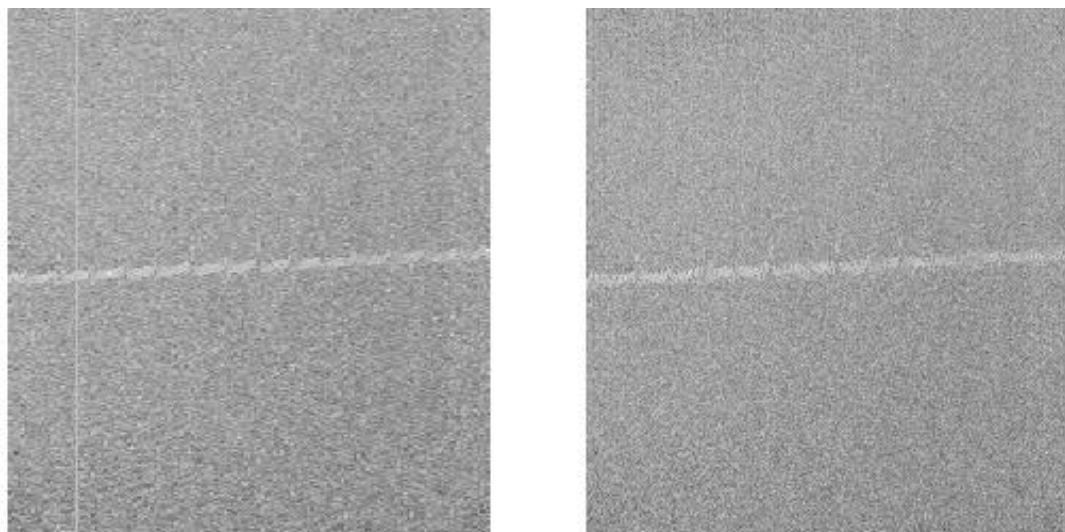
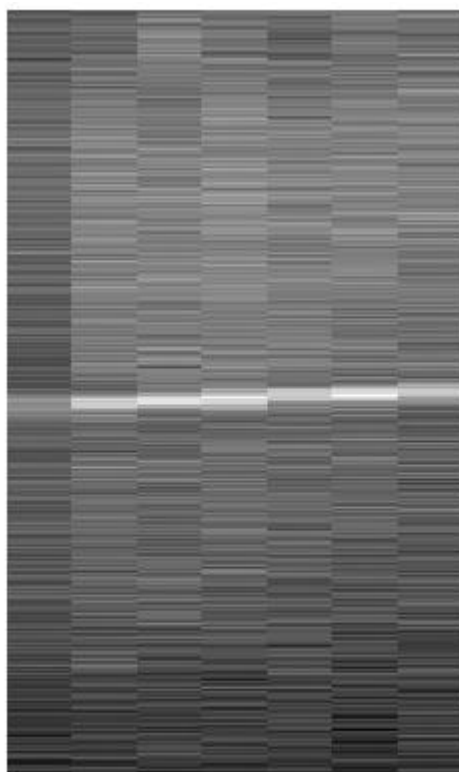


Рисунок 22. Изображение сварного шва.

Проведя дополнительную фильтрацию и корреляцию мы получили итоговое изображение (см. рисунок 23).



NORM(IMG)

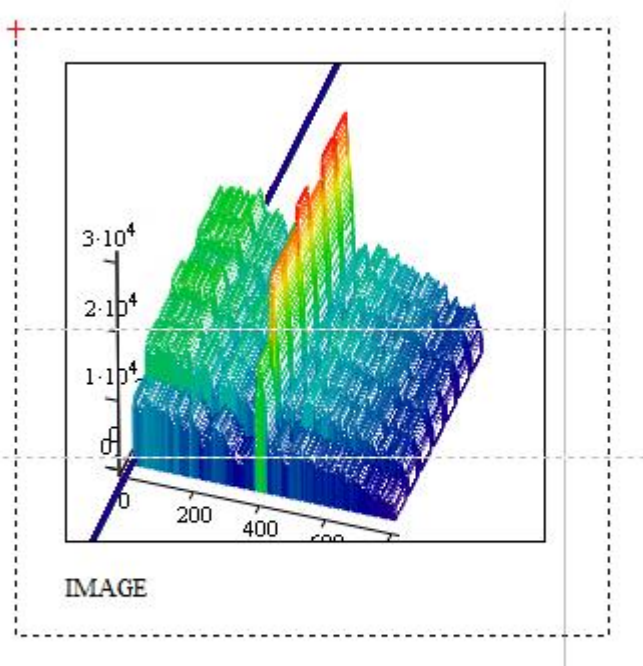


Рисунок 23. Итоговое изображение имитации сварного шва

### 5.3. Математическая модель системы отслеживания шва в сварке электронным пучком

MAT

IN :=

... \9-43-46-1.txt

rows(IN<sup>(0)</sup>) = 8.88 × 10<sup>5</sup>

M := 2<sup>19</sup> = 5.243 × 10<sup>5</sup>    N<sub>col</sub> := cols(IN) = 8

start := 2<sup>14</sup>

IN := submatrix(IN, start, start + M - 1, 0, 4)

f<sub>s</sub> := 2000

i := 0..M - 1

t<sub>i</sub> :=  $\frac{1}{f_s} \cdot i$     df :=  $\frac{f_s}{M}$     f<sub>i</sub> := df · i

Ux := medsmooth(IN<sup>(0)</sup>, 3)

Uy := medsmooth(IN<sup>(1)</sup>, 3)

R<sub>col</sub> := IN<sup>(2)</sup>

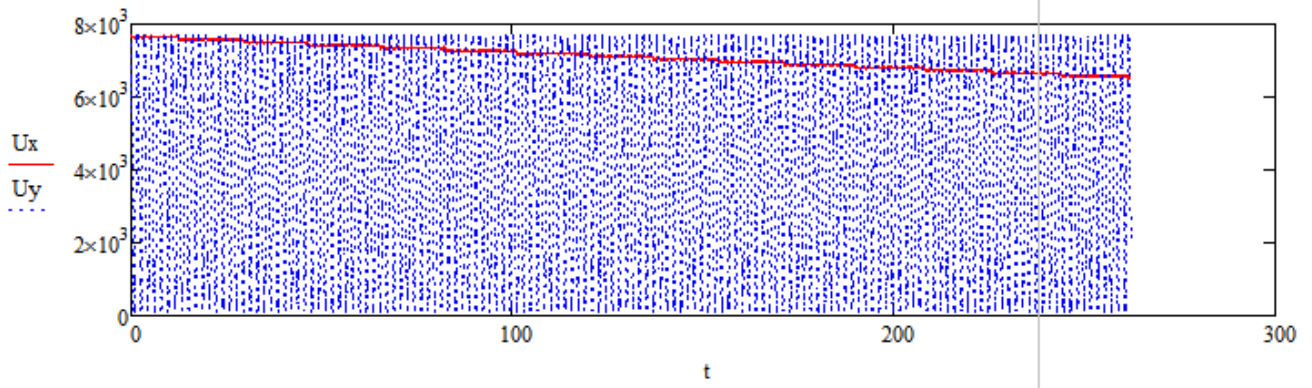
```
DIFF(buf) :=
Res ← 0
L ← rows(buf)
for i ∈ 0..L - 2
  Resi ← bufi+1 - bufi
ResL-1 ← ResL-2
return Res
```

```
LPF(pass, size) :=
Res ← 0
for i ∈ 0..size
  Resi ← 1 if i ≤ pass
  Resi ← 0 otherwise
return Res
```

```
ZERO_CROSS(buf) :=
Res ← 0
L ← rows(buf)
for i ∈ 0..L - 2
  Resi ← 1 if (bufi+1 ≥ 0 ∧ bufi < 0) ∨ (bufi+1 < 0 ∧ bufi ≥ 0)
  Resi ← 0 otherwise
ResL-1 ← 0
return Res
```

```
CUT_X(UX, zero_y) :=
Res ← 0
_start ← 0
for j ∈ 0..rows(zero_y) - 1
  if zero_yj > 0
    _sub ← submatrix(UX, _start, j, 0, 0)
    _mean ← mean(_sub)
    for k ∈ _start..j
      Resk ← _mean
    _start ← j
return Res
```

```
zero_x :=
Res ← 0
_max ← max(dUy)
for j ∈ 0..rows(dUy) - 1
  Resj ← 1 if dUyj > 0.7 · _max
  Resj ← 0 otherwise
return Res
```



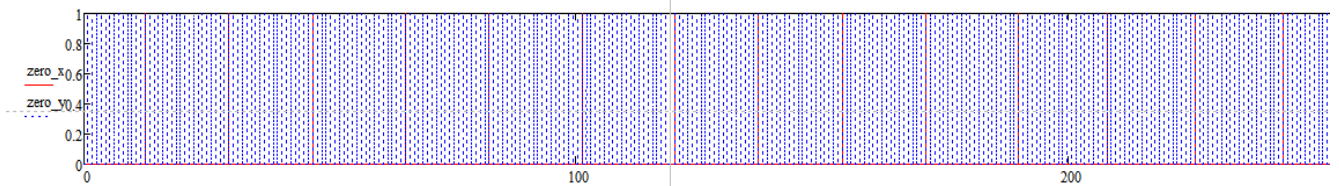
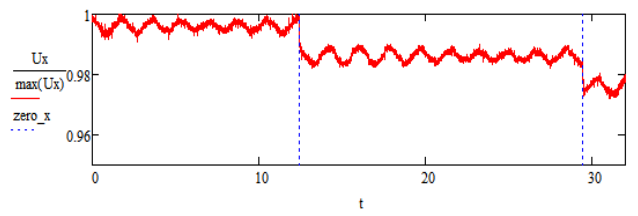
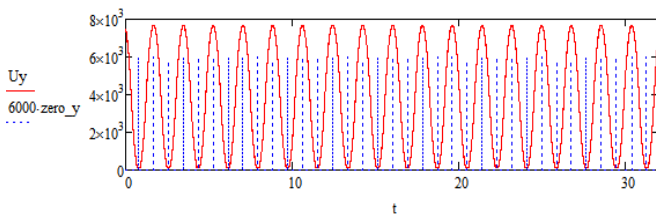
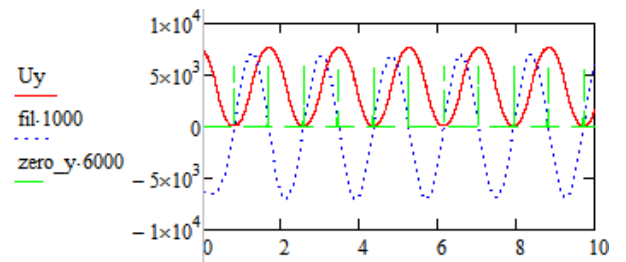
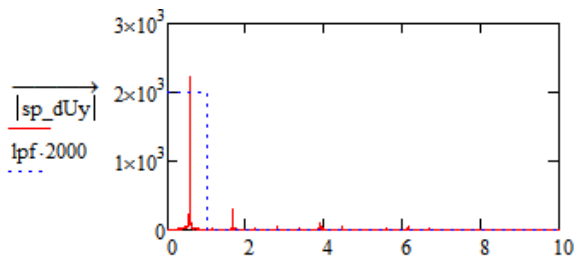
$dUy := \text{DIFF}(Uy)$

$sp\_dUy := \text{fft}(dUy) \quad \text{lpf} := \text{LPF}\left(\frac{1}{df}, \text{rows}(sp\_dUy) - 1\right)$

$fil := \text{ifft}\left[\overrightarrow{(sp\_dUy \cdot \text{lpf})}\right]$

$\text{zero\_y} := \text{ZERO\_CROSS}(fil)$

$\text{cut\_x} := \text{CUT\_X}(Ux, \text{zero\_y}) \quad dUy := \text{DIFF}(\text{cut\_x}) \quad \overrightarrow{dUy} := |dUy|$



<pre> STAR_STOP(buf) := Res ← 0                   L ← rows(buf)                   j ← 0                   for i ∈ 1..L - 1                     if buf<sub>i</sub> = 1                       Res<sub>j,j</sub> ← i                       break                   for i ∈ (Res<sub>j,j</sub> + 1)..L - 1                     if buf<sub>i</sub> = 1                       Res<sub>j,1</sub> ← i                       j ← j + 1                       Res<sub>j,0</sub> ← i                   return Res </pre>	<pre> CUT(data,item) := Res ← 0                   L ← 0                   for i ∈ 0..rows(item) - 2                     L ← (item<sub>i,1</sub> - item<sub>i,0</sub>) + L                   L ← floor(L / rows(item))                   L ← L - 50                   _ind ← 0                   for i ∈ 1,3..rows(item) - 2                     Res<sup>&lt;_ind&gt;</sup> ← submatrix(R,item<sub>i,1</sub> - L,item<sub>i,1</sub>,0,0)                     Res<sup>&lt;_ind+1&gt;</sup> ← submatrix(R,item<sub>i,1</sub>,item<sub>i,1</sub> + L,0,0)                     _ind ← _ind + 2                   return Res </pre>
---	---

```

PASS := Res ← 0
        _lx ← rows(zero_x)
        _ly ← rows(zero_y)
        _l ← _ly if _lx > _ly
        _l ← _lx otherwise
        k ← 0
        _sum ← 0
        for i ∈ 0.._l - 1
          if zero_xi > 0
            Resk ← _sum - 1
            _sum ← 0
            k ← k + 1
          _sum ← _sum + 1 if zero_yi > 0 otherwise
        return Res

```

<pre> SEL_LR_DIR(buf) := Res ← 0                   k ← 0                   for i ∈ 0..cols(buf) - 1                     if mod(i,2) = 0                       Res<sup>&lt;k&gt;</sup> ← buf<sup>&lt;i&gt;</sup>                       k ← k + 1                   return Res </pre>	<pre> SEL_RL_DIR(buf) := Res ← 0                   k ← 0                   for i ∈ 0..cols(buf) - 1                     if mod(i,2) = 1                       Res<sup>&lt;k&gt;</sup> ← reverse(buf<sup>&lt;i&gt;</sup>)                       k ← k + 1                   return Res </pre>
---	--

```
cut := CUT(R, STAR_STOP(zero_y))
```

```
M := rows(cut) = 1.736 × 103
```

```
N := cols(cut)
```

+

```
k := 0..N - 1
```

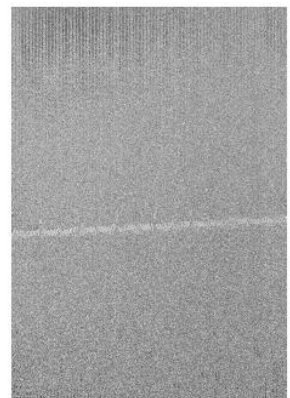
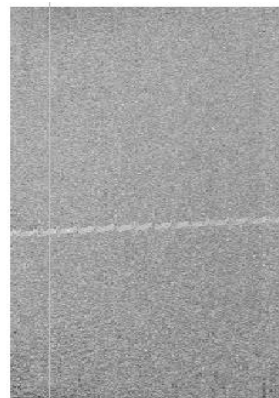
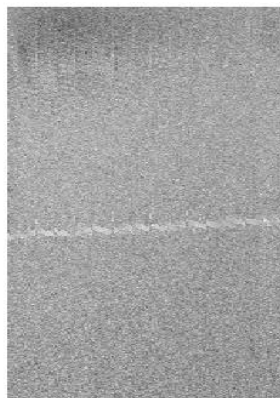
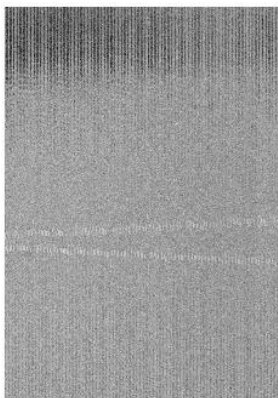
```
P1<k> := cut<k>
```

```
P2<k> := P1<k> - mean(P1<k>)      cols(P2) = 290
```

```
LR := SEL_LR_DIR(P2)      cols(LR) = 145
```

```
RL := SEL_RL_DIR(P2)      cols(RL) = 145
```

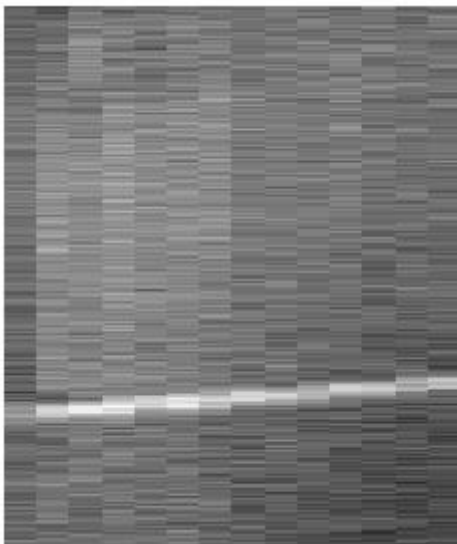
```
P4 := | Res ← 0  
      | lr ← 0  
      | rl ← 0  
      | for i ∈ 0..N - 1  
      |   | if mod(i,2) = 0  
      |   |   | Res<i> ← LR<lr>  
      |   |   | lr ← lr + 1  
      |   | otherwise  
      |   |   | Res<i> ← RL<rl>  
      |   |   | rl ← rl + 1  
      | return Res
```



```

IMAGE(buf ,pass) := Res ← 0
                   _start ← 0
                   -----
                   _stop ← 0
                   _k ← 0
                   for i ∈ 0..rows(pass) - 1
                       | _start ← _stop
                       | _stop ← _stop + passi
                       | _sub ← submatrix(buf ,0,rows(buf) - 1, _start, _stop)
                       | _n ← _stop - _start
                       | Res⟨i⟩ ←  $\sum_{j=0}^{\_n} \text{buf}^{\langle\_start+j\rangle}$ 
                       |
                   return Res

```



IMG := IMAGE(P4,PASS)

IMG := submatrix(IMG,200,400 + 2<sup>10</sup>,0,cols(IMG) - 1)

## **6. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»**

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований. Через такую оценку ученый может найти партнера для дальнейшего проведения научного исследования, коммерциализации результатов такого исследования и открытия бизнеса.

### **6.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

В данной работе рассмотрен коммерческий потенциал прибора, который является конечной целью проводимого исследования. Данный прибор (прибор для сканирования сварного шва электронным пучком) является независимым, адаптивным модулем к любой стандартной электроннолучевой сварочной установке. Независимость прибора от ЭСУ позволит производить относительно недорогую модернизацию производства (замена установки ЭСУ обходится производству в десятки, а то и сотни миллионы рублей, в зависимости от мощности). Для оценки перспективности прибора используем технологию QuaD

#### **Технология QuaD**

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:



1. Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность;
- правовая защищенность.

2. Показатели оценки качества

разработки:

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки.

Выбранные показатели для оценки конкурентоспособности метода показаны в таблице 1:

Повышение производственной безопасности – оператору больше нет необходимости находится в непосредственной близости от ЭСУ для контроля наведения на сварочный шов.

Повышение производительности труда – за счет автоматизации процесса.

Простота эксплуатации – стандартный G-код.

Конкурентоспособность – нет аналогов на российском рынке.

Цена – незначительная по сравнению с ЭСУ.

Финансовая эффективность научной разработки - нет аналогов на российском рынке.

Таблица 1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	6
<b>Показатели оценки качества разработки</b>					
1. Повышение производственной безопасности	0,25	90	100	0,9	0,225
2. Повышение производительности труда	0,2	90	100	0,9	0,18
3. Простота эксплуатации	0,05	50	100	0,5	0,025
<b>Показатели оценки коммерческого потенциала разработки</b>					
4. Конкурентоспособность	0,2	80	100	0,8	0,16
5. Цена	0,1	50	100	0,5	0,05
6. Финансовая эффективность научной разработки	0,2	90	100	0,9	0,18
<b>Итого</b>	<b>1</b>				

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum V_i \cdot B_i \quad (2)$$

где  $P_{cp}$  – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – средневзвешенное значение  $i$ -го показателя.

$$P_{cp} = 0.25 \cdot 90 + 0.2 \cdot 90 + 0.05 \cdot 50 + 0.2 \cdot 80 + 0.1 \cdot 50 + 0.2 \cdot 90 = 82$$

Показатель  $P_{cp}$  равный 82 говорит о перспективности продукта.

## 6.2. SWOT-анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта проведем SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. Он проводится в несколько этапов.

1. Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

В таблице 2 представлен результат первой ступени в матричной форме.

Таблица 2 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны НИР:</p> <p>С1. Наличие опытного руководителя.</p> <p>С2. Наличие необходимого оборудования для испытаний</p> <p>С3. Экономическая эффективность разработки.</p> <p>С4. Наличие бюджетного финансирования.</p> <p>С5. Отсутствие аналогичных разработок</p>	<p>Слабые стороны НИР:</p> <p>Сл1. Отсутствие средств для изготовления изделия согласно научной разработке.</p> <p>Сл2. Присутствие альтернативных способов улучшения характеристик оборудования</p> <p>Сл3. Медленный процесс вывода на рынок.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ. В2. Появление дополнительного спроса на новую технологию.</p> <p>В3. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>		
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Развитая конкуренция технологий производства. У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p>		

2. Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды.

Результаты, представленные в табличной форме (табл. 3 – табл. 6), призваны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. Каждый символ в таблице обозначает степень соответствия.

Таблица 3 – Интерактивная матрица проекта (1)

		Сильные стороны проекта				
		C1	C2	C3	C4	C5
Возможности проекта	B1	+	+	+	-	-
	B2	0	+	-	-	-
	B3	+	0	+	0	-

Таблица 4 – Интерактивная матрица проекта (2)

		Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2	Сл3
Возможности проекта	B1	+	+	0
	B2	+	-	+
	B3	-	+	0

Таблица 5 – Интерактивная матрица проекта (3)Ё

		Сильные стороны проекта				
		C1	C2	C3	C4	C5
Угрозы проекта	У1	+	0	+	-	0
	У2	-	+	+	-	-
	У3	-	-	0	+	-

Таблица 6 – Интерактивная матрица проекта (4)

		Слабые стороны проекта		
		Сл1	Сл2	Сл3
Угрозы проекта	У1	0	+	0
	У2	+	0	-
	У3	+	0	+

Анализ интерактивных таблиц представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей, или слабых сторон и возможностей и т.д. следующего вида: В1С1С2С5; В4С1С4. Каждая из записей представляет собой направление реализации проекта.

В случае, когда две возможности сильно коррелируют с одними и теми же сильными сторонами, с большой вероятностью можно говорить об их единой природе. В этом случае, возможности описываются следующим образом: В2В3С2С3.

В результате получаем сильно коррелирующие параметры:  
 1) В1С3С4С5, В2С2С3, В3С1С3 => В1В2С3, В2В3С3, В1В3С3  
 2) В1Сл2, В2Сл1Сл3, В3Сл1Сл3 => В2В3Сл1Сл2 3) У1С1С2С3, У2С1С2С3, У3С4 => У1У3С1С2С3 4) У2Сл1Сл3, У3Сл3 => У2У3Сл3

Исходя из этого получаем наиболее выгодные направления реализации НИР.

3. Составим итоговую матрицу (табл.15) для заключительного третьего этапа, в котором будут описаны основные решения научно-исследовательского проекта.

Имея возможность задействовать инфраструктуру ТПУ можно значительно дешевле изготовить новое технологичное оборудования, не привязанного к конкретному оборудованию-производителю. Это однозначно повысит его конкурентоспособность и спрос.

Из минусов можно отметить нежелание на производстве тратить деньги на модернизацию (работает значит незачем трогать). Так же часто предприятиям проще купить целые ЭСУ (субсидии), а также немаловажный фактор играет тех поддержка новых ЭСУ (Нежелание или невозможность готовить своих специалистов). Ну и конечно необходимо учитывать недостаточное и несвоевременное финансирование (Хотя технологии сканирования уже давно используются в других отраслях, но нет исследований по внедрению их в ЭСУ)

Таблица 7 – Итоговая матрица SWOT

	Сильные стороны НИР: С1. Наличие опытного руководителя. С2. Наличие необходимого оборудования для испытаний С3. Экономическая эффективность разработки. С4. Наличие бюджетного финансирования. С5. Отсутствие аналогичных разработок	Слабые стороны НИР: Сл1. Отсутствие средств для изготовления изделия согласно научной разработке. Сл2. Присутствие альтернативных способов улучшения характеристик оборудования Сл3. Медленный процесс вывода на рынок.
Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ. В2. Появление дополнительного спроса на новую технологию. В3. Повышение стоимости конкурентных разработок.	V1B2C3, V2B3C3, V1B3C3	V2B3Сл1Сл2
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства. У2. Развитая конкуренция технологий производства. У3. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.	У1У2С1С2С3С5	У2У3Сл3

### 6.3. Планирование научно-исследовательских работ

#### 6.3.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

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

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в табл. 8.

Таблица 8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Подготовка образцов для экспериментов	Студент
	6	Проведение экспериментов	Студент
Обобщение и оценка результатов	7	Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	Студент
Оформления отчета по НИР	8	Составление пояснительной записки	Руководитель, Студент

### 6.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула:

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

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

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

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65%.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}. \quad (3)$$

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

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

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

### 6.3.3. Разработка графика проведения научного исследования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{кал}, \quad (4)$$

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

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;  $k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (5)$$

где  $T_{кал}$  – количество календарных дней в году (366);

$T_{вых}$  – количество выходных дней в году (66);

$T_{пр}$  – количество праздничных дней в году (8).

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  округляем до целого числа. Все рассчитанные значения сводим в таблицу (табл. 9).



Таблица 9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ									Исполнители	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				Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3							
Составление и утверждение технического задания	1	1	1	4	4	4	2,2	2,2	2,2	Руководитель	3	3	3	5	5	5
Подбор и изучение материалов по теме	6	6	6	13	13	13	8,8	8,8	8,8	Студент	9	9	9	14	14	14
Выбор направления исследований	3	3	3	7	7	7	4,6	4,6	4,6	Руководитель	5	5	5	8	8	8
Календарное планирование работ по теме	2	2	2	6	6	6	3,6	3,6	3,6	Руководитель	2	2	2	3	3	3
Подготовка образцов для экспериментов	3	5	8	10	10	15	5,8	7	10,8	Студент	3	4	6	5	6	9
Проведение экспериментов	7	10	16	12	17	28	9	12,8	20,8	Студент	5	7	11	8	10	17
Расшифровка данных и сравнение с имеющимися показателями	9	10	7	12	14	13	10,2	11,6	9,4	Студент.	6	6	5	9	9	8
Составление пояснительной записки	11	16	20	17	25	30	13,4	19,6	24	Руководитель, студент	5	7	8	7	9	14

На основе таблицы 9 строим календарный план-график (табл. 10). График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени, отведённый на написания ВКР. При этом работы на графике выделим различной штриховкой в зависимости от исполнителей.

Таблица 10 – Календарный план график проведения НИР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т <sub>ки</sub> , кал. дни	Продолжительность выполнения работ										
				Февраль		Март			Апрель			Май		
				1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление ТЗ	Руководитель	5	■										
2	Изучение материалов	Студент	14	▬▬▬										
3	Выбор направления	Руководитель	8			■								
4	Планирование работ	Руководитель.	3			■								
5	Подготовка образцов	Студент	9				▬▬▬							
6	Проведение экспериментов	Студент	17					▬▬▬▬▬						
7	Расшифровка данных	Студент	9							▬▬▬▬				
8	Пояснительная записка	Руководитель, студент	14								▬▬▬▬▬			

■ – руководитель; ▬ – студент.

## 6.4. Бюджет научно-технического исследования

### 6.4.1. Расчет материальных затрат НИИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) * \sum_{i=1}^m C_i + N_{расхи}, \quad (28)$$

где  $k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы;

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

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

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

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносим в таблицу 11.

Таблица 11 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы ( $Z_M$ ), руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Бумага	ЛИСТ	60	80	70	1	0,9	1,5	60	72	105
Картридж для принтера	ШТ.	1	1	1	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Итого								1060	1072	1105

#### 6.4.2. Расчет затрат на 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 теме.

Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. Расчет затрат по данной статье заносится в таблицу 12. При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15 процентов от его цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении конкретного НИИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений.

Таблица 12 – Расчет бюджета затрат на приобретение оборудования для НИР

№ п/п	Наименование оборудования	Количество единиц оборудования			Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Детектор излучения	1	1	1	100	80	140	100	80	140
2	ЭСУ	1	1	1	8500	8000	9000	8500	8000	9000
Итого								8600	8080	9140

#### Амортизационные отчисления

При средневзвешенной норме амортизации = 10%(срок службы 10лет),

величина амортизации 1 =  $(8600*0,1)/365*14= 32,986$  тыс.руб.

величина амортизации 2 =  $(8080*0,1)/365*3= 6,641$  тыс.руб.

величина амортизации 3 =  $(9140*0,1)/365*3= 7,512$  тыс.руб.

величина амортизации общая = 47,140 тыс.руб.

20 – это количество дней использования оборудования (таб 18 – конец марта, начало апреля).

### 6.4.3. Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (7)$$

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

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата (от 12 до 20 процентов от  $Z_{\text{осн}}$ ).  
Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = T_p \cdot Z_{\text{дн}}, \quad (8)$$

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

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. ;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (9)$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 рабочих дня  $M$  равно 11,2 месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 рабочих дней  $M$  равно 10,4 месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 13 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней: выходные,	66	66
Потери рабочего времени: отпуск, невыходы по болезни	48	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	250	250

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (10)$$

где  $Z_{тс}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30 процентов от

$Z_{тс}$ );  $k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 14 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$ , тыс. руб.	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , тыс. руб.	$Z_{дн}$ , тыс. руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , тыс. руб.
Руководитель	35,120	0	0	1,3	45,656	1,899	28	53,172
Студент	12,130	0	0	1,3	15,769	0,657	44	28,908
Итого $Z_{осн}$								82,08

#### 6.4.4. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Таблица 15 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс. руб		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Руководитель	53,172		
Студент	28,908		
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302		
Итого 24,788			

#### 6.4.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Таблица 16 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	
1. Материальные затраты НИИ	1060	1072	1105	Таблица 10
2. Затраты на спецоборудование для научных работ (амортизация)	32986	6641	7512	Амортизационные отчисления 10% (Таблицы 11 и 9)
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	17724	17724	17724	=1/3- берем для каждого испытания Таблица 14 Таблица 15
4. Отчисления во внебюджетные фонды	8263	8263	8263	
5. Накладные расходы	11146,88	6933,6	7078,24	16% от суммы ст.1-5, 14 Таблица 10
6. Бюджет затрат НИИ	80814,88	50268,6	51317,24	Сумма ст. 1-5

### 6.5. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

*Интегральный показатель финансовой эффективности* научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов 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.

*Интегральный финансовый показатель разработки* определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (11)$$

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

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения НИР.

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

*Интегральный показатель ресурсоэффективности* вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_i = \sum a_i \cdot b_i, \quad (12)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Таблица 17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения НИР

Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1. Повышение производственной безопасности	0,25	5	5	5
2. Повышение производительности труда	0,2	5	5	5
3. Простота эксплуатации	0,05	5	5	5
4. Конкурентоспособность	0,2	5	5	5
5. Цена	0,1	5	5	5
6. Финансовая эффективность научной разработки	0,2	3	2	1
Итого	1			

$$I_1 = 0,25 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 5 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,2 = 4,6$$

$$I_2 = 0,25 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 5 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,2 = 4,55$$

$$I_3 = 0,25 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 5 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,2 = 4,5$$

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

$$I_{\text{исп}1} = \frac{I_{p1}}{I_{\text{финр}}}, I_{\text{исп}2} = \frac{I_{p2}}{I_{\text{финр}}} \text{ и т.д.} \quad (13)$$



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

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{исп2}}}. \quad (14)$$

Таблица 18 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,947	0,965	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,6	4,55	4,5
3	Интегральный показатель эффективности	4,75	4,4	4,35
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,08/1,06	0,93/0,98	0,95/1,02

Проведя расчет энерго- и ресурсоэффективности и сравнив различные исполнения приходим к выводу, что исполнение № 1 является наилучшим вариантом.

Логическая карта для вывода на рынок нового продукта представлена в таблице 19.

Таблица 19 – Логическая карта для вывода на рынок нового продукта

Потребитель		Конкуренты		ТПУ	
Потребность в авиа и космической промышленности	Развитие новой отрасли (3Д печать)	Непрерывное развитие в данной отрасли (машиностроение)	Существующее оборудование	Отсутствие маркетинговой поддержки	Мощная производственная и научная база
Возможные риски					
Разработки ведут и другие институты	Недостаточный объём финансирования	Появление новых методов решения	Отсутствие тех поддержки	Отсутствие возможности демонстрации работы оборудования	Нежелание оформления исследований в законченный продукт
Меры по ограничению последствий рисков					
Заканчивать исследования с обязательным выпуском конечного продукта (прибора)	Запускать совместные проекты (например, РОСКОСМОС или РОСАТМ)	Привлекать финансирование для исследований	Заключить договор со сторонней фирмой по тех. поддержке	Совместить с демонстрацией схожего оборудования (например 3Д принтер металлов)	Привлечь заинтересованные фирмы

## 7. Раздел «Социальная ответственность»

Согласно стандарту ГОСТ ИСО 26000-2012, социальная ответственность - это ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этичное поведение.

### 7.1. Производственная безопасность

#### 7.1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения

В данном разделе анализируются вредные факторы, которые могут повлиять на рабочий процесс, оборудование и инженера.

При разработке новой конструкции или оборудования важно уделить внимание созданию оптимальных рабочих условий - свести к минимуму воздействие опасных и вредных химических, физических и других факторов. Оптимальными условиями труда принято считать те условия, которые сохраняют здоровье работников и позволяют им работать продолжительное время без потери качества продукции.

Таблица 20 – Перечень вредных факторов производства

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Низкое качество воздуха	+	+	+	Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны, ГОСТ 12.1.005-88ССБТ [1]
2. Нехватка естественного света, малая освещённость	+	+	+	Естественное и искусственное освещение СП 52.13330.2016 [2] Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 [3]
3. Высокое электромагнитное и ионизирующего излучения	+			

Продолжение таблицы 20

4. Повышенный уровень шума		+	+	Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016* [4] СН 2.2.4/2.1.8.562–96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки [5].
----------------------------	--	---	---	---

### 7.1.1.1 Нехватка естественного света, малая освещенность

Свет является важнейшим фактором, недостаток которого пагубно влияет на человека. Правильное освещение рабочего места действует тонизирующее, улучшает протекание процессов нервной деятельности, стимулирует обменные и иммунобиологические процессы, оказывает положительное влияние на формирование суточного ритма физиологических функций человека.

Недостаточное количество света пагубно влияет на функционирование зрительного аппарата, то есть определяет зрительную работоспособность, на психику человека, его эмоциональное состояние, вызывает усталость центральной нервной системы, возникающей в результате прилагаемых усилий для опознания четких или сомнительных сигналов.

Установлено, что свет так же воздействует на нервную оптико-вегетативную систему, систему иммунной защиты, рост и развитие организма и влияет на многие основополагающие процессы жизнедеятельности, регулируя обмен веществ и устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды. Сравнительная оценка естественного и искусственного освещения по его влиянию на работоспособность показывает преимущество естественного света.

Важно отметить, что не только уровень освещенности, а все аспекты качества освещения играют роль в предотвращении несчастных случаев. Можно упомянуть, что неравномерное освещение может создавать проблемы адаптации, снижая видимость. Работая при освещении плохого качества или низких уровней, люди могут ощущать усталость глаз и переутомление, что приводит к снижению работоспособности

Оценка освещенности рабочей зоны проводится в соответствии с [2].

Показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения представлены в таблице 7.2.

Таблица 21 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения

Помещение	Искусственное освещение			
	Освещенность, лк			Коэффициент пульсации освещенности, Кп, %, не более
	При комбинированном освещении		При общем освещении	
	Всего	От общего		
Машинописные помещения	500	300	400	10

Согласно [3] в помещении вычислительных центров необходимо применить систему комбинированного освещения. Естественное освещение обеспечивается через оконные проемы с коэффициентом естественного освещения КЕО не ниже 1,2% в зонах с устойчивым снежным покровом и не ниже 1,5% на остальной территории. Световой поток из оконного проема должен падать на рабочее место оператора с левой стороны.

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения документа должна быть 300-500 лк. Допускается установка светильников местного освещения для подсветки документов. Местное освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана и увеличивать освещенность экрана более 300 лк. Прямую блескость от источников освещения следует ограничить. Яркость светящихся поверхностей (окна, светильники), находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м<sup>2</sup>.

Яркость бликов на экране монитора не должна превышать 40 кд/м<sup>2</sup>. Показатель ослепленности для источников общего искусственного освещения в помещениях должен быть не более 20, показатель дискомфорта в административно-общественных помещениях не более 40.

Соотношение яркости между рабочими поверхностями не должно превышать 3:1 — 5:1, а между рабочими поверхностями и поверхностями стен и оборудования 10:1.

Для искусственного освещения помещений с персональными компьютерами следует применять светильники типа ЛПО36 с зеркализированными решетками, укомплектованные высокочастотными пускорегулирующими аппаратами. Допускается применять светильники прямого света, преимущественно отраженного света типа ЛПО13, ЛПО5, ЛСО4 с люминесцентными лампами типа ЛБ. Допускается применение светильников местного освещения с лампами накаливания. Светильники местного освещения должны иметь непросвечивающийся отражатель с защитным углом не менее 40 градусов.

Для обеспечения нормативных значений освещенности в помещениях следует проводить чистку стекол оконных проемов и светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену перегоревших ламп.

Лаборатория, где выполнялась магистерская работа имеет естественное и искусственное освещение. Для обеспечения нормальной деятельности человека следует распределять естественное и искусственное освещение, используя комбинированное освещение. Так, светлый окрас стен и потолков равномерно распределяет яркость освещения.

В помещениях для IV разряда зрительных работ, при освещении газоразрядными лампами, необходимо обеспечить освещенность 300 лк.

Стены и потолок серого цвета, на полу положен линолеум серого цвета.

Помещение имеет следующие размеры: длина  $a=5$  м, ширина  $b=5$  м, высота  $h_1=3$  м.

Выбраны светильники: Т5 люминесцентная лампа светильник 24 Вт от производителя Changzhou Asia Lamp, их световой поток  $\Phi_{л}=2000$  лм.

Нормы освещенности  $E = 300$  лк на уровне  $h_2=0,8$  м от пола (рабочая поверхность стола), коэффициент запаса  $K_z = 1,5$ , коэффициент неравномерности  $Z = 1,1$ , коэффициент отражения потолка - 50, стен - 30, пол - 10.

Выбираем светильники типа ОД,  $\lambda = 1,4$ .

Приняв  $h_c = 0,5$  м, получаем  $h = 3 - 0,5 - 0,8 = 1,7$  м;

$$L = 1,4 \cdot 1,7 = 2,4 \text{ м}; L/3 = 0,8 \text{ м}.$$

Находим индекс помещения

$$i = 25 / [1,7(5 + 5)] = 1,47.$$

При коэффициентах отражения потолка - 50, стен - 30, пол - 10 и индексе помещения 1,47  $\text{м}^2$  коэффициент использования осветительной установки будет равен 0,5.

Требуемое количество светильников определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E * S * Kз * Z}{N * n}$$

где  $E$  - требуемая освещенность горизонтальной плоскости, лк;

$S$  - площадь помещения, м.кв.;

$Kз$  - коэффициент запаса;

$\Phi$  - световой поток одного светильника, лм;

$Z$  - коэффициент неравномерности освещения, отношение  $E_{ср}/E_{min}$ .

$N$  - число светильников в помещении

$n$  - число ламп в одном светильнике.

$$N = \frac{E * S * Kз * Z}{\Phi * n} = \frac{300 * 25 * 1,5 * 1,1}{2000 * 0,5} = 12,375$$

Следовательно, требуемое количество светильников 12 штук.

Схема расположения светильников представлена на рисунке 24.

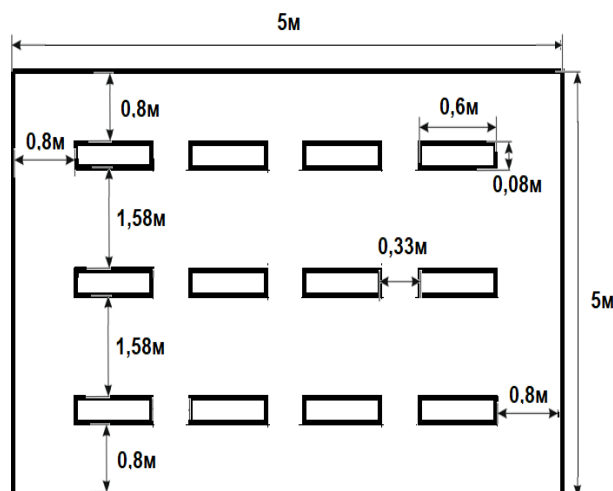


Рисунок 24 – Схема расположения светильников

### 7.1.1.2 Низкое качество воздуха рабочей зоны

Большое значение для охраны здоровья и труда человека имеет качество воздуха в рабочем помещении.

По [1] нормируются следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздушного потока, ПДК вредных веществ.

Эти данные приведены в таблице 7.4.

Таблица 22 –Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений для категории работ I

Период года	Наименование параметра			
	Температура воздуха, С°	Температура поверхностей, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с.
Холодный	22-24	21-25	40-60	0,2
теплый	23-25	22-26	40-60	0,2

Параметры микроклимата в зимнее время поддерживаются системой отопления, летом – вентиляцией или системой кондиционирования помещений.

Вентиляция позволяет осуществлять регулируемый воздухообмен, обеспечивающий нормальные санитарно-гигиенические условия в производственных помещениях.

Таблица 23 – Нормируемое качество воздуха

Сезон года	Категория работы	Температура, С°	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный периоды года	I	20-30	60-40	0,2
	II а	18-20		0,2
	II б	17-19		0,3
	III	16-18		0,3
Теплый период года	I	22-25	60-40	0,2
	II а	21-23		0,3
	II б	20-22		0,4
	III	18-21		0,5

Специфика качественного состава пыли предопределяет возможность и характер ее действия на организм человека. Определенное значение имеют форма и консистенция пылевых частиц, которые в значительной мере зависят от природы исходного материала.

Так, длинные и мягкие пылевые частицы легко осаждаются на слизистой оболочке верхних дыхательных путей и могут стать причиной хронических трахеитов и бронхитов. Степень вредного действия пыли зависит также от ее растворимости в тканевых жидкостях организма. Большая растворимость токсической пыли усиливает и ускоряет ее вредное влияние.

Неблагоприятное воздействие пыли на организм может быть причиной возникновения заболеваний. Обычно различают специфические (пневмокониозы, аллергические болезни) и неспецифические (хронические заболевания органов дыхания, заболевания глаз и кожи) пылевые поражения. Среди специфических профессиональных пылевых заболеваний большое место занимают пневмокониозы - болезни легких, в основе которых лежит развитие склеротических и связанных с ними других изменений, обусловленных отложением различного рода пыли и последующим ее взаимодействием с легочной тканью. Среди различных пневмокониозов наибольшую опасность представляет силикоз, связанный с длительным вдыханием пыли, содержащей свободную диоксид кремния.

Пыль растительного и животного происхождения: с примесью диоксида кремния от 2 до 10%. Величина ПДК 4 мг/м<sup>3</sup>. Класс опасности IV

### **7.1.1.3 Повышенный уровень шума**

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Источниками звуков и шумов являются вибрирующие тела.

Основное физиологическое воздействие шума заключается в том, что повреждается внутреннее ухо, возможны изменения электрической проводимости кожи, биоэлектрической активности головного мозга, сердца и скорости дыхания, общей двигательной активности, а также изменения размера некоторых желез эндокринной системы, кровяного давления, сужение кровеносных сосудов, расширение зрачков глаз. Работающий в условиях длительного шумового воздействия испытывает раздражительность, головную боль, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, нарушение



сна. В шумном фоне ухудшается общение людей, в результате чего иногда возникает чувство одиночества и неудовлетворенности, что может привести к несчастным случаям.

Для уменьшения влияния шума применяют следующие основные методы:

- уменьшение возмущения звуковых колебаний в источнике;
- изменение направленности излучения;
- рациональная планировка помещения;
- звукоизоляция;
- звукопоглощение;
- уменьшение зазоров;
- уменьшения зазоров.

Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука и звукового давления на рабочих местах производственных помещений [5] представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Допустимые уровни звукового давления

Помещения, рабочие места	Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Помещения для инженерно-технического персонала цехов и служб	79	70	68	58	55	52	50	49	60
Помещения для размещения шумного оборудования	94	87	82	78	75	73	71	70	80
Мастерские механические и по ремонту оборудования с собственными источниками шума	99	92	86	83	80	78	76	74	85
Комнаты мастеров механической мастерской, мастеров по ремонту оборудования	83	74	68	63	60	57	55	54	65

Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука приведены в таблице 25.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть средства коллективной (СКЗ) и индивидуальной защиты (СИЗ).

Таблица 25 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука

Уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами [Гц]									Уровни звука в [дБ]
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	60
93	79	70	68	58	55	52	52	49	

К СКЗ относятся:

- 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.

К СКЗ относятся: беруши или наушники

Для расчета уровня шума, возникающего от нескольких источников, используется принцип энергетического суммирования излучений отдельных источников:

Таблица 26 – Уровни шума источников в помещении

Источник шума	Уровни звука в [дБ]
Жесткий диск	45
Вентилятор	50
Монитор	15
Клавиатура	10

$$L = 10 \lg(4 \cdot 10^{0,1 \cdot 45} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 50} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 15} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 10}) = 57,22 \text{ дБА}$$

По расчету получено значение звука в помещении ~57 дБА, которое не превышает предельно установленную величину в 60 дБА

#### 7.1.1.4 Высокое электромагнитное и ионизирующее излучение в помещениях

На протяжении всего момента написания магистерской диссертации, инженер проектировщик подвергается сильному влиянию воздействия электромагнитного излучения, основным источником которого является персональный компьютер.

Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений от монитора компьютера представлены в таблице 27.

Таблица 27 – Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений в соответствии с СанПиНом 2.2.2/2.4.1340-03

Наименование параметров	Допустимое значение
Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг видеодисплейного терминала по электрической составляющей должна быть не более:	
– в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц;	25 В/м
– в диапазоне частот 2 - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока должна быть не более:	
– в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц;	250 нТл
– в диапазоне частот 2 - 400 кГц	25 нТл
Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать	500 В

Длительное воздействие на человека электромагнитных полей промышленной частоты (50 Гц) приводит к расстройкам, которые субъективно выражаются жалобами на головную боль в височной и затылочной области, вялость, расстройство сна, снижение памяти, повышенную раздражительность, апатию, боли в сердце, нарушение ритма сердечных сокращений. Могут наблюдаться функциональные нарушения в центральной нервной системе, а также изменения в составе крови

Для понижения воздействия этих видов излучения необходимо использовать мониторы с низким уровнем излучения, применять защитные экраны.

Одним из распространенных средств защиты от воздействия статического электричества является уменьшение генерации электростатических зарядов или их отвод с наэлектризованного материала, что достигается путем заземления

металлических электропроводных элементов оборудования, увеличения поверхностей и объемной проводимости диэлектриков, установки нейтрализаторов статического электричества (индукционных, высоковольтных, жидких и др.).

Эффективным средством защиты является увеличение относительной влажности воздуха до 65-75%, когда это возможно по условиям технологического процесса.

В качестве средств индивидуальной защиты применяют антистатическую обувь, антистатический халат, заземляющие браслеты.

### **7.1.2 Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения**

Главным опасным фактором при работе в лаборатории с электрооборудованием является поражение электрическим током.

#### **7.1.2.1 Поражение электрическим током**

Электрический ток представляет значительную опасность для здоровья человека непосредственно при контакте человека с токопроводящей поверхностью.

Электробезопасность - система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного действия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Прохождение электрического тока через тело человека вызывает поражение различных органов, оказывает воздействие на нервную систему, кровеносно-сосудистую систему человека, на кровь, сердце, мозг и т.д.

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений, указанных в таблице 7.9 [6].

Таблица 28 – Предельные значения напряжения прикосновения и тока

Род тока	U, В	I, mA
	Не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Виды воздействий электрического тока на организм человека [7]:

1. Термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагрев кровеносных сосудов, сердца, мозга и других органов, находящихся на пути протекания тока до критической температуры;

2. Электролитическое действие тока выражается в разложении крови, что нарушает ее состав и функции;

3. Механическое действие тока проявляется в значительном давлении в кровеносных сосудах и мышечных тканях;

4. Биологическое действие тока проявляется в раздражении живых тканей, что вызывает реакцию организма – возбуждение, что и обуславливает непроизвольное сокращение мышц.

При наиболее неблагоприятном исходе воздействие электрического тока может привести к смерти человека.

На рабочем месте пользователя размещены дисплей, клавиатура и системный блок. Безопасными номиналами являются  $U=12\div 36$  В,  $I=0,1$  А,  $R_{\text{заземления}}=4$  Ом

К общим средствам защиты относят: зануление отключение корпусов, защитные ограждения, заземление, применение безопасного напряжение, предупредительные плакаты, автоматические воздушные выключатели. Ограждением должны закрываться все токоведущие неизолированные части электрических устройств – шины, провода, контакты рубильников, предохранители и т.д.

Перед началом работы следует убедиться в отсутствии свешивающихся со стола или висящих под столом проводов электропитания, в целостности вилки и провода электропитания, в отсутствии видимых повреждений аппаратуры и рабочей мебели.

Для защиты работающих от поражения электрическим током применяют специальные защитные средства: изолирующие, ограждающие и предохранительные. Изолирующие защитные средства изолируют человека от токоведущих частей и делятся на основные и дополнительные. Основные

изолирующие защитные средства обладают изоляцией, способной длительно выдерживать рабочее напряжение электроустановки, и поэтому ими разрешается касаться токоведущих частей, находящихся под напряжением (диэлектрические перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками). Дополнительные изолирующие защитные средства обладают недостаточной электрической прочностью и поэтому не могут самостоятельно защищать человека от поражения электрическим током.

Назначение дополнительных изолирующих средств – усилить защитное действие основных изолирующих средств, вместе с которыми они должны применяться (галоши, боты, коврики, изолирующие подставки).

#### **7.1.2.2. Пожарная безопасность**

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1 - В4, Г и Д, а здания - на категории А, Б, В, Г и Д. По пожарной опасности наружные установки подразделяются на категории Ан, Бн, Вн, Гн и Дн.

Категории взрывопожарной и пожарной опасности помещений и зданий определяются для наиболее неблагоприятного в отношении пожара или взрыва периода, исходя из вида находящихся в аппаратах и помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, особенностей технологических процессов.

Определение пожароопасных свойств веществ и материалов производится на основании результатов испытаний или расчетов по стандартным методикам с учетом параметров состояния (давления, температуры и т.д.).

Допускается использование справочных данных, опубликованных головными научно-исследовательскими организациями в области пожарной безопасности или выданных Государственной службой стандартных справочных данных. Допускается использование показателей пожарной опасности для смесей веществ и материалов по наиболее опасному компоненту.

Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности принимаются в соответствии с таблицей. Определение категорий помещений

следует осуществлять путем последовательной проверки принадлежности помещения к категориям, приведенным в таблице, от высшей (А) к низшей (Д).

Таблица 29 - Категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
А взрывопожароопасная	Горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки не более 28°C в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные парогазовоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа. Вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом в таком количестве, что расчетное избыточное давление взрыва в помещении превышает 5 кПа
Б взрывопожароопасная	Горючие пыли или волокна, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки более 28°C, горючие жидкости в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа
В1-В4 пожароопасная	Горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б
Г	Негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых
Д	Негорючие вещества и материалы в холодном состоянии

#### Виды огнетушителей, их характеристики и назначение

Огнетушитель является простым и в то же время эффективным противопожарным средством, которое борется с очагами пожара, не допуская его распространения. Огнетушители – базовое спецоборудование, с помощью которого можно самостоятельно потушить огонь, не подвергая опасности собственное здоровье и близких людей. Поэтому важно знать классификацию и применение огнетушителей. Более того, по всем правилам пожарной безопасности в каждом офисе, транспортном средстве и на предприятии наличие противопожарного огнетушителя обязательно. Согласно тех же правил пожарной

безопасности каждое помещение в зависимости от уровня пожарной угрозы и площади должно оснащаться определенным количеством огнетушителей. Нормы оснащения помещений огнетушителями приведены в таблицах в конце статьи. Сейчас же мы рассмотрим классификацию огнетушителей по главным признакам и назначение каждого вида по отдельности.

#### Типы огнетушителей

Все огнетушители работают по одному принципу – в рабочем баллоне находится противопожарное вещество, которое под действием давления выпускается через сопло и способствует тушению огня. Есть несколько характеристик, по которым определяют тип огнетушителя и способ его применения.

#### *По объему баллона заполненного рабочим веществом*

Малолитражные ручные (емкостью до 5 литров) Такой огнетушитель преимущественно используется в автомобиле как переносное противопожарное средство

Промышленные ручные (емкостью от 5 до 10 литров), используются на промышленном объекте

Стационарные и передвижные (емкостью от 10 литров и выше), предназначенные для тушения больших очагов пожара

#### *По способу срабатывания*

Ручные. К этому типу относится большая часть всех переносных огнетушителей. Они используются в небольших помещениях, а также хранятся в транспортных средствах. Для их активации необходимо воздействие человека.

Самосрабатывающие. Автоматически активируются при нагревании до определенной температуры или фиксируя появление дыма в помещении. Обычно, такие огнетушители используются в офисах, складах и в промышленности в качестве неотъемлемой части комплексной системы пожаротушения

Комбинированные. Сочетают в себе свойства ручных и самосрабатывающих огнетушителей

#### *По типу пускового устройства*

с пиропатроном



с затвором пистолетного типа  
с затвором вентилем  
с пусковым устройством от постоянного источника давления  
*По способу подачи содержимого баллона наружу*  
под собственным давлением огнетушащего вещества  
под действием газов предварительно закачанных в корпус  
под давлением газов специального баллончика, который располагается в корпусе огнетушителя  
под давлением газов, которые образуются вследствие химической реакции всех компонентов

*По типу активного огнетушащего вещества*  
Порошковые (содержимое порошкового типа)  
Воздушно-пенные (содержимое пенного типа)  
Газовые (содержимое представляет собой газ); делят на углекислотные и аэрозольные.

Жидкостные (содержимое представляет собой жидкость)

Последняя характеристика является главной во всей классификации и определяет назначение средства пожарной безопасности. Поэтому стоит более подробно рассмотреть принцип работы каждого вида огнетушителей.

Принцип работы и назначение огнетушителей

Что бы быть уверенным в правильности использования огнетушителя нужно не только знать его свойства, но и ознакомиться с классификацией пожарных угроз. Гражданские огнетушители свободно доступные в продаже предназначены для тушения пожаров разных классов:

А – при горении твердых веществ;

В – при горении жидких веществ;

С – при горении газообразных веществ;

Е – при горении электрооборудования под напряжением до 1000 В

Таким образом, можно сделать заключение, что наиболее популярными на сегодня есть порошковые огнетушители, которые успешно тушат пожар любого

класса. Для тушения пожаров А,В,С классов наиболее подходят углекислотные и воздушно-пенные огнетушители. И только для гашения простых очагов пожара используют водные огнетушители.

Таблица 30 – Типы огнетушителей и их назначение

Тип	Жидкостные	Порошковые	Углекислотные	Аэрозольные	Воздушно-пенные
Огнетушители	ОВ-1(3) ОВ-8	ОП-5 ОП-8 ОП-2	ОУ-5 ОУ-3 ОУ-10	ВВПА-500 ВВПА-400	ОВП-4 ОВП-8 ОВП-40 (ОВП-50)
Описание	Огнетушащее средство представлено водой и водными растворами химически активных веществ. Также используются поверхностно активные вещества.	Порошки общего и спец. назначения. Основа порошка – минеральные соли. Добавляют также вещества для предотвращения увлажнения и комкования порошка.	Горящее вещество углекислота. При распылении она расширяется в 400 раз, образуя газ. При этом температура понижается до -70 градусов Цельсия.	Горящее вещество представляет собой галогенированные углеводороды, которые образуют при распылении бромистый этил, хладон.	Огнетушащее вещество – пена, которая образуется во время химической или механической реакции водных растворов.
Область применения	Используются только при плюсовых температурах. Назначенные для тушения горящих твердых веществ	Наиболее универсальны Используются во всех типах пожаров.	При тушении пожаров в помещениях, где нежелательно использовать воду.	Хорошо тушат твердые вещества, электрические установки под напряжением. Исключение щелочи и	Предназначенные для тушения средних пожаров. Не рекомендуется использовать при
Класс пожара	А, В	А,В,С,Е	В,С	В,С,Е	А,В,С

Схема плана эвакуации с лаборатории показан на рисунке 25.

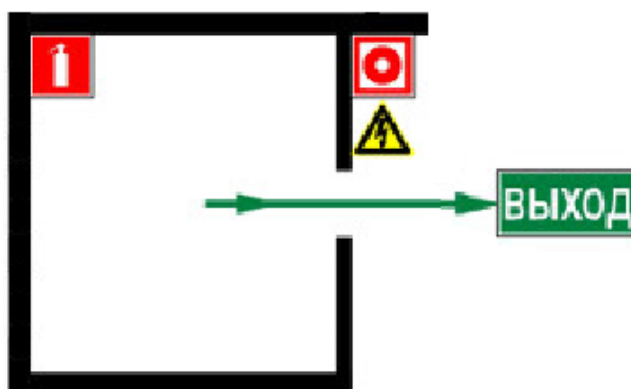


Рисунок 25 – План эвакуации рабочего места при пожаре

### 7.1.2.3 Источник излучения

При работе с источниками излучений необходимо соблюдать нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. В свою очередь необходимо обеспечить радиационную защиту персонала в виде толстых стен и дверей. По этой причине рабочее помещение должно быть оборудовано вытяжкой. Для обеспечения радиационной безопасности при нормальной эксплуатации источников излучения необходимо руководствоваться следующими основными принципами:

- не превышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования);
- поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учётом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

В данном случае персонал относится к группе А и предел получаемой дозы составляет 20 мЗв в год. [СанПиН 2.6.1.2523-09 НРБ 99/2009]

Превышение дозы радиации может привести к угнетению иммунной системы организма и сделать его восприимчивым к различным заболеваниям. При облучении повышается также вероятность появления злокачественных опухолей.

## 7.2 Экологическая безопасность

На рабочем месте специалиста присутствует следующее оборудование: персональный компьютер, бумага. Большая часть бумажных отходов либо утилизируется как макулатура, либо сжигается (документы, содержащие конфиденциальную информацию). В основном, скопившаяся макулатура измельчается с помощью shreddного устройства, прессуется, упаковывается и сохраняется на складе до достижения объемов экономически эффективных для транспортировки, после этого макулатура отправляется для дальнейшей переработки.

Большинство компьютерной техники содержит бериллий, кадмий, мышьяк, ртуть, свинец, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы. При правильной эксплуатации перечисленные металлы не несут опасности для человека и окружающей его среды. Однако при неправильной утилизации вышеперечисленные металлы переходят в органические и растворимые соединения и становятся ядами. Для минимизации отрицательного влияния компонентов компьютерной техники существует специальная процедура утилизации, которая регламентируется Федеральным законом от 10 января 2002 г. №7. Правильно реализованная система утилизации сводит к минимуму перерабатываемые отходы, а также возвращает в производство основные материалы и ценные компоненты. Для этого вышедшую из строя не ремонтируемую оргтехнику разбирают на комплектующие, классифицируют (черный металл, цветной металл, пластмасса) при необходимости прессуют, упаковывают в жесткую упаковку, хранят на складе до накопления экономически эффективного количества при транспортировке и направляют на соответствующие предприятия, утилизирующие вторичные ресурсы.

Осветительные приборы дневного света содержат в себе определенное количество ртути. Поэтому их также называют ртутными, или ртутьсодержащими. Наличие в устройстве токсичного металла диктует особые правила обращения и утилизации люминесцентных ламп. Отходы, содержащие ртуть – это отходы 1 класса опасности. Содержание этого металла в разных видах ртутных

осветительных устройствах варьируется в пределах от 1 мг до 70 мг ртути. Утилизация люминесцентных ламп производится по мере их накопления. Для формирования партии отработанных ламп производится их сбор, накопление и временное хранение. При этом хранение осуществляется в специально выделенном для этой цели помещении, расположенном отдельно от производственных и бытовых помещений, хорошо проветриваемом, защищенном от химически агрессивных веществ, атмосферных осадков, поверхностных и грунтовых вод, двери надежно запираются на замок. Хранят упакованные отработанные ртутьсодержащие лампы в герметичной металлической специальной таре (контейнерах) с табличками «Отход 1 класс опасности. Отработанные ртутьсодержащие лампы». Упаковка ламп по своему назначению классифицируется так: – внутренняя упаковка; – транспортная тара; – средства амортизации и крепления ламп в транспортной таре. Средства амортизации и крепления в транспортной таре (бумага, газеты, полиэтиленовая пленка и т.п., кроме стружки) служат для защиты от ударов при хранении и транспортировании отработанных ламп. Утилизация люминесцентных ламп также производится способом демеркуризации

### 7.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Для кабинета оперативно-дежурной смены, наиболее вероятными и опасными являются следующие чрезвычайные ситуации:

– природные чрезвычайные ситуации (сильные морозы зимой, (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, транспорте));

– техногенные чрезвычайные ситуации (несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место). Сильные морозы могут привести к авариям электроснабжения, теплоснабжения, размораживание труб и другие.

Для предотвращения аварий необходимо осуществлять постоянные проверки, подготовить к использованию резервные источники питания на объектах энергоснабжения, проводить обследование аварийно-опасных участков электросетей и теплосетей, а также проводить инструктаж среди работников, о

рисках возникновения чрезвычайных ситуаций данного характера и действиях при их возникновении.

Из техногенных чрезвычайных ситуаций для рабочего места можно выделить проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии, промышленного шпионажа). Для защиты необходимо организовать систему безопасности, которая включает в себя:

- охрану объекта и доступ к нему (оборудование турникетов и шлагбаумов, установку охранной сигнализации и ее техническое обслуживание, приобретение системы видео наблюдения);

- круглосуточный контроль за ввозом (вносом) и вывозом (выносом) материальных и других ценностей;

- обеспечение общественного порядка на территории; - проведение комплекса предупредительно-профилактических мероприятий по повышению бдительности, направленной на обеспечение безопасности работников;

- установка наружного освещения.

#### **7.4 Перечень нормативно-технической документации.**

Для обеспечения безопасности создаются системы безопасности Российской Федерации. Систему безопасности образуют органы законодательной, исполнительной и судебной властей, государственные, общественные и иные организации, объединения, граждане, принимающие участие в обеспечении безопасности в соответствии с законом, а также законодательство, регламентирующее отношения в сфере безопасности. Это говорит о том, что наше государство гарантирует нам безопасность и помощь при различных чрезвычайных ситуациях. Основными Федеральными законами регламентирующими действия при авариях в административных зданиях являются:

- 1) Федеральный закон от 21.12.1994 N 68-ФЗ (последняя редакция) "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера".

1) Федеральный закон от 30.12.2001 N 197-ФЗ "Трудовой кодекс Российской Федерации" (ред. от 16.12.2019).

2) ГОСТ Р. 12.3.047-2012 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.

3) ГОСТ Р. 22.0.02-94 "Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий" от 22.12.1994 г. N 327.

4) ГОСТ 12.1.003-2014 «Шум. Общие требования безопасности» ССБТ.

5) ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».

6) ГОСТ Р 22.9.05-95 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Комплексы средств индивидуальной защиты спасателей. Общие технические требования» (принят в качестве межгосударственного стандарта ГОСТ 22.9.05-97).

7) ГОСТ 12.1.019-2017 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты». 94

8) ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля».

9) СНиП 23-05-95 Естественное и искусственное освещение (с Изменением N 1).

10) СанПиН 2.2.4.3359-16 "Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах".

11) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы"

## **Заключение**

В ходе исследований, проведенных в рамках выпускной квалификационной работы, была создана математическая модель системы отслеживания шва в сварке электронным пучком. Экспериментально доказана эффективность применения данной модели к любой электронно-сварочной установке. Для простейшего детектора излучения (пластины-детектора) без использования физических фильтров были получены электронные изображения сварных швов, отличающиеся высокой четкостью. Эмпирически доказана независимость сканирования от механических характеристик электронно-сварочной установки. Доказано, что отсутствие источников электронов с необходимой мощностью пучка не является препятствием для получения достаточного качества измерений.



## Список публикаций студента

1. Roman Cherepanov, Maxim Krinitsyn, Vasiliy Fedorov, Maxim Gustomyasov NUMERICAL MODEL FOR SELECTIVE LASER AND ELECTRON BEAM MELTING OF TI POWDER 8th International Conference on Mechanics and Materials in Design. Recent Topics on Mechanics and Materials in Design
2. Roman Cherepanov, Yuriy Dontsov, Maxim Krinitsyn, Vasiliy Fedorov, Maxim Gustomyasov NUMERICAL MODELING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PROTECTIVE PROPERTIES OF 3D-PRINTED SHIELDS REINFORCED WITH ARAMID FIBER AGAINST LOW VELOCITY IMPACTORS 8th International Conference on Mechanics and Materials in Design. Recent Topics on Mechanics and Materials in Design
3. Pushilina N. S. et al. Microstructure and properties of Ti-6.5 Al-3.5 Mo-1.5 Zr-0.3 Si parts produced by electron beam melting //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1115. – №. 4. – С. 042057.

## Список использованных источников

1. Купер Э.А. и др. Автоматизированная система для задания координат шва в установках электронно-лучевой сварки // Автометрия. – 2015. – Т. 51. – № 1. – С. 55–61.
2. Конников С.Г. Количественная растровая электронная микроскопия материалов и структур твердотельной электроники // Научное приборостроение. – 2000. – Т. 10. – № 1. – С. 3–13.
3. Дружинина А.А., Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В. Повышение точности позиционирования по стыку соединения деталей с остаточной намагниченностью при электронно-лучевой сварке // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика Решетнева. – 2014. – № 5. – С. 168–173.
4. Бронштейн И.М. и др. Спектроскопия упругого отражения электронов как эффективный метод диагностики поверхности твердого тела // Известия Российского государственного педагогического университета им. АИ Герцена. – 2006. – Т. 6. – № 15. – С. 151–165.
5. Рау Э.И. и др. Анализ формул для расчета основных характеристик отраженных электронов и сравнение с экспериментальными результатами // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2013. – Т. 77. – № 8. – С. 1050–1050.
6. Новиков Ю.А. и др. Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Труды ИОФАН. – 2006. – Т. 62. – С. 36–76.
7. Зайцев С.В. и др. Оптимизация кольцевых полупроводниковых детекторов обратно рассеянных электронов в РЭМ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2014. – Т. 78. – № 9. – С. 1077–1077.
8. Зайцев С.В. и др. Характеристики и применения полупроводниковых детекторов отраженных электронов в сканирующем электронном микроскопе // Приборы и техника эксперимента. – 2015. – № 6. – С. 51–59.

9. Сизов М.М. и др. Использование языка Сарн для обработки видеосигналов в системе автоматизации электронно-лучевой сварки // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2016. – № 6. – С. 38–43.

10. Беленький В.Я. и др. Электронно-лучевая сварка высокопрочных сталей с бронзой с использованием динамического позиционирования электронного пучка // Сварка и диагностика. – 2014. – № 1. – С. 48–49.

11. Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Электронно-лучевая сварка. Технологические особенности и оборудование: учеб. пособие. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013.

12. Фролов И.С. Погрешность позиционирования луча по стыку при электронно-лучевой сварке разнородных материалов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 1. – № 12. – С. 466–468.

13. Браверман В.Я., Белозерцев В.С., Вейсвер Т.В. Повышение точности позиционирования луча по стыку при электроннолучевой сварке в условиях действия магнитных полей // Сибирский журнал науки и технологий. – 2011. – № 4 (37). – С. 156–160.

14. Саломатова Е.С. Электронно-лучевая сварка – от изобретения до наших дней // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15. – № 1. – С. 57–62.

15. ГОСТ 12.1.005-88ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

16. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г. N 36).

17. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 "Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий" (с изменениями на 15 марта 2010 года).

18. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение.

19. СН 2.2.4/2.1.8.562–96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31 октября 1996 г. N 36).

20. ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов

21. ГОСТ 12.1.019–2009 (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

22. Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681. об утверждении правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде.

23. Федеральный закон “Технический регламент о требованиях пожарной безопасности” от 28.12.2013 г. №123

24. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019), статья 40 «Коллективный договор».

25. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019), статья 22 «Основные права и обязанности работодателя».

26. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019), статья 43 «Действие коллективного договора».

27. Федеральный закон от 31.12.2017 г. № 484-ФЗ «О страховых тарифах на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний на 2018 год и на плановый период 2019 и 2020 годов».

28. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019), статья 237 «Возмещение морального вреда, причиненного работнику».

29. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019), статья 99 «Сверхурочная работа».

30. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019), статья 112 «Нерабочие праздничные дни».

31. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

32. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года).


## Приложение А

### Mathematical simulation of the weld tracking system in electron beam welding

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ81	Густомясов Максим		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов С.П.	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Забродина Ирина Константиновна	к.пед.н., доцент		

### 3 Electron Detector

#### 3.1 Everhart-Thornley Type Secondary Electron Detector (SE)

Everhart-Thornley type secondary electron detector is a detector that is standard on any SEM [1]. Using this detector, images are collected that transmit the surface relief of the sample, since the signal of the secondary electrons is very sensitive to the topography of the surface. Secondary electrons (SE) are electrons that have been knocked out of a sample by a primary electron beam. Secondary electrons have low energy ( $<50$  eV), so the smallest obstacles encountered in the path of the secondary electrons absorb them, which gives rise to the sensitivity of the signal of the secondary electrons to the surface topography.

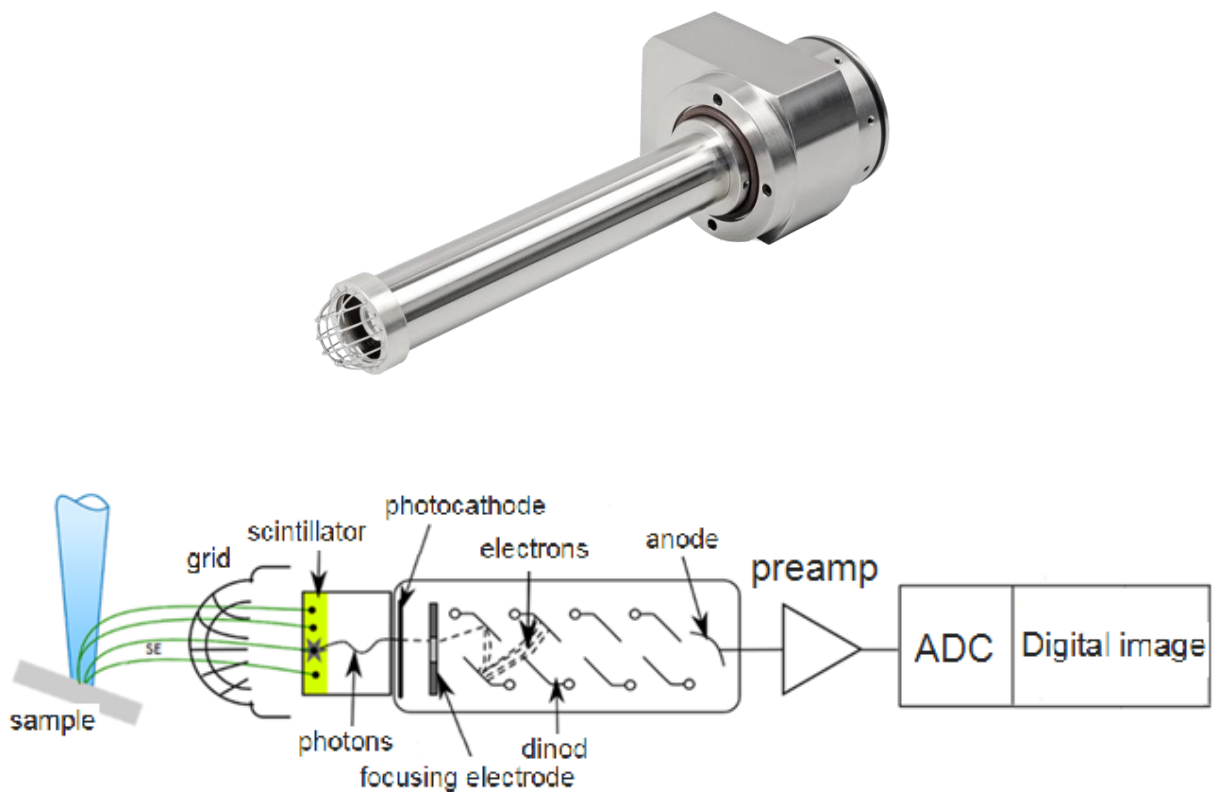


Figure 3 – Appearance and internal structure of a secondary electron detector of the Everhart-Thorneley type

Figure 3 shows the appearance and internal structure of an Everhart-Thorneley-type secondary electron detector. A small positive potential  $\sim +270$  V, which attracts SE

electrons, is applied to the metal grid (collector). This potential has no significant effect on high-energy primary and reflected electrons. The energy of the secondary electrons is too low to excite the luminescence of the scintillator located inside the SE detector, therefore, on the way between the grid and the scintillator, the SE electrons are accelerated by a high voltage of  $\sim 10$  kV applied to the aluminum film covering the scintillator. Accelerated secondary electrons have enough energy to cause a glow that, once it hits the photomodule, is converted into an electrical signal. The signal power or brightness of the corresponding pixel of the digital SE image is determined by the topography of the surface at that point of the sample under study where the electron beam is currently directed.

Properties of images in secondary electrons:

- SE images are primarily images with topographic contrast;
- A characteristic feature of topographic contrast in scanning electron microscopy is the increased brightness from the sharp peaks and protrusions of the relief of the sample surface, which is explained by the increased yield of secondary electrons from these areas;
  - The spatial resolution of a scanning electron microscope is best when recording images in secondary electrons;
  - The secondary electron detector dominates in those applications where relief objects (not thin sections) are studied, for example, in biology, fractography, additive technologies, and in many other fields;

The efficiency of collecting SE electrons by the Everhart-Thornley detector is high, because this detector collects not only those SE-electrons that turned out to be towards the Everhart-Thornley detector, but also those SE-electrons that initially flew out of the sample to the other side, but changed their trajectories thanks to an attractive grid. For comparison, the BSE detector collects only that useful signal whose scattering angle is in the solid angle of the BSE detector. Due to the efficient collection of the useful signal, the image collected by the Everhart-Thornley detector remains bright at almost all positions of the sample table: move the table along the Z axis in a wide range, tilt it in different directions at large angles - the Everhart-Thornley detector will not lose its ability accumulate the SE signal.



### 3.2 Secondary Vacuum Electron Detector (LVSTD)

LVSTD (Low Vacuum Secondary Tescan Detector) is a secondary electron detector designed to study the surface topography of non-conductive current samples without a special conductive coating in low vacuum mode. The detector is also suitable for studying the surface of porous and moisture-containing samples.

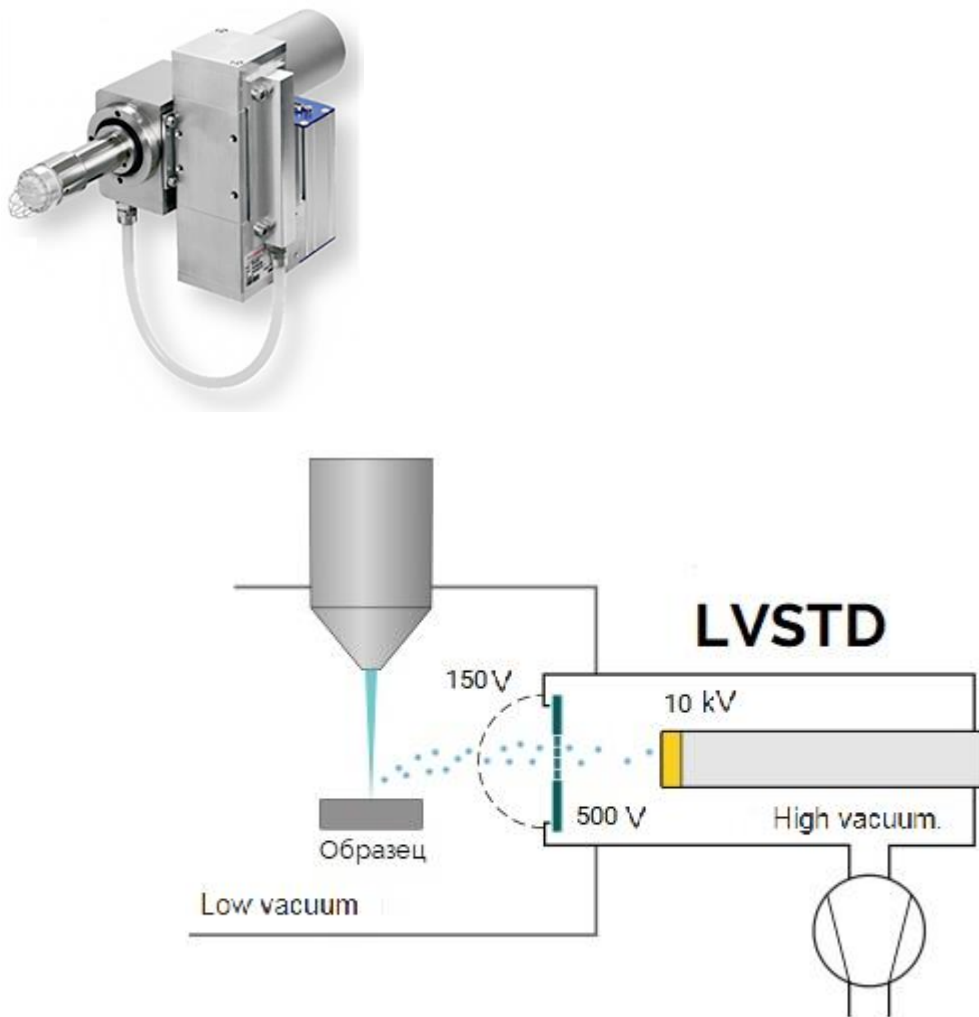


Figure 4 – Appearance (left) and internal device (right) of the low vacuum secondary electron detector LVSTD

The LVSTD detector (Figure 4) is structurally similar to a standard Everhart-Thornley type secondary electron detector, but with the difference that this Everhart-Thornley detector is located in the sample chamber in a separate space inside which a high vacuum is created by pumping out an additional small turbomolecular pump. The

rest of the chamber is in low vacuum, because the low vacuum mode is used. The high vacuum region is separated from the low vacuum region by a thin membrane transparent to secondary electrons. Note: the Everhart-Thornley detector in its classic design does not function in low vacuum mode, therefore, in order not to lose topographic contrast in low vacuum, the LVSTD detector was developed.

### **3.3 Back-Reflected Electron Detectors (BSE)**

A back scattered electrons detector (BSE) [3] is used to observe compositional contrast. Another translation of the BSE detector name is a backscattered electron detector.

Reflected electrons are that part of the primary electron beam that is elastically reflected from the surface of the sample. The property of a material to reflect electrons from itself varies depending on the atomic number; therefore, BSE images make it possible to visualize the difference in the average atomic number between the components of the sample. Moreover, it is known that the brighter an object appears in a BSE image, the higher its average atomic number. Therefore, for instance, if in BSE images you see light inclusions in a darker matrix, then you understand that inclusions consist of something heavier than the matrix.

Since the primary electron beam is directed from top to bottom, and the surface of the sample is usually located horizontally in the SEM chamber, it turns out that the reflected electrons propagate mainly back up to the pole tip of the electron column. Therefore, it is under the lens, that the intracameral BSE detector is located when it is in its working position. The reflected electron detector, unlike the secondary electron detector, does not have an attractive grid, since it does not need it. The energy of BSE electrons is approximately equal to the energy of the electrons of the primary beam (usually the energy of the primary beam is selected in the range of 10 - 20 keV), i.e. the energy of the BSE electrons is high enough so that the BSE electrons can reach the BSE detector without additional stimulation in the form of an attractive grid.

Properties of images in reflected electrons:

- BSE images are primarily images with compositional contrast. Sometimes, with the correct preparation of thin sections, orientational contrast can be achieved;
- the lighter the substance in the BSE image, the heavier it is;
- A BSE detector is commonly used with a WDS or EDS spectrometer for X-ray microanalysis. The BSE detector allows you to visualize microparticles or microinclusions that differ in composition from the environment, and the EDS detector allows you to determine this composition;
- The spatial resolution of the BSE images is slightly worse than the SE images, because the exit area from the BSE sample is slightly wider than the exit area of the SE signal;
- The reflected electron detector dominates in those applications where samples with a polished surface are studied, primarily materials science, geology and mineralogy;

The BSE detector collects only those reflected electrons which fall into a cone formed by the solid angle of the detecting element of the BSE detector after scattering from the surface of the sample. Therefore, the farther the sample is moved away from the BSE detector, the dimmer the BSE image, since the solid angle of signal collection decreases.

TESCAN offers two types of BSE detectors - scintillation and semiconductor.

BSE scintillation detectors:



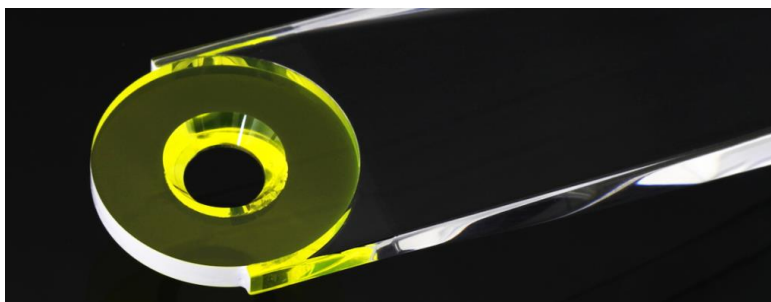


Figure 5. Appearance of a scintillation-type electron detector and a photograph of the scintillator, which is a detecting element

Figure 5 shows a photograph of a scintillation-type back-reflected electron detector and a photograph of its scintillator, which is a synthetic highly sensitive YAG crystal. A ring-shaped YAG single crystal with a conductive coating is placed on the optical axis of the microscope under the lens, a hole in the ring is necessary for the passage of the primary electron beam. Having hit the scintillator of the BSE detector, the reflected electrons cause a flash of light in the scintillator, which is sent through the optical fiber to the photomultiplier and registered there.

Scintillation-type BSE detector options:

- The BSE detector can be fixed under the pole tip of the objective lens or retractable. The latter is better, since the retractable mechanism makes it possible to remove the BSE detector from under the lens if this detector is not used, which allows you to work with other detectors at shorter working distances;
- If the BSE detector is equipped with an extension / extension mechanism, this mechanism can be motorized or manual. Motorized is controlled by a button from the software;
- Low Energy (LE BSE) scintillation BSE detector, which is also sensitive in the low-energy region of the primary beam. The LE BSE detector is capable of detecting BSE images starting from a primary beam energy of 0.2 keV (for ordinary BSE this threshold is  $\sim 3$  keV). See below for more details;
- Scintillation BSE detector with aluminum coating, which is necessary for the simultaneous accumulation of BSE images and cathodoluminescent images using the compact version of the CL detector. An aluminum coating is necessary so that the

luminescence of the scintillator of the BSE detector does not interfere with the cathodoluminescent detector;

Water-cooled scintillation BSE detector is designed for use with tables that allow the sample to be heated to high temperatures. A standard BSE detector could be damaged at high temperatures, and a cooled one could work due to an automatic cooling system with water circulation. The same BSE-detector serves as a protective shield protecting the electron-optical column from thermal radiation coming from the heated sample table.

### **3.4 Semiconductor BSE detector (LE 4Q-BSE):**

The four-segment semiconductor reflected electron detector, as the scintillation type detector, is located under the pole tip of the objective lens and has a manual or motorized movement / extension mechanism. The LE 4Q-BSE detector consists of 4 diodes that symmetrically surround a central hole made to pass the primary electron beam [4]. All four diodes have the same shape and area and are called quadrants. To distinguish quadrants, they are numbered clockwise and marked as Q1, Q2, Q3, Q4.

The LE 4Q-BSE detector allows receiving images with both compositional and topographic contrast. It depends on how the signal from each of the quadrants is mixed (the diode signals are added or subtracted). Four operating modes of the LE 4Q-BSE are offered:

**COMPO** (compositional contrast): Addition of signals from all four quadrants ( $Q1 + Q2 + Q3 + Q4$ ). This combination hides the topographic part of the signal and enhances the compositional

**TOPO** (topographic contrast): addition of signals from two adjacent quadrants and subtraction of signals from two other quadrants ( $Q1 + Q2 - Q3 - Q4$ ). In this case, the compositional contrast, which is the same for each quadrant, is subtracted, and only the topographic contrast remains.

**CUSTOM**: in this mode, the user can add, invert or disable the signal of any quadrant to highlight the necessary information.

**COLOR**: a special pseudo-coloring mode developed by TESCAN, in which the signal from each quadrant is assigned a color from the HSV color model, in which the

color coordinates are hue, saturation, and brightness. The resulting HSV color image is created by adding the signals from all four quadrants according to their color. This approach ensures that neither compositional nor topographic contrast is lost.

In the LE 4Q-BSE detector, the detection element is not a scintillator, but a semiconductor diode, the arrival of BSE electrons into which does not cause a flash of light (as in the case of the scintillator), but the appearance of electron-hole pairs. A blocking voltage comes to the semiconductor diode. The semiconductor layer near the boundary of the pn junction has a high electrical resistivity. Electrons penetrating the detector create new electron-hole pairs. A voltage is applied to the semiconductor crystal, which ensures the collection of all charges formed by back-reflected electrons in the volume of the detector. Under the influence of an electric field, new electron-hole pairs “dissolve”, moving to the detector electrodes. As a result, an electric signal appears in the external circuit of the detector, which is recorded after amplification.

A semiconductor BSE detector, unlike scintillation, can be divided into quadrants, which gives additional methods for generating electronic images (see above). But at the same time, the semiconductor BSE responds more slowly to the input signal than the scintillation BSE, i.e. shows louder pictures at fast scan speeds. And, unlike scintillation BSE, a semiconductor BSE cannot simultaneously work with the infrared illumination of the sample chamber turned on.

Note: the benefits of a Low Energy (LE-BSE) scintillation BSE detector

The LE-BSE detector allows registering back-reflected electrons with high sensitivity and sufficient signal-to-noise ratio while working with low energies of the primary electron beam. A scintillation crystal with a special surface treatment provides increased sensitivity of the LE-BSE detector when operating with an accelerating voltage ( $HV \geq 0.2$  kV) (for normal BSE, this sensitivity threshold is  $\sim 3$  kV). Moreover, in the field of traditionally used medium and high HV, the sensitivity of the LE-BSE detector is not inferior to the sensitivity of a conventional scintillation BSE.

When receiving images in secondary electrons of such non-conductive materials as ceramics, polymers, glass, strong charging artifacts are observed. It is possible to

accumulate images of these problematic materials for SEM at low accelerating voltages and using the LE-BSE detector.

### **3.5 Cathodoluminescent Detectors (CL)**

A cathodoluminescent radiation detector is used to study luminescent materials that emit visible light when irradiated with an electron beam [5].

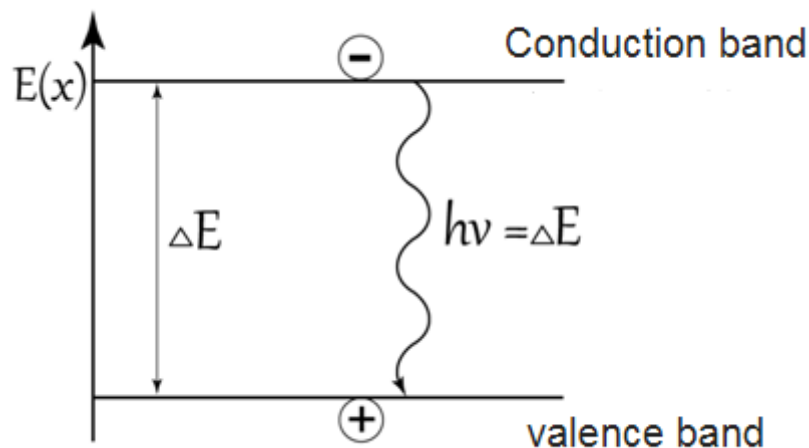
TESCAN produces the following types of CL detectors:

- Panchromatic CL detector with a spectral range of 350 - 650 nm;
- Panchromatic CL detector with an extended spectral range of 185 - 850 nm;
- Rainbow CL color detector with a spectral range of 350 - 850 nm.

Each of the above CL detectors can be compact or solid. Full-weight CL detectors have either a motorized slide / pull device or manual. Compact CL detectors have a manual slide / pull device. In a compact version, the CL detector does not have a parabolic mirror, which reduces its sensitivity. However, in this case there is no conflict between the CL-detector and the BSE-detector for a place under the pole tip of the objective lens; therefore, CL- and BSE-images can be accumulated simultaneously. In the full-fledged version, the CL detector has a parabolic mirror and becomes more sensitive, but either a BSE detector or a CL detector with its massive parabolic mirror can be moved under the electron beam at any time, so BSE and CL images can only be collected sequentially. A parabolic mirror allows you to collect visible light from a large solid angle and direct it into the light guide. The wider the solid angle of collection is, the higher the sensitivity of the CL detector. However, a too large solid angle means that the CL detector is too bulky, which will limit the placement of other devices on the SEM camera, so the developers of CL detectors are looking for compromises.

A panchromatic CL detector collects the total light signal intensity over its entire spectral range. The color CL-detector has four channels: R-, G-, B-channels and

panchromatic channel. Each channel has its own filter installed, passing only a certain



part of the spectral range of CL radiation into the channel.

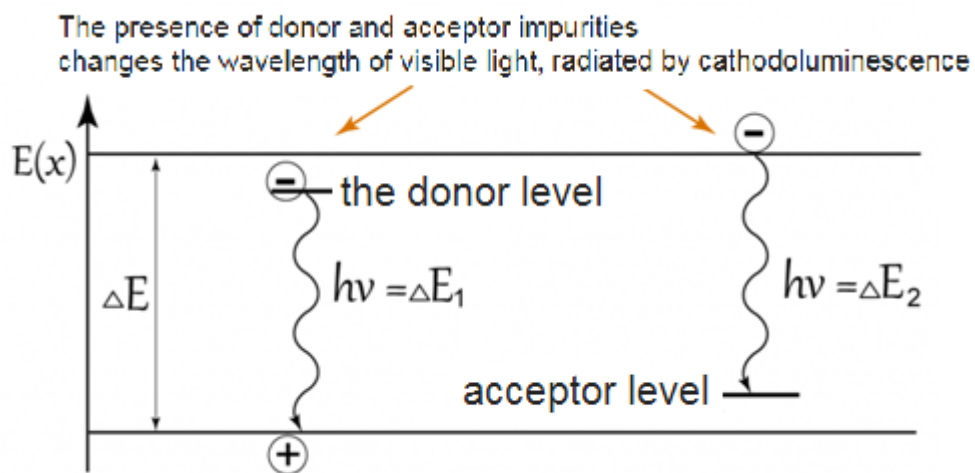


Figure 6. Formation of cathodoluminescent radiation

On the issue of the formation of cathodoluminescent radiation: due to the action of the primary electron beam, the solid electron transferred from the valence band to the conduction band, and with the subsequent recombination of this electron back into the valence band, a photon of visible light (CL radiation) is generated. The photon energy (and hence the shade of CL radiation) changes with the appearance of donor and acceptor sublevels.

Consider the principle of operation of a cathodoluminescent detector. Cathodoluminescence is the ability of a sample to emit visible light when it is irradiated with an electron beam. The principle of the formation of cathodoluminescent radiation is conveniently explained using the band theory of a solid body. There are always free electrons in metals. In semiconductors such free electrons are much less. Most electrons



are in atomic bound states. In order to transfer an electron to a free state in which it easily moves through a solid body, it is necessary to transfer energy to this electron, called activation energy. This additional energy is transmitted by scanning the sample with an electron beam. When an electron passes from a bound state to a free state, then instead of a neutral atom, a positive ion remains - a hole. The process of generation of electron-hole pairs occurs. However, the opposite process is constantly happening in a semiconductor, that is, the capture of liberated electrons by an atom that has lost its electron. This process is called the recombination process. In this process, excess energy is released, which creates additional vibrations of the crystal lattice. The recombination of electrons and holes, leading to the formation of photons, is called radiative and represents the same cathodoluminescent radiation that the CL detector registers (Figure 6a). If a substance has donor or acceptor impurities, then sublevels appear inside the band gap, which means that the recombination of an electron from these sublevels (to these sublevels) will be accompanied by the emission of a photon whose energy will be changed compared to pure matter, which will affect the shade of the cathodoluminescent radiation (figure) 13b). Therefore, the CL signal is interesting in that it is potentially capable of changing hue with the slightest modification of the substance (the appearance of microimpurities, changes in the density of dislocations). For example, zoning of zircons (minerals used in geochronology) is clearly visible in CL images.

CL radiation has the following characteristics that can be detected:

- Light intensity;
- The predominant color of the radiation (since we are talking about radiation in the visible range, then, unlike other ranges of the electromagnetic wave scale, CL radiation has such a characteristic as color);
  - The spectrum of CL radiation, i.e. decomposition of CL radiation by wavelengths;
  - CL signal attenuation rate, which is available for observation if the electron microscope has a fast-acting beam chopper (Beam Blanker);

The dependence of the shape of the CL spectrum on the current of the electron beam or on the energy of the electron beam.

Accordingly, there are different types of CL detectors that differ in what CL information they collect, as well as price.

Panchromatic CL detector. In the direction of the electron beam, it registers the total intensity of the light flux from each point on the surface of the sample. The image is built in black and white, where the brightness in grayscale is proportional to the intensity of the light flux in a given pixel.

Color CL detector (Rainbow CL in the TESCAN line). The same as panchromatic, but in addition to the total intensity, it also detects such a characteristic as the color of CL radiation. CL images are images in real colors (as much as real what is happening in the dark of the vacuum chamber of the microscope).

A CL spectrometer, where each point on the surface of the sample is assigned a CL spectrum decomposed by wavelengths, and not just a color or black and white pixel.

As mentioned above, TESCAN produces panchromatic and color CL detectors, and CL spectrometers are third-party equipment that can be installed on a TESCAN column, as well as on columns of other microscope manufacturers.

### **3.6. Secondary Ion Detector (SITD)**

The secondary ion detector extends the analytical capabilities of TESCAN FIB-SEM double-beam microscopes [6]. The SITD detector allows the detection of positively charged secondary ions (SI) generated by the sample when the sample is irradiated with a primary ion beam (therefore, the SITD detector is installed only on FIB-SEM double-beam microscopes that have a primary ion beam).

The principle of operation of the secondary ion detector is similar to the principle of the well-known secondary electron detector of the Everhart-Thorneley type, with the difference that the SITD additionally has a so-called conversion electrode, hitting which secondary ions generate secondary electrons, and secondary electrons recorded by a detector similar to an Everhart-Thorneley detector. On TESCAN FIB-SEM columns, the Everhart-Thorneley detector and the SITD detector are two different devices that occupy two different ports on the microscope camera (and not one device that inverts its work).

This means that the image from the secondary electron detector of the Everhart-Thorneley type and the image from the SITD detector can be accumulated simultaneously.

The secondary ion signal provides a new type of contrast. Secondary ions are emitted from a very thin surface layer of the sample, so the signal of secondary ions is very sensitive to the surface properties of the sample and this signal is higher, the heavier the material; with the exception of oxides, since oxygen significantly increases the yield of secondary ions, as a result of which the oxides in SITD images become very bright. This makes the SITD detector an ideal tool for detecting corrosion.

The signal of secondary ions is usually weaker than the signal of secondary electrons generated by the primary ion beam; therefore, when working with a STID detector, it is necessary to choose a longer scan time and higher probe currents than when working with an SE detector.

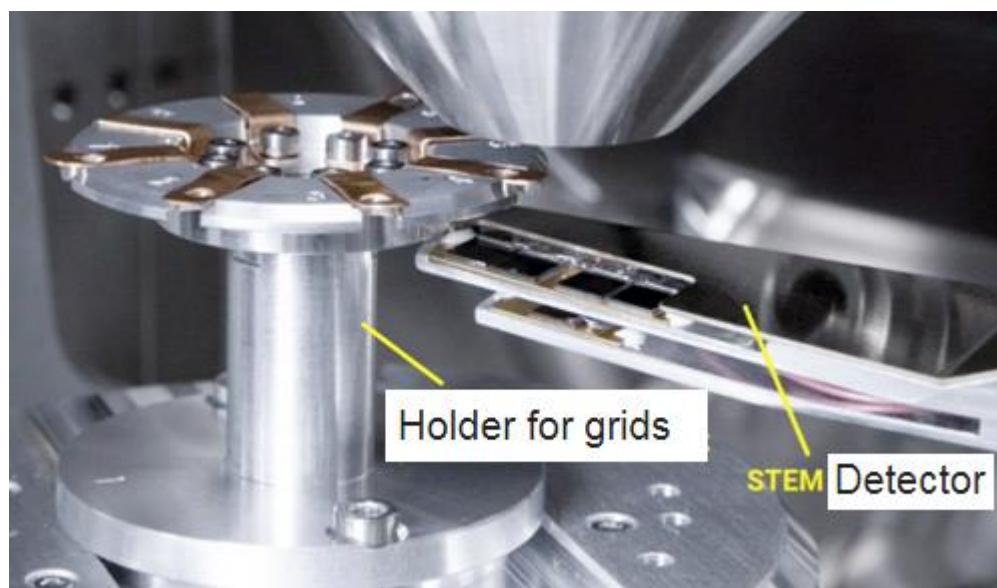


Figure 7. View inside the chamber of SEM samples: an 8-position holder for TEM grids and a retractable HADF R-STEM transmitted electron detector, brought under the mesh sample under study.

The HADF R-STEM transmitted electron detector allows the analysis of thin films and lamellas with high resolution. Examination of samples by transmission electron microscopy using a scanning electron microscope is a popular research method in laboratories that do not have access to a transmission electron microscope. An 8-position holder for TEM grids is supplied with the HADF R-STEM detector (Figure 7).

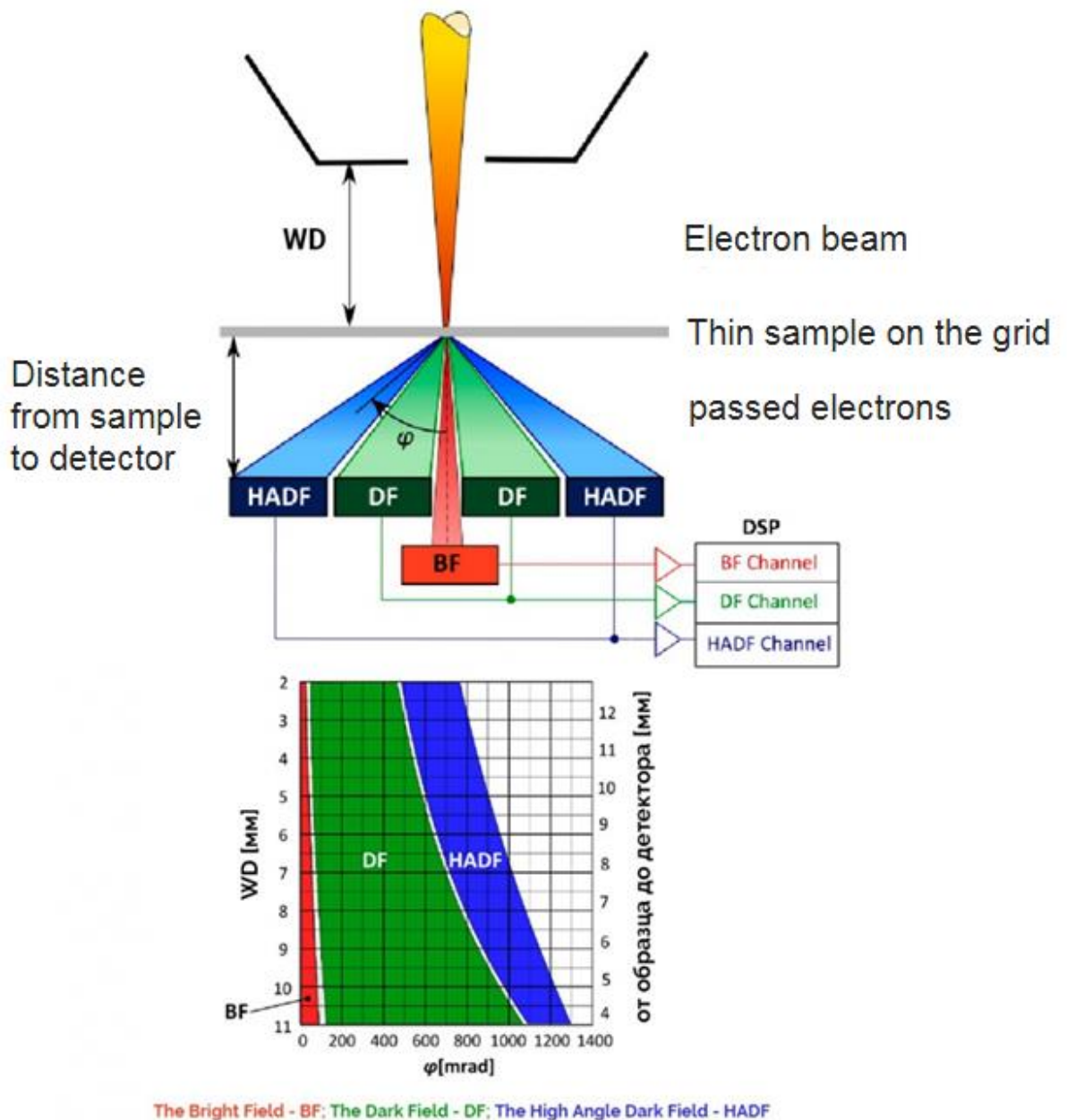


Figure 8 – The location and functionality of the three HADF R-STEM transmitted electron detector sensors: bright field sensor (BF, brightfield), dark field sensor (DF, darkfield) and high angle dark field sensor (HADF, highangledarkfield)

Passed electrons scattered at different angles carry different information about the sample under study (Figure 8):

The image of a bright field (BF, brightfield) conveys contrast caused by the different ability to absorb electrons in the components forming a thin foil; as well as contrast Bragg diffraction;

The image of the dark field (DF) contains partially orientational contrast and partially the contrast of scattering from light elements;

High angle dark field (HADF) images maximize material contrast and minimize Bragg diffraction.

Conveniently, in the design of the HADF R-STEM detector, the sensors and the sample holder are devices that are not interlocked with each other. The fact that the sensors can be pushed under the sample and put forward means that you can collect the signal of the electrons passing through the sample and at the same time move the sample over the detector or observe several samples in the carousel without opening the camera, or change the WD on which the sample is located, and the sensors will not move. Electron scattering angles depend on the material of the sample, the thickness of the foil, and the energy of the primary beam. Also, detector segments receive different batches of scattered electrons depending on the distance from the detector segment to the sample. Therefore, when the working distance WD at which the sample is located changes, while the HADF R-STEM detector remains in a fixed position, this affects the type of signal detected by each segment / channel. By changing WD, one can search for the position of the sample at which the best contrast is achieved.

When obtaining bright field images, the aperture size in front of the BF sensor can be manually selected by switching the lever on the HADF R-STEM detector (which is done with a gloved hand!). Four aperture sizes are available: 1 mm, 500  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  and 100  $\mu\text{m}$ . The smaller the aperture size, the narrower the solid angle of the BF image acquisition, and therefore, the better the contrast when examining light materials.

Also, using the HADF R-STEM detector, you can get an image in pseudo colors (ColorSTEM), where the BF channel corresponds to red, the DF channel to green, and the HADF channel to blue. The ColorSTEM image has a chance to catch subtle variations in the properties of the material (small changes in the ability of the material to scatter electrons) that would remain hidden if the user placed three black-and-white images from the BF, DF and HADF channels in front of him and began to compare them.

## References

1. Mecklenburg M. et al. Electron beam-induced current imaging with two-angstrom resolution // *Ultramicroscopy*. – 2019. – V. 207. – No. article 112852.
2. Jacka M., Zadrazil M., Lopour F. A differentially pumped secondary electron detector for low-vacuum scanning electron microscopy // *Scanning: The Journal of Scanning Microscopies*. – 2003. – V. 25. – No. 5. – P. 243–246.
3. Shcherbakova O.O. et al. Methods of probe microscopy in the study of topography and elastic properties of cold-resistant elastomers // International Conference "Scanning Probe Microscopy"; International Workshop "Modern Nanotechnologies"; International Youth Conference "Functional Imaging of Nanomaterials". – Ekaterinburg, 2018. – Ural Federal University, 2018. – P. 203-204.
4. Gignac L.M. et al. High energy BSE/SE/STEM imaging of 8 um thick semiconductor interconnects // *Microscopy and Microanalysis*. – 2014. – V. 20. – No. S3. – P. 8–9.
5. Guillemette R.N. Electron microprobe techniques // *Methods of Soil Analysis Part 5 – Mineralogical Methods*. – 2008. – V. 5. – P. 335–365.
6. Odom R.W. Secondary ion mass spectrometry imaging // *Applied Spectroscopy Reviews*. – 1994. – V. 29. – No. 1. – P. 67–116.