

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

*На правах рукописи*

**СМОЛЯНСКИЙ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ  
МИКРОФОКУСНОГО ИСТОЧНИКА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ МАЛОГАБАРИТНОГО БЕТАТРОНА  
В РЕНТГЕНОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
Рычков Максим Михайлович

Томск – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕНТГЕНОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ ИЗДЕЛИЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ....</b>	<b>13</b>
1.1. Микрофокусный рентгеновский источник излучения 750 кВ.....	15
1.2. Линейный ускоритель LINATRON.....	18
1.3. Микротрон MIRRORCLE.....	20
1.4. Лазер на свободных электронах FEL.....	23
1.5. Импульсный источник излучения – бетатрон.....	25
1.6. Выводы к главе 1.....	28
<b>ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МИКРОФОКУСНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ БЕТАТРОНА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК .....</b>	<b>30</b>
2.1. Разработка микрофокусных источников излучения на основе малогабаритных бетатронов МИБ-4 и Б-18 .....	32
2.1.1 Изготовление микромишеней из материалов с высокой и низкой плотностью .....	32
2.1.2 Изготовление внутрикамерных гониометров .....	35
2.1.3 Создание экспериментальных камер для бетатронов .....	37
2.1.4 Макеты модифицированных микрофокусных источников излучения на основе бетатронов Б-18 и МИБ-4 .....	41
2.2. Исследование и сравнение угловых характеристик излучения классического и микрофокусных источников.....	46
2.2.1 Угловые распределения излучения в мишени из кремния .....	46
2.2.2 Угловые распределения излучения в микромишени из тантала и классической толстой вольфрамовой мишени .....	49
2.3. Исследование и сравнение интенсивности излучения классического и микрофокусных источников.....	52
2.3.1 Сравнение яркости классического и микрофокусного источников излучения.....	52
2.3.2 Зависимость интенсивности излучения от параметров сброса электронов на микромишень.....	54
2.4 Уменьшение фокусного пятна за счет уменьшения скорости смещения электронов на стандартную мишень .....	56
2.5 Выводы к главе 2.....	61
<b>ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ МИКРОСТРУКТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОФОКУСНОГО ИСТОЧНИКА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....</b>	<b>62</b>
3.1 Определения пространственного разрешения рентгенограмм, полученных с применением микрофокусного источника.....	63

3.2	Косвенный метод исследования размеров фокусного пятна в модифицированном бетатроне с микромишенью .....	72
3.3	Контроль сопряжений поверхностей деталей с использованием микрофокусного тормозного излучения .....	76
3.4	Контроль плоских включений с использованием микрофокусного тормозного излучения.....	82
3.5	Рентгеновский метод фазового контраста и демонстрация применения его для исследования толстостенных изделий .....	87
3.6	Выводы к главе 3.....	95
<b>ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОФОКУСНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ.....</b>		<b>97</b>
<b>С ЦИФРОВЫМ ДЕТЕКТОРОМ.....</b>		<b>97</b>
4.1	Экспериментальная установка.....	97
4.2	Схема эксперимента.....	101
4.3	Результаты радиографии .....	103
4.4	Выводы к главе 4.....	111
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>		<b>113</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>		<b>115</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ В НАУЧНЫЕ РАБОТЫ, ПРОВОДИМЫЕ В РАМКАХ ГРАНТА РНФ .....</b>		<b>126</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ТПУ .....</b>		<b>127</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. «АЛГОРИТМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ФОНА, ОБУСЛОВЛЕННОГО НЕСТАБИЛЬНОСТЬЮ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ».....</b>		<b>128</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Работа посвящена решению фундаментальной научной проблемы - разработке эффективного импульсного микрофокусного источника жесткого тормозного гамма-излучения для промышленной рентгенографии и томографии высокого разрешения. В настоящее время для достижения высокого уровня томографического контроля ответственных промышленных изделий, таких как изделия аэрокосмической техники, морской техники, тяжелого машиностроения, военной техники, изделий нефтегазового комплекса остро необходимы специализированные источники излучения с симметричным фокусным пятном микронного диапазона при высокой мощности экспозиционной дозы (МЭД) и радиационном фоне менее 0,1% от МЭД. Микрофокусные источники являются средствами извлечения уникальной информации о микро- и макроструктуре исследуемых материалов и изделий или о точности их сборки. Качество и объем извлекаемой информации определяются размерами фокусного пятна источника и мощностью дозы излучения. Эти два основных требования являются взаимно противоречивыми.

Для промышленной томографии высокого разрешения широкое распространение получили микрофокусные источники на основе рентгеновских трубок. Но производители рентгеновского оборудования предлагают лишь ограниченный набор устройств, которым присущ целый ряд недостатков, главный из которых – это максимальная энергия, не превышающая 0,75 МэВ. Такие источники позволяют проводить радиографические и томографические исследования небольших объектов с эквивалентной толщиной по стали не более 60 мм. Вместе с тем в мире наблюдается устойчивая тенденция внедрения композитных материалов в авиастроительной, космической, кораблестроительной и автомобильной отраслях. Технология изготовления деталей с использованием композитов позволят производить достаточно крупные изделия целиком (лопасти вертолетов, элементы силовых конструкций самолетов, автомобилей и т.п.). Для

контроля крупногабаритных объектов требуется более проникающее излучение МэВ-ных энергий.

При этом требования к размеру фокусного пятна источника излучения остаются достаточно жесткими, поскольку характерные производственные и эксплуатационные дефекты композитов (ударные повреждения, непроклеи, расслоения, неравномерное распределение матрицы и связующего) требуют проведение исследований с высоким разрешением, что невозможно без применения микрофокусного источника. Для таких исследований необходимы источники на базе ускорителей заряженных частиц, например, линейные ускорители или циклические – микротроны и бетатроны с энергией электронов более 1 МэВ. Источники с такими характеристиками не выпускаются, даже на фоне роста высокоэнергетических линейных ускорителей и бетатронов для целей таможенного досмотра железнодорожных и морских контейнеров, и автотранспорта. Это является основным сдерживающим фактором широкого внедрения высокоэнергетической промышленной томографии.

Результаты исследований получены впервые и не имеют аналогов. В настоящее время нет компактного, недорогого, эффективного, удобного в использовании и экологически чистого микрофокусного источника жесткого тормозного излучения с энергией фотонов выше 1 МэВ. Полученные результаты помогут разработать высокоэнергетические системы цифровой радиографии и рентгеновские томографы высокого разрешения на основе, производимых в Томском политехническом университете (ТПУ), компактных бетатронов на энергию электронов 4-18 МэВ.

#### **Степень научной проработанности темы.**

В патенте Пушина В.С. и Чахлова В.Л. впервые была предложена идея по уменьшению фокусного пятна при разработке циклических ускорителей заряженных частиц, в частности бетатронов. Основная идея заключалась в медленном смещении ускоренных частиц с оптимальной радиальной скоростью на мишень с размерами сечения меньшими размеров сечения электронного пучка.

В работе В.А. Касьянова, А.А. Михальчука, В.С. Пушина, В.В. Романова, А.С. Сафронова, В.Л. Чахлова, М.М. Штейна экспериментальным путем подтверждено уменьшение фокусного пятна у бетатрона МИБ6 до диаметра 0,1 мм, что спровоцировало падение МЭД, значение которой влияет на скорость проведения неразрушающего контроля.

В зарубежных работах YongShun XIAO, Zhiqiang CHEN, Yantao LI, Liang YE рассмотрен линейный ускоритель Linatron, который более широко используется в высокоэнергетической рентгеновской КТ, однако достигаемое пространственное разрешение ограничено размером фокусного пятна источника. Этот предел составляет приблизительно 2 мм, и, как известно, дальнейшее уменьшение затруднено.

Относительно недавно разработан более компактный по сравнению с синхротроном источник гамма-излучения с 40 мкм фокусным пятном и энергией 80МэВ на основе лазерно-плазменного ускорителя. В работах А. Ben-Ismaï, O. Lundh, C. Rechatin, J. K. Lim, J. Faure, S. Corde, and V. Malka описывается значительный вклад в разработку нового типа ускорителей и возможности применения данного источника в радиографии и томографии. Однако в ближайшее время, широкого внедрения такого источника в промышленной томографии ожидать не следует, так как уменьшение размеров установок, снижение их стоимости, повышение дозы излучения и получение настольных рентгеновских лазеров не предвидится.

В области высоких энергий (более 1 МэВ) работы по созданию микрофокусного источника излучения на основе малых мишеней в камере компактного микротрона проводятся в Японии компанией Photon Production Laboratory, Ltd. под руководством профессора Yamada H. Коллективом Yamada H., Hasegawa D., Yamada T., Kleev A.I., Minkov D., Miura N., Moon A., Hirai T. and Naque M. разработаны источники с фокусом 0.2 мм, что значительно меньше размеров фокусного пятна линейных ускорителей с энергией выше 1 МэВ. В последней работе Katsutoshi S. Makoto A. Toshiyuki T. исследователи применили источник для томографического контроля и достигли высокого

пространственного разрешения изображений (200 мкм) при контроле 400 мм алюминия. Однако, следует отметить, что большого распространения такие источники до сих пор не получили, поскольку современные малогабаритные бетатроны, выпускаемые ТПУ обеспечивают фокусное пятно схожих размеров и имеют ряд преимуществ (компактность, простота исполнения, цена) перед компактным синхротроном.

Дальнейшая модернизация малогабаритных бетатронов, заключающаяся в уменьшении фокусного пятна и повышении мощности дозы, обеспечит значительный задел в области создания высокоэнергетических систем цифровой радиографии и томографии и позволит достичь рекордных характеристик для такого класса оборудования. Поэтому можно утверждать, что, по качеству, полученные результаты по проделанной работе находятся на современном мировом уровне.

**Объект исследования** – источник тормозного излучения с энергией фотонов более 1 МэВ и фокусным пятном микронных размеров на основе импульсного ускорителя заряженных частиц - малогабаритного бетатрона.

**Предмет исследования** – формирование рентгенографических изображений высокого пространственного разрешения при контроле микродефектов с применением высокоэнергетического микрофокусного источника жесткого тормозного излучения.

**Цель диссертационной работы** – разработка, исследование и применение микрофокусного источника тормозного излучения с энергией фотонов более 1 МэВ, на основе производимых в ТПУ компактных бетатронов для рентгенографии и томографии высокого разрешения.

Для достижения указанной цели были сформулированы следующие **задачи**:

- Разработать и изготовить макет микрофокусного источника излучения на базе бетатрона с использованием новых эффективных методов уменьшения размеров фокусного пятна.

- Экспериментально исследовать и сравнить основные технические характеристики необходимые для промышленной рентгенографии и томографии модифицированного и классического малогабаритного бетатронов.
- Исследовать и сравнить качество рентгеновских изображений микроструктур экспериментальных объектов из лёгких и тяжелых материалов, полученных с применением классического и модифицированного источников излучения.
- Экспериментально исследовать формирования абсорбционного и фазового контраста увеличенных рентгеновских изображений микроструктур в объектах из легких, тяжелых и композитных материалов при использовании микрофокусного излучения.
- Создать опытный образец рентгенографической цифровой системы на основе высокоэнергетического микрофокусного источника излучения для контроля крупногабаритных изделий с достижением повышенного пространственного разрешения, высокой чувствительностью и скоростью контроля.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в том, что

- Реализован макет источника излучения с горизонтальным размером фокусного пятна в пределах 13 и 50 мкм в диапазоне энергий фотонов от нескольких КэВ до 18 МэВ за счет изготовления мишеней микронных размеров и экспериментальных камер с внутренними гониометрами.
- Повышена в 11 раз яркость источника тормозного излучения за счет уменьшения размеров фокусного пятна, вследствие чего увеличен контраст и пространственное разрешение рентгеновских изображений.
- Получены результаты рентгеновского контроля экспериментальных образцов из композитных и плотных материалов (до 50 мм стали) обеспечивающие высокую выявляемость продолговатых дефектов шириной до 10 мкм с применением микрофокусного источников излучения.



- Экспериментально исследовано формирование рентгеновского изображения методом фазового контраста в неисследованной до сих пор области жесткого гамма-излучения с энергиями свыше 1 МэВ.
- Создан опытный образец высокоэнергетической рентгенографической системы на базе микрофокусного малогабаритного бетатрона для контроля крупногабаритных, толстостенных объектов с высокой чувствительностью (1,6%) и скоростью (10 мм/с) контроля.

**Практическая ценность** работы состоит в том, что на основе полученных результатов диссертационных исследований, стало возможным создать компактный, недорогой, эффективный, удобный в использовании и экологически чистый микрофокусный источник жесткого тормозного излучения с энергией фотонов выше 1 МэВ и использовать его в промышленной томографии и рентгенографии.

#### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты исследований использованы при выполнении гранта РНФ 17-19-01217 «Новый микрофокусный источник тормозного гамма-излучения на основе компактного бетатрона с внутренней микромишенью для томографии высокого разрешения.», 2017-2019 гг.

#### **Методы исследования**

При выполнении настоящей работы использованы экспериментальные методы исследований, основанные на физических принципах взаимодействия высокоэнергетического рентгеновского излучения с веществом и его регистрацией. Анализ результатов измерений проводился с помощью численных и статических методов обработки экспериментальных данных и специализированного программного обеспечения, таких как Isee!, ImageJ, OriginPro, Microsoft Excel.

**Личный вклад автора** состоит в выборе используемых методов исследований, подготовке и проведении экспериментальных и численных исследований, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировке заключений и выводов, подготовке научных публикаций по теме исследования, определении перспективных направлений дальнейшего развития диссертационных исследований.

**Положения, выносимые на защиту:**

– Модифицированный малогабаритный импульсный источник излучения с уменьшенным до микронных размеров фокусным пятном с энергией фотонов  $> 1$  МэВ.

– Экспериментальные результаты исследований, важных для рентгенографии и томографии, характеристик модифицированного источника тормозного излучения и сравнение их с прототипом.

– Экспериментальные результаты по обнаружению микродефектов в композитных и плотных материалах. Исследование оценки качества рентгеновских изображений при использовании классического и микрофокусного источников излучения с энергией фотонов  $> 1$  МэВ.

– Экспериментальные результаты исследований формирования абсорбционного и фазового контраста увеличенных изображений микроструктур с использованием микрофокусного источника излучения с энергией фотонов  $> 1$  МэВ.

– Опытный образец оптимизированной рентгенографической системы для контроля крупногабаритных и толстостенных изделий промышленного назначения с высокой чувствительностью контроля и скоростью сканирования.

**Достоверность и обоснованность результатов** обеспечивается экспериментальными подтверждениями выдвинутых положений, применением математических способов обработки экспериментальных данных, использованием сертифицированного оборудования, а также достаточным объемом проведенных экспериментальных исследований.

### **Апробация работы**

Материалы, вошедшие в диссертацию, были обсуждены на следующих российских и международных конференциях:

– VI Всероссийская научно-практическая конференция "Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность", г. Томск, 23-27 мая 2016 г.

– VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении», г. Юрга, 18-20 мая 2017 г.

– IV международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле «SibTest 2017», г. Новосибирск, 27-30 июня 2017 г.

– VI Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» г. Томск 9–14 октября 2017.

– 3th International Conference on High Energy Physics», Rome, Italy, December 11-12, 2017.

– 18th International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter (EFRE-2018), Tomsk, Russia, 16-22 September 2018.

– 8th International Conference Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena (Channeling 2018), Ischia (NA), Italy, September 23-28, 2018.

– V международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле «SibTest 2019», г. Екатеринбург, 26-28 июня 2019 г.

– «31th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions» (ICPEAC 2019), Deauville, France, July 23-30, 2019.

### **Публикации**

Основные результаты диссертационных исследований отображены в 24 работах, в том числе 7 статей в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, из них 3 статьи в изданиях, включенных в списки ВАК, 7 статей в зарубежных журналах, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, 9 тезисов в материалах Международных и Всероссийских научных конференций, 1 ноу-хау.

### **Структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка цитируемой литературы, содержащего 115 библиографических ссылок. Общий объем диссертации содержит 128 страниц, включая 66 рисунков и 9 таблиц.

## **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕНТГЕНОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ ИЗДЕЛИЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ**

Рентгенография является широко используемым методом для исследования и контроля качества как простых, так и сложных объектов. Также для неразрушающего исследования качества и точности изделия все большее внедрение получает рентгеновская компьютерная томография (КТ) [1]. КТ вызывает растущий интерес в обрабатывающей промышленности [2], поскольку она позволяет измерять как внешние геометрические характеристики, так и внутренние особенности геометрии продукта [3]. Производительность ключевых компонентов для рентгеновской КТ постоянно улучшается, а стоимость снижается, в связи с этим рентгеновская томография все чаще становится основным методом контроля качества, отработки технологических решений, обратного проектирования, контроля сборочных операций при производстве сложных изделий ответственного назначения [4-9].

Промышленная рентгеновская вычислительная томография в настоящее время значительно усовершенствована, что позволяет собирать и использовать трехмерные объемные данные для визуализации и анализа качества сборки, проверки геометрии и выявления внутренних дефектов или повреждений, определения пористости и материала промышленных изделий. Несколько производителей также запустили многомерную рентгеновскую КТ, которая гарантирует прослеживаемость измерений. [10–14]. Размерная рентгеновская КТ обычно классифицируется как микрофокусная КТ, оснащенная рентгеновской трубкой, имеющей максимальное напряжение трубки от 80 кВ до 450 кВ. Это ограничивает максимальную длину проникновения примерно до 50 мм или 250 мм в зависимости от сканируемого объекта из стали или алюминия.

Чтобы сканировать более крупные объекты, требуется источник рентгеновского излучения со значительно более высокой проникающей способностью. Одним из способов достижения этого является использование

линейного ускорителя, лазера на свободных электронах, микротрона и бетатрона [15-32]. Однако, практическое применение находят только линейные ускорители и бетатроны [33-40]. Системы, использующие эту технологию, классифицируются как рентгеновские КТ высокой энергии и были применены для компьютерной томографии крупногабаритных объектов, например, всего кузова автомобиля [41].

В тоже время существует растущий спрос на системы, которые могут выявлять микродефекты и определять внутреннюю геометрию сложных деталей [3] и гарантировать контроль качества отдельных компонентов и их сборки в аддитивном производстве [42]. Современные технологии производства обеспечивают постоянный рост размерности и сложности таких изделий. Например, аддитивные технологии (Direct Metal Printing, Selective Laser Melting) [43,44] позволяют получать за один технологический процесс изделия из высокопрочных и высокоплотных материалов габаритами до 500x500x500 мм с разнородной внутренней и внешней структурой. Технология изготовления деталей с использованием композиционных материалов позволят производить достаточно крупные изделия целиком (лопасти вертолетов, лопасти ветровых турбин, элементы силовых конструкций самолетов, автомобилей и т.п.). Точность измерения очень важна для этих применений, однако КТ высокой энергии все еще ограничена пространственным разрешением до миллиметра.

Пространственное разрешение является ключевым показателем работоспособности системы КТ, которая сильно зависит от размера фокусного пятна излучения [45]. Для низкоэнергетического медицинского сканирования и биомедицинской инженерии современные рентгеновские аппараты могут обеспечить малое пятно для достижения так называемой микро-КТ с пространственным разрешением до десятков микрон [46-48]. А высокоэнергетическая КТ нуждается в источнике тормозного излучения, которое генерируется быстрыми электронами, взаимодействующими с мишенью с высоким атомным номером [49-51]. Однако обычные линейные ускорители генерируют излучение с энергией свыше 1 МэВ с размерами пятна в

миллиметровом масштабе, что ограничивает пространственное разрешение промышленных систем [49, 52, 53].

### 1.1. Микрофокусный рентгеновский источник излучения 750 кВ

Разработанный в 2014 году источник рентгеновского излучения NIKON METROLOGY 750 кэВ [54] с размером пятна микронного уровня (рисунок 1) - это мощное устройство для неразрушающего контроля или измерения крупных и плотных объектов, включая двигатели, лопадки турбин и крупные композитные детали, с «беспрецедентным» разрешением. По словам разработчика, это единственный доступный микрофокусный источник с энергией 750 кэВ, который обеспечивает превосходное разрешение и точность по сравнению с традиционными источниками с малым фокусным пятном.

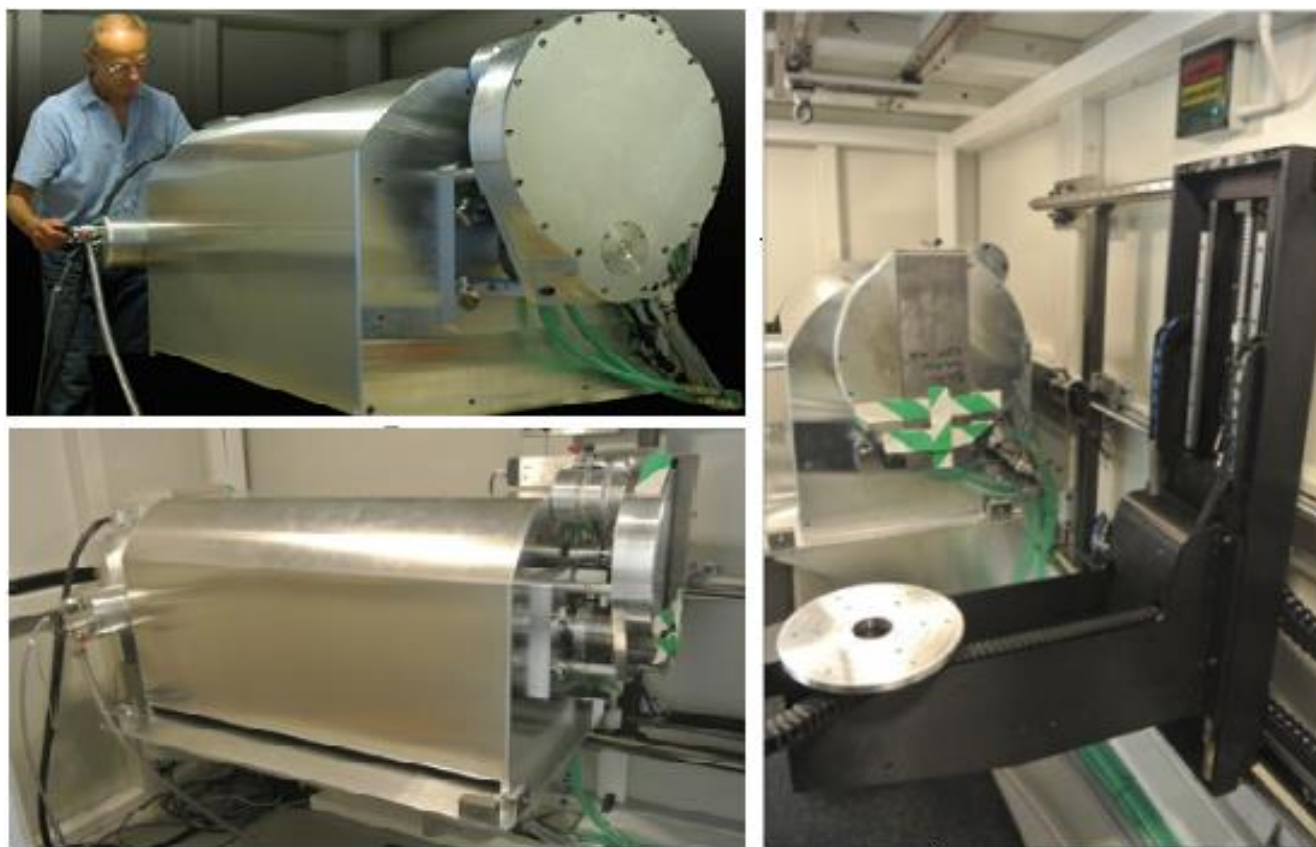


Рисунок 1 – Микрофокусный рентгеновский источник излучения  
Nikon Metrology 750 кэВ

Опыт, накопленный за 25 лет, позволяет Nikon Metrology [55] предоставлять инновационные решения в соответствии со спросом и предложением, а рентгеновские источники спроектированные и изготовленные собственными силами являются основой для промышленной микрофокусной рентгеноскопии и компьютерной томографии.

Источник с энергией 0,75 МэВ имеет размер пятна от 30 до 50 мкм в зависимости от мощности, по меньшей мере, в 10 раз меньше, чем у соответствующих минифокусных источников, что обеспечивает лучшие в отрасли показатели для контроля деталей высокой плотности с непревзойденной точностью и разрешением. Благодаря интеграции генератора высокого напряжения в вакуумную камеру высоковольтные кабели и связанные с ними проблемы устраняются. А благодаря своей конструкции с открытой трубкой с заменяемыми пользователем катодами, источник имеет практически неограниченный срок службы при очень низких затратах на техническое обслуживание.

Существует баланс между мощностью рентгеновского излучения и размером пятна. Высокая мощность генерирует тепло, и в случае, если мишень будет получать высокий уровень мощности, начнут появляться дыры в мишени. Поэтому ключевым элементом источника является уникальная высокоскоростная вращающаяся мишень, которая позволяет источнику работать на максимальной мощности с точным размером пятна. С вращающейся мишенью, электронный пучок падает на движущуюся поверхность, следовательно, мощность электронного пучка может быть значительно увеличена без вредного теплового воздействия и увеличения размера пятна.

Источник 750 кэВ предназначен для неразрушающего контроля и метрологии КТ лопаток малых и крупных турбин, автомобильных алюминиевых отливок, прецизионных компонентов высокой плотности, используемых в высокотемпературных и высоконапорных приложениях (турбонагнетатели, компрессоры и т. д.), также для компонентов из углеродного волокна, таких как лопасти для вертолетов или реактивных двигателей (рисунок 2).



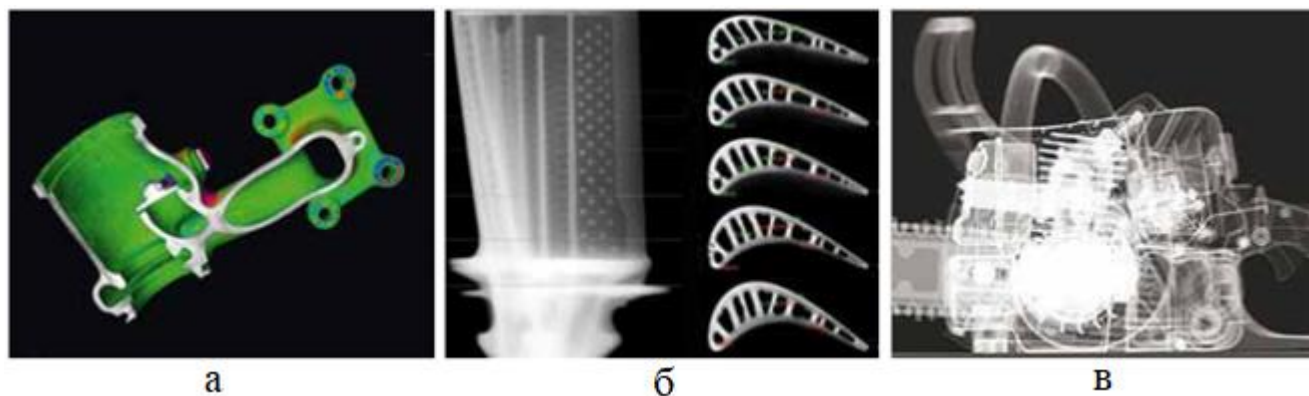


Рисунок 2 – Результаты рентгеновского и томографического контроля: а) - лопатка турбины, б) - алюминиевая отливка, в) бензопила

Этот уникальный источник обеспечивает достаточную мощность проникновения и точность контроля. Типичные значения проникновения материала составляют 160 мм для алюминия и 60 мм для стали. Подробные характеристики рентгеновской микрофокусной трубки представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Технические характеристики микрофокусной трубки Nikon Metrology 750 кэВ.

Тип источника	микрофокусная трубка 750кВ с интегрированным высоковольтным генератором
Рабочее напряжение	150 - 750 кВ
Рабочая мощность	0 – 750 Вт
Рабочий ток	0 – 1,5 мА
Рабочий цикл	непрерывный
Размер фокусного пятна	30 мкм при 750 кВ, 200 Вт
Расстояние от фокусного пятна до объекта	минимум 38 мм
Габаритные размеры (ШхДхВ)	800x1600x800 мм
Максимальная просвечиваемая толщина	примерно 160 мм для алюминия; примерно 60 мм для стали

## 1.2. Линейный ускоритель LINATRON

В сравнении с рентгеновской трубкой, высокоэнергетический линейный ускоритель Linatron (также известные как Linac) [56], обладает преимуществами высокой проникающей способностью, средней чувствительностью обнаружения дефектов и может удовлетворять потребности в проверке больших сложных конструкций. При количественном измерении с визуализацией изображения промышленный КТ с высокой энергией является наиболее совершенным методом неразрушающего контроля, который может удовлетворять требования высокоточного обнаружения миллиметровых дефектов крупногабаритной детали.

С 2013 года центр разработки Fraunhofer X-ray Technology в Фюрте (Fraunhofer EZRT) эксплуатирует уникальную в Европе систему рентгеновской компьютерной томографии «XXL-СТ» для очень крупных объектов (VLO) [57]. В качестве источника рентгеновского излучения используется линейный ускоритель LINAC 9 МэВ от Siemens. Верхний порог в 9 МэВ ограничивает образование нейтронов за счет активации облученного материала, а также образования озона до незначительного уровня. Этот LINAC M9 может работать при 4 различных уровнях энергии рентгеновского излучения, то есть 4.6, 5.0, 6.7 и 9 МэВ [58]. Максимальная мощность дозы 12 Гр / мин на расстоянии 1 м от фокусного пятна. Средняя энергия фотонов спектра составляет около 2 МэВ и позволяет просвечивать объекты из алюминия до 70 см, чугуна до 30 см или свинца до 10 см. Основной областью применения является локальная рентгенография и КТ объектов с большими размерами до 5 м, например, полностью смонтированные реактивные или ракетные двигатели, части крыльев и ребер самолета, лопасти несущего винта, комплектные вагоны и шасси автомобиля, а также морские грузовые контейнеры [32, 41] (рисунок 3).

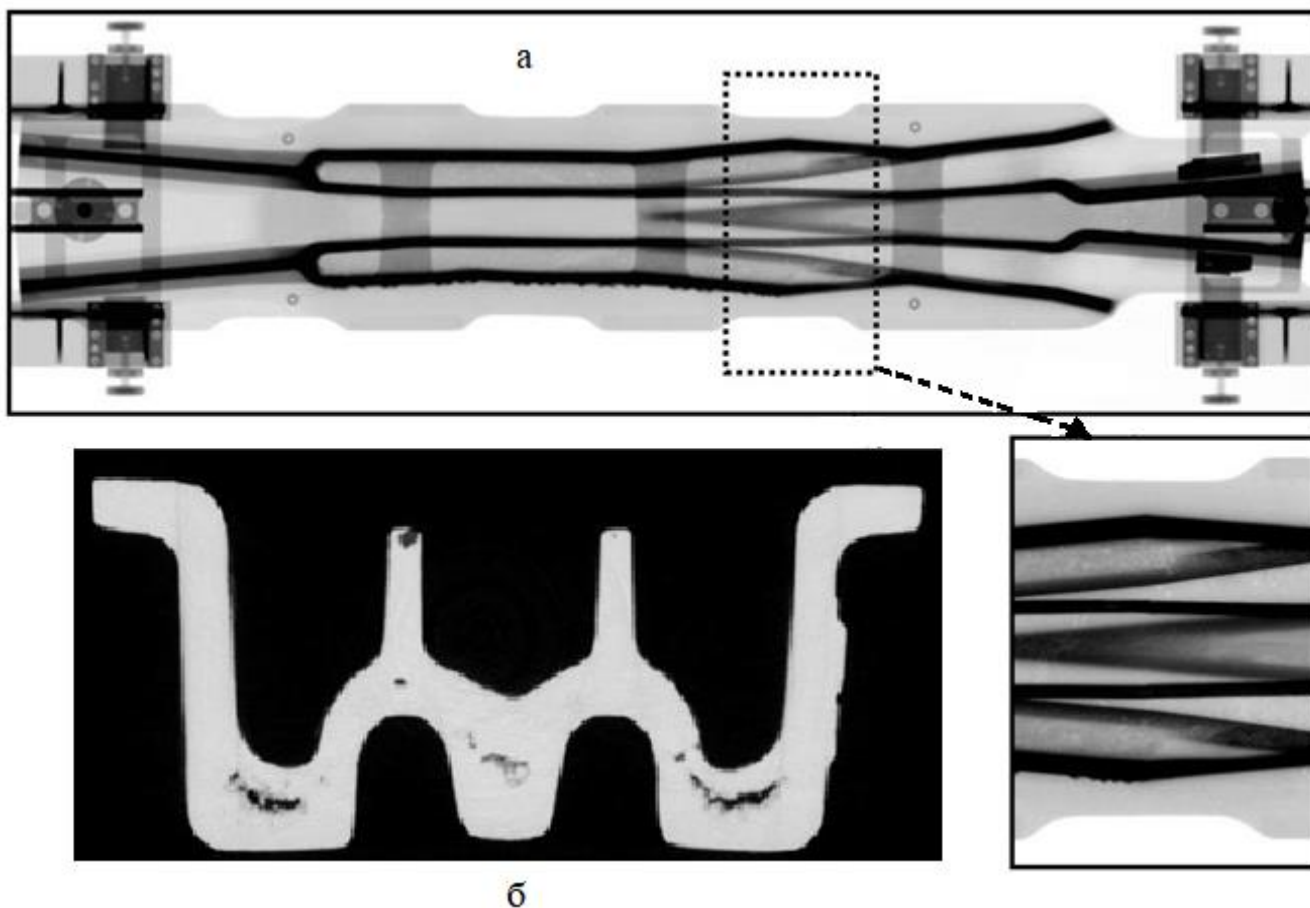


Рисунок 3 – Рентгенография (а) и томография (б) железнодорожной лягушки

Помимо XXL-СТ в Европе имеется несколько КТ-установок, в которых в качестве источника фотонов используются LINAC с энергией электронов от 2 МэВ до 15 МэВ, высокой мощностью дозы от 200 до 12000 рад/мин и с фокусным пятном менее 2 мм, размеры которого являются ключевым фактором, влияющим на качество изображения системы. Ускорители заряженных частиц работают в импульсном режиме, а коэффициент заполнения составляет менее 1/1000. Мгновенные дозы в течение одного периода облучения более чем на три порядка выше, чем источник непрерывного рентгеновского излучения, если средняя мощность дозы аналогична. Эта техническая характеристика источника рентгеновского излучения LINAC очень важна для улучшения отношения «сигнал / шум» (ОСШ) и качества изображения. Благодаря своей высокой энергии линейные ускорители могут использоваться для сканирования очень толстых и

высоко поглощающих деталей, вплоть до метров бетона или 400 мм стали. Например, на рисунке 4 показан линейный ускоритель, используемый для неразрушающего контроля крупных стальных отливок, его технические характеристики приведены в таблице 2.



Рисунок 4 – Линейный ускоритель LINAC, используемый для неразрушающего контроля крупных стальных отливок

Таблица 2 - Технические характеристики линейного ускорителя LINAC Mi9

Тип источника	Linatron Mi9
Энергия ускоренных электронов	5-9 МэВ
Мощность дозы тормозного излучения	6-30 Гр/мин
Рабочий цикл	непрерывный
Размер фокусного пятна	2-4 мм
Расстояние от фокусного пятна до объекта	минимум 300 мм
Габаритные размеры (ШхДхВ)	610x1650x930 мм
Максимальная просвечиваемая толщина	Не менее 380 мм стали

### 1.3. Микротрон MIRRORCLE

MIRRORCLE ANALYSIS CENTER, Ltd. реализовали настольный синхротрон MIRRORCLE (ESR) используя результаты многолетних исследований, проведенных профессором Хиронари Ямада [36, 59]. Благодаря

ему удалось уменьшить габариты синхротрона (такого как SPring-8) с диаметром 300 м до небольшого настольного микротрона с минимальным размером 0,4 м.

MIRRORCLE - это новый тип источника рентгеновского излучения с характеристиками как крупномасштабного синхротронного устройства (SLS), так и рентгеновской трубки (рисунок 5). Он генерирует инфракрасный, ультрафиолетовый (EUV), мягкие и жесткие рентгеновские лучи от 10 КэВ до 20 МэВ, имеет широкий конус излучения и фокусное пятно размером до 100 мкм. Это достигается путем использования мишеней размером сопоставимым с размером фокусного пятна. Мишени из легкого и тонкого материала создают контраст поглощения и преломления на рентгеновских изображениях благодаря более низкой энергетической составляющей (<60 кэВ), а мишени из тяжелых и толстых материалов создают контраст поглощения в более высокой энергетической составляющей. Развитие источника продолжается, доза рентгеновского излучения была увеличена примерно в десять раз по сравнению с существующим моделями Mirrorcle-CV1/-CV4.

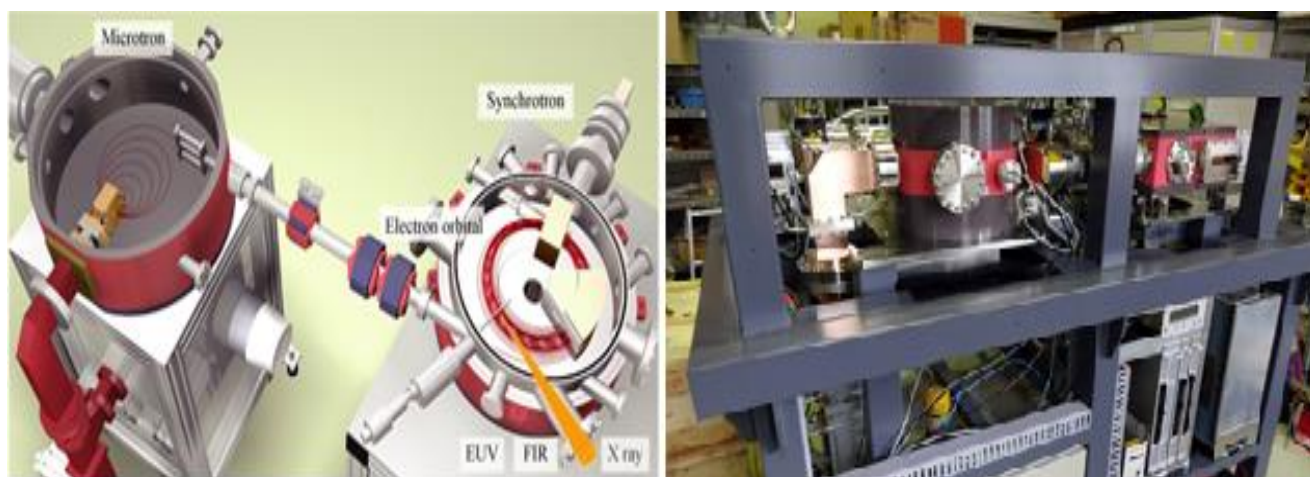


Рисунок 5 – Настольный синхротрон MIRRORCLE (ESR)

Первая в мире рентгеновская КТ на основе источника излучения Mirrorcle-CV4L с высоким разрешением до 200 мкм (рисунок 6) и энергией более 1 МэВ описывалась в недавних исследованиях [23]. Данная установка применялась для анализа с высокой точностью дефектов в крупных автомобильных деталях,



аккумуляторных батареях и топливных элементах. Также установка позволяет измерять мелкие дефекты и размеры сборок сложных конструкций из тяжелых металлов и формованных изделий, изготовленных на 3D-принтере, которые считаются трудными для проверки.

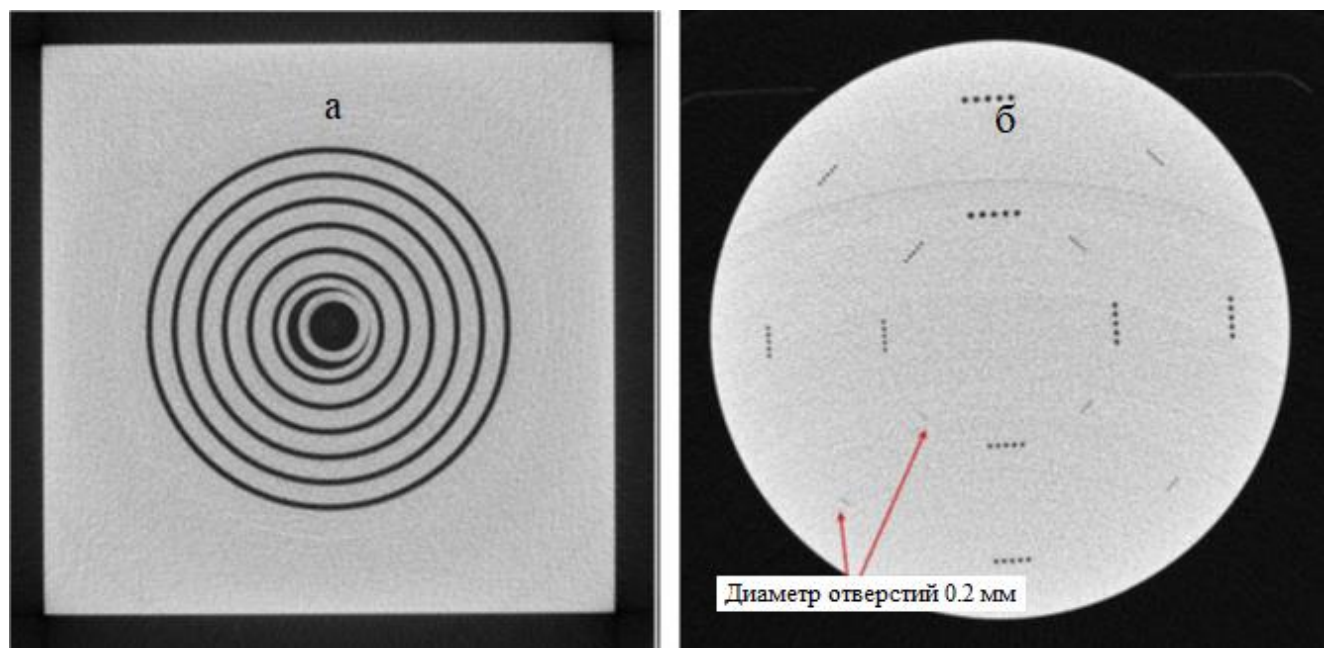


Рисунок 6 - Томография экспериментальных образцов с пространственным разрешением до 200 мкм: а) - алюминиевый блок размером 400 мм по диагонали и зазорами 1 мм, б) - стальной круг диаметром 10 см с отверстиями до 200 мкм.

Технические характеристики настольного синхротрона приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Технические характеристики MIRRORCLE- CV4L

Наименование источника	MIRRORCLE-CV4L
Энергия ускоренных электронов	3,5 МэВ
Мощность дозы тормозного излучения	0,1 Гр / мин
Утечка мощности дозы	Менее 0,01 Гр / мин
Рабочий цикл	импульсный
Размер фокусного пятна	диаметр 100 мкм
Угол веерного луча	15°
Расстояние от фокального пятна до объекта	минимум 250 мм
Габаритные размеры (ШхДхВ)	более 1 м в длину и ширину
Максимальная просвечиваемая толщина	не менее 100 мм стали

### 1.4. Лазер на свободных электронах FEL

С быстрым развитием лазерных технологий, лазерное ускорение в кильватере [51] (LWFA) стало новым потенциальным способом генерирования высокоэнергетических электронных пучков с превосходным качеством пучка. Нелинейное поведение плазменной волны позволяет генерировать быстрые электронные пучки в плотной плазме длиной всего несколько миллиметров [60], что демонстрирует эффективность лазерных ускорителей в качестве компактных источников энергетических электронов и излучений следующего поколения [61, 62]. В настоящее время, высококачественные электронные пучки могут быть воспроизведены непрерывно с максимальной энергией от нескольких сотен МэВ до нескольких ГэВ [63 – 67]. Из-за сильных магнитных и электрических полей как при ускорении, так и при фокусировке, которые в тысячи раз больше, чем достижимые в обычных ускорителях, поперечный и продольный размеры электронного сгустка чрезвычайно малы (несколько мкм) и сопоставимы с размером фокусного пятна лазера ( $\sim 10$  мкм) и длительность импульса ( $\sim 10$  фс).

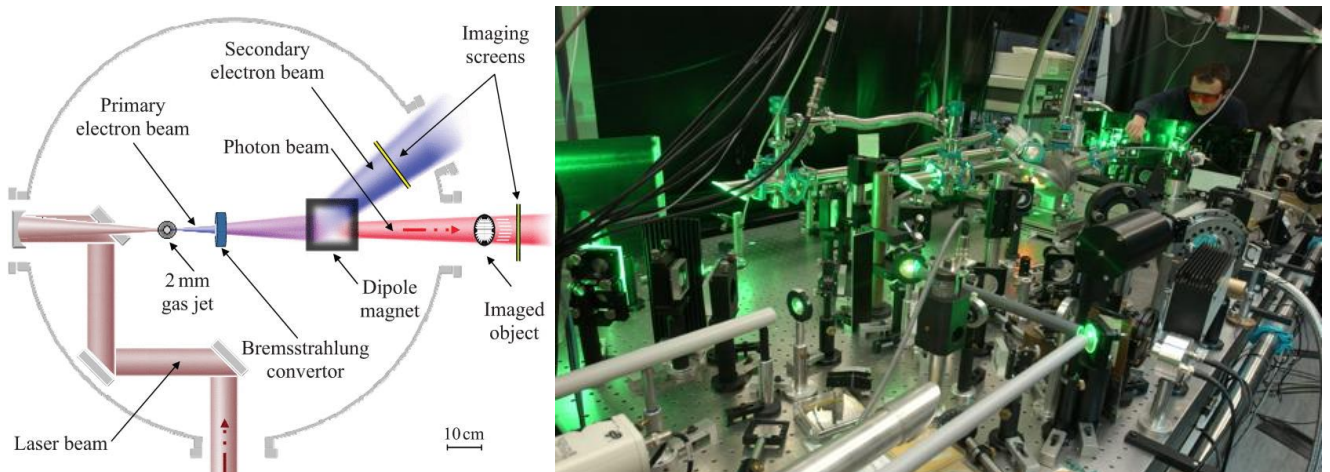


Рисунок 7 – Лазер на свободных электронах Salle Jaune

Ускоритель [68] позволяет генерировать много типов излучений, которые обеспечивают беспрецедентный потенциал во многих приложениях. Посредством электронных пучков от LWFA также могут быть получены высокоэнергетические микроточечные источники гамма-излучения.

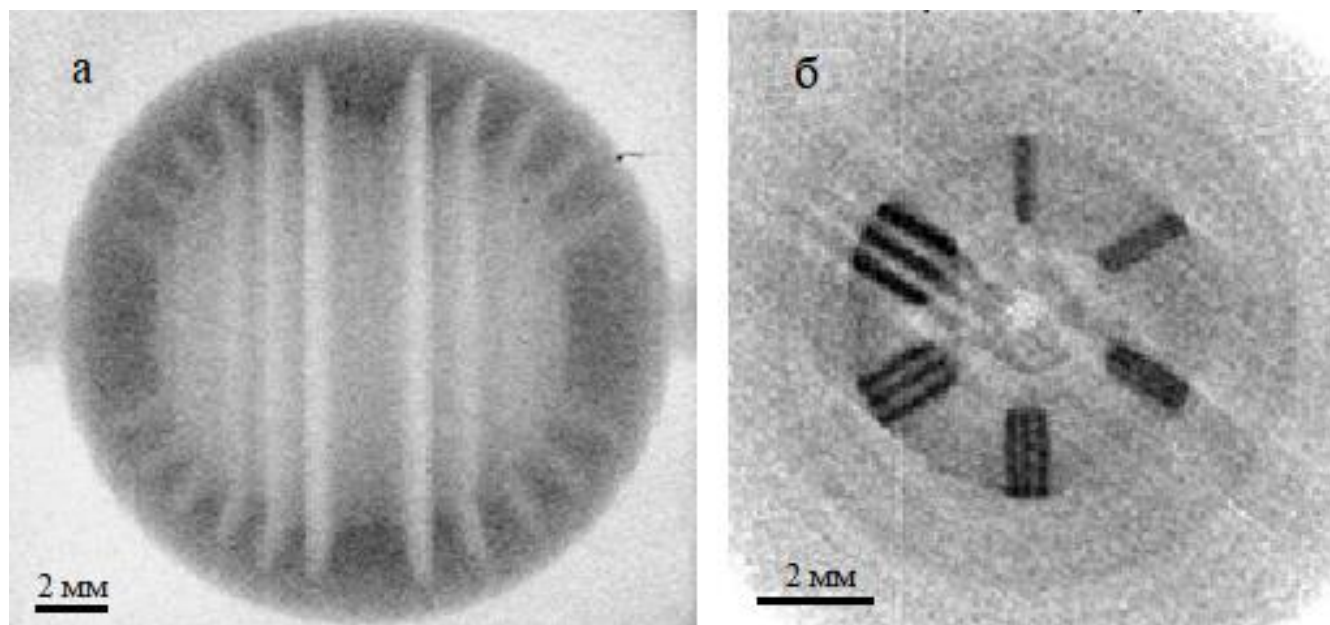


Рисунок 8 – Результаты контроля: а) - рентгенограмма вольфрамового шара диаметром 20 мм при 50 мкм фокусном пятне; б) - реконструированное изображение среза цилиндра из плексигласа с несколькими медными пластинами, встроенными внутрь, с разрешением около 100 мкм.

С размером пятна, почти в 20 раз меньшим, чем у обычных источников гамма-излучения, этот метод обеспечивает прорыв в разрешении для высокоэнергетической КТ. Улучшение пространственного разрешения экспериментально демонстрируется с помощью источника микро-пятна гамма-излучения от лазерного ускорителя кильватера. Следуя результатам эксперимента [69, 70], интенсивный лазер обеспечивает потенциальный способ создания высокоэнергетической системы микро-КТ для неразрушающего контроля сложных и плотных объектов с разрешением менее 100 мкм (рисунок 8). Однако есть несколько минусов данного источника, например, радиационная нестабильность, которая еще не исследована, а также малая интенсивность



излучения с уменьшением фокусного пятна, влияющая на скорость проведения неразрушающего контроля. Технические характеристики FEL Salle Jaune приведены в таблице 4.

Таблица 4. Технические характеристики FEL «Salle Jaune».

Энергия	От нескольких МэВ до ГэВ
Размер фокального пятна	40 мкм
Расстояние от фокусного пятна до объекта	около 250 мм
Максимальная просвечиваемая толщина	Не менее 200 мм стали

### 1.5. Импульсный источник излучения – бетатрон

Малогобаритные бетатроны, как источники излучения для радиационной дефектоскопии и компьютерной томографии, обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами ускорителей. Они имеют схожую энергию излучения (от 2 до 35 МэВ), малый размер фокусного пятна (0,5 × 3 мм), возможность регулирования максимальной энергии, непрерывный спектр тормозного излучения. Эти преимущества позволили осуществлять контроль материалов или изделий с широким диапазоном толщин (до 400 мм по стали).

Еще в 90 годах Российская фирма «Проминтро» стала выпускать промышленные рентгеновские КТ на основе малогобаритного бетатрона с энергией 5 МэВ, способные количественно исследовать внутреннюю структуру изделий любой сложности [71-73]. Однако классический бетатрон, в соответствии с используемым в нем принципом ускорения, не позволяет ускорять в одном цикле большое количество электронов и, следовательно, дает меньшую мощность дозы излучения по сравнению с другими ускорителями. Поэтому усилия направлены, в первую очередь, на повышение мощности дозы, которая в последних моделях малогобаритных бетатронов увеличена в 15-20 раз по сравнению с первыми образцами при одних и тех же размерах и массы.

Одной из систем КТ на основе бетатрона МИБ-10, произведенного в Томском политехническом университете, с энергией тормозного излучения до 10 МэВ и мощностью дозы до 25 Р/мин-м является установка, разработанная федеральным научно-производственным центром «Алтай» [74, 75] (рисунок 9).

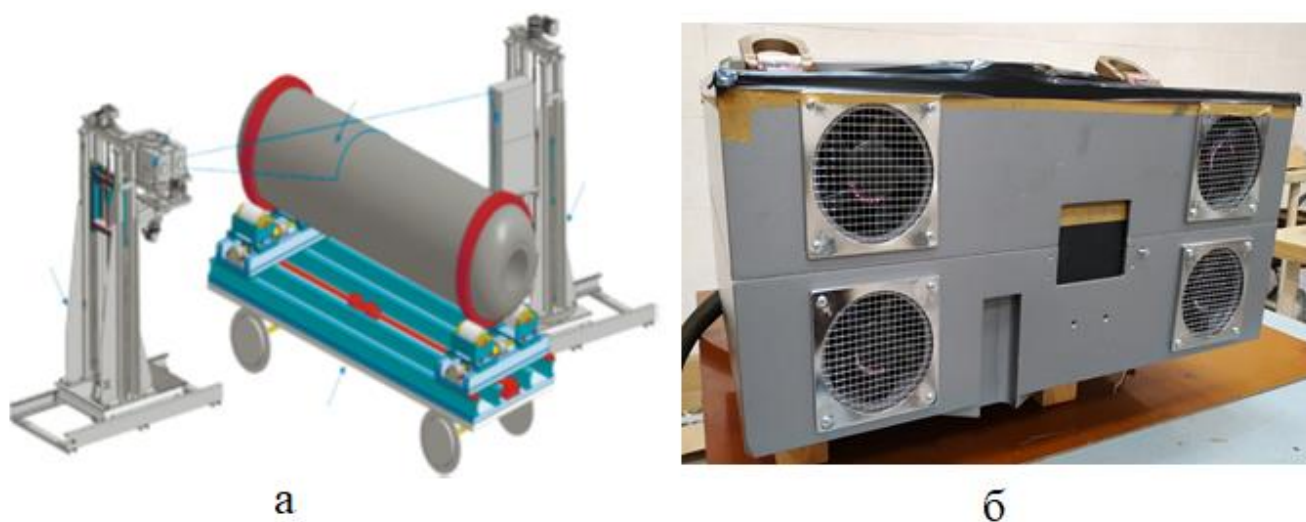


Рисунок 9 – Компьютерный томограф (а) на основе бетатрона МИБ-10 (б) с энергией тормозного излучения до 10 МэВ

Томографы эксплуатируются на двух предприятиях ФКП «Комбинат «Каменский» и в АО «ФНПЦ «Алтай» и предназначены для контроля изделий из материалов высокой плотности диаметром до 1-ого метра (при средней плотности материала  $\rho - 1,8 \text{ г/см}^3$ ). Бетатрон МИБ-10 имеет малые размеры фокусного пятна ( $0,3 \times 3,0 \text{ мм}$ ) по сравнению с линейными ускорителями, что дает хорошее пространственное разрешение. Усовершенствование схемы сканирования и алгоритмов реконструкции томограммы способствуют сокращению расстояния от источника до центра объекта вдвое, что позволяет увеличить скорость сканирования за счет повышения интенсивности излучения из-за приближения источника. В результате уменьшаются габариты томографа и его стоимость.

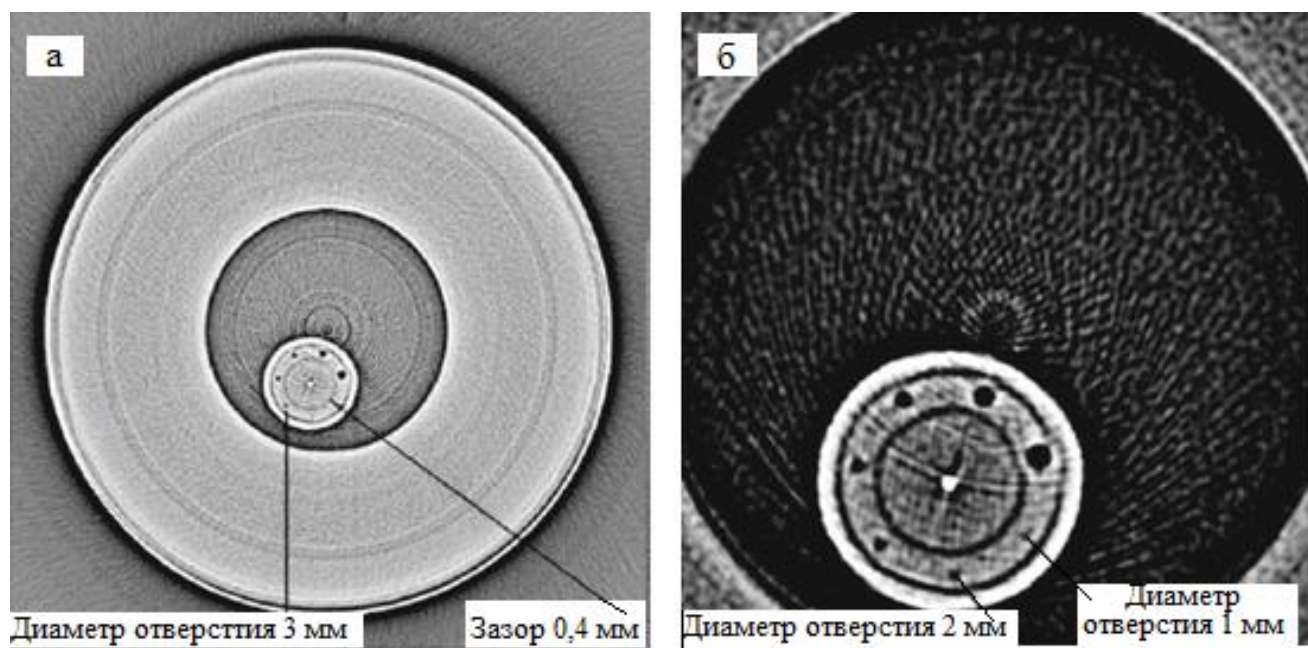


Рисунок 10 – Томограмма испытуемого образца (а) и его увеличенный фрагмент (б).

В настоящее время разработчики малогабаритных бетатронов [76] проводят важные работы по улучшению его характеристик, необходимых для томографических применений, а именно уменьшение фокусного пятна до микронного уровня при сохранении уже имеющегося уровня мощности дозы, а также ее увеличения за счет повышения частоты работы ускорителя. Высокие характеристики излучения, простота и эксплуатационная надежность, а также радиационная безопасность в выключенном состоянии обеспечивают малогабаритным бетатронам устойчивый спрос на отечественном и зарубежном рынках. Технические характеристики бетатрона МИБ-10 приведены в таблице 5.

Таблица 5. Технические характеристики бетатрона МИБ-10.

Тип источника	МИБ-10
Энергия ускоренных электронов	2,5-10,0 МэВ
Мощность дозы тормозного излучения	25 Р/мин-м
Рабочий цикл	импульсный
Размер фокусного пятна	0,3x3 мм
Расстояние от фокусного пятна до объекта	минимум 200 мм
Габаритные размеры (ШхДхВ)	450x800x450 мм
Максимальная просвечиваемая толщина	Не менее 350 мм стали

## 1.6. Выводы к главе 1

Многие современные источники рентгеновского излучения для промышленного применения находятся в стадии разработки и усовершенствования. Особо следует выделить высокоэнергетические источники. В данном случае рассматривается применения в рентгенографии и компьютерной томографии высокого разрешения высокоплотных и (или) крупногабаритных ответственных изделий для которых необходимы источники МэВ-ых энергий с фокусным пятном микронного диапазона.

Все источники по характеристикам различны между собой. Например, микрофокусная рентгеновская трубка имеет самый малый размер фокусного пятна рентгеновского излучения, однако энергия фотонов мала для контроля материалов высокой плотности. Линейный ускоритель, наоборот, имеет значительно большую энергию и мощность дозы, но и больший размер фокусного пятна, минимальное значение которого составляет 2 мм, что в итоге ведет к ухудшению разрешения и качества рентгеновского изображения. Микротрон и лазер на свободных электронах имеют энергию электронов более 1 МэВ, как у линейного ускорителя и малое фокусное пятно, как у рентгеновской трубки, однако им необходимы дополнительные элементы для ускорения заряженных частиц, которые сказываются на массогабаритных характеристиках. Фактически, эти установки остаются лабораторными с невозможностью их внедрения в цеховых условиях в реальном производстве. Они изначально созданы для фундаментальных научных исследований, и не найдут широкого применения в ближайшем будущем.

Среди перечисленных источников практическое применение находят только линейные ускорители и бетатроны. Бетатрон имеет более привлекательные характеристики, такие как размер фокусного пятна, масса и габариты, простота в обслуживании и надежность, цена и меньший объем радиационной защиты помещения в сравнении с линейным ускорителем, однако имеет существенный недостаток – низкую мощность экспозиционной дозы.

МЭД рентгеновского излучения является одним из важных ключевых параметров для оценки томографической системы, так как влияет на скорость выполнения неразрушающего контроля. Мощность дозы бетатрона проигрывает в сотню раз линейным ускорителям, что является явным недостатком даже на фоне утешительных компенсаций, перечисленных выше. Однако, если пересчитать площадь фокусного пятна ( $3 \times 3 \text{ мм} / 0,2 \times 0,5 \text{ мм} = 40$ ), то проигрыш в числе используемых квантов составляет всего 2,5 раза или 1,58 раза по ОСШ [71]. Более того, уменьшение фокусного пятна в линейном ускорителе за счет применения коллимирующих устройств является не эффективным, так как при этом уменьшается «эффективный ток пучка». Таким образом, малая мощность дозы бетатрона не является непреодолимым ограничением, и бетатрон представляет собой наиболее оптимальную систему для создания источника тормозного излучения с фокусным пятном малых размеров для применения в промышленной микро-КТ.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МИКРОФОКУСНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ БЕТАТРОНА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

Известные способы получения фокусного пятна тормозного излучения в циклическом ускорителе заряженных частиц были предложены в [77, 78] которые заключались в ускорении частиц, и их смещении на мишень, изготовленную из металла с большим атомным номером и размерами сечения, больших размеров сечения пучка ускоренных электронов. Мишень может быть установлена на отдельном держателе или на аноде инжектора.

Наиболее близким является способ получения фокусного пятна тормозного излучения в бетатроне МИБ-6 [79]. В конце цикла ускорения система расширения орбиты с помощью центральной обмотки формирует приращение магнитного потока в круге равновесной орбиты, необходимое для увеличения радиуса орбиты электронов, с радиуса равновесной орбиты до радиуса установки мишени. Скорость приращения магнитного потока в круге равновесной орбиты определяет радиальную скорость смещения электронов на мишень. В результате смещения и попадания электронов на мишень генерируется тормозное излучение с фокусным пятном, размеры которого определяются вертикальным размером сечения пучка и скоростью смещения его с равновесной орбиты. Скорость смещения пучка уменьшают до оптимального значения, обеспечивающего наименьший горизонтальный размер фокусного пятна. Так, например, в бетатроне МИБ-6 [79] фокусное пятно составляет по измерениям приблизительно  $3 \text{ мм} \times 0,3 \text{ мм}$  и заметно уменьшить размеры пятна в описанном способе не представляется возможным и ведет к ухудшению качества рентгеновского изображения за счет геометрической нерезкости.

Для уменьшения размеров фокусного пятна источника излучения предполагается модифицировать бетатроны с энергиями 4 и 18 МэВ. Отличительными от классического прототипа признаками являются выбор сечения мишени с размерами, меньшими размеров сечения пучка ускоренных

электронов, монтаж мишени на держателе из металла с малым атомным номером, смещение ускоренных частиц на мишень с достаточно долгой циркуляцией электронов по орбите с радиусом расположения мишени, обеспечивающей получение максимальной мощности дозы тормозного излучения. Выбор сечения мишени меньших размеров сечения пучка ускоренных электронов обеспечит практически получение фокусного пятна, определяемого только размерами сечения мишени.

Бетатрон имеет низкую интенсивность излучения, вследствие низкого ускоряемого тока электронов. В предлагаемом для исследования источнике излучения электронный пучок после ускорения должен достаточно долгое время удерживаться на орбите, где расположена микромишень, чтобы, циркулируя по этой орбите электроны могли постепенно попадать на нее за счет бетатронных колебаний. Таким образом, яркость источника повышается не за счет увеличения ускоряемого тока, а за счет уменьшения размеров фокусного пятна при сохранении ускоряемого тока. Для этого должны быть реализованы совсем иные, чем в классическом бетатроне, законы распределения управляющего магнитного поля ускорителя и временной характер сброса ускоренных электронов на мишень. На время сброса ускоренного пучка магнитное поле должно быть таким, чтобы формировалась достаточно глубокая потенциальная яма в районе микромишени, удерживающая электроны в вертикальном и радиальном направлениях.

Как показано в [35], основными характеристиками источника излучения для промышленной томографии являются: энергия ускоренных электронов, размер эффективного фокусного пятна, мощность пучка, падающего на мишень. Эти три параметра можно выразить через классический параметр источников излучения – светимость источника излучения (*brilliance*). Светимость источника определяется как [80]:

$$brilliance = \frac{photons}{second \cdot mrad^2 \cdot mm^2 \cdot 0,1\%BW} \quad (1)$$

где:

*photons* - количества фотонов, выходящих с мишени в единицу времени;

$second \cdot mrad^2$  - углового распределения фотонов;

$mm^2$  - размеров области выхода фотонов (размера эффективного фокусного пятна);

$0,1\%BW$  - ширины спектра излучения.

Чем выше светимость, тем больше фотонов используется для получения полезной информации, тем выше параметры рентгенографической системы или томографа в целом. В данной главе экспериментально показаны способы повышения светимости высокоэнергетического источника на основе малогабаритного бетатрона за счет уменьшения фокусного пятна.

## **2.1. Разработка микрофокусных источников излучения на основе малогабаритных бетатронов МИБ-4 и Б-18**

### **2.1.1 Изготовление микромишеней из материалов с высокой и низкой плотностью**

Из теоретических и практических соображений, для исследования уменьшения размера фокусного пятна при использовании геометрических фигур (пластина, проволока, шар) была определена форма мишени в виде пластины – узкой (несколько мкм), но протяженной вдоль пучка электронов (несколько мм). Размер сечения мишени подбирался меньше размеров сечения пучка ускоренных электронов, а толщина – исходя из компромисса генерации излучения (генерация тормозного излучения растет с ростом толщины мишени, но одновременно и возрастает поглощение генерируемого излучения самой мишенью). Поэтому было предложено изготовить набор микромишеней в виде ультратонких пластинок из легких и тяжелых материалов.

Первые сравнительные эксперименты, выполненные на 18 МэВ бетатроне Б-18 по генерации излучения в толстых мишенях из алюминия (Al) толщиной 1 мм и стандартной мишенью из вольфрама (W) толщиной 1,5 мм, показали, что при Al мишени формируются более мягкое рентгеновское тормозное излучение



(условно, энергия фотонов  $< 1$  МэВ), а при W мишени - излучение гамма области спектра излучаемых фотонов (энергия фотонов  $> 1$  МэВ), за счет поглощения генерированного излучения мягкой части спектра в толще тяжелой W мишени.

При использовании Al фольги с толщиной 10-20 мкм сделан вывод о том, что она не обладает достаточной жесткостью, чтобы обеспечить правильную форму тонких мишеней. Поэтому, для изготовления микромишеней с низкой плотностью материала выбран кремний (Si). Химической полировкой были подготовлены Si пластины 50 и 8 (и менее) мкм, которые хорошо сохраняли плоскую форму, а, например, 2-4 мкм Si образцы искривлялись при приклеивании к тонкому держателю. Это являлось важным препятствием при достижении правильной формы пятна, так как, при необходимой ориентации плоской мишени микронных толщин вдоль пучка электронов, даже малое ее искривление приводит к резкому увеличению профиля мишени (с длиной вдоль пучка электронов 1-4 мм) в направлении эмиссии излучения, величина которого и определяет размер фокуса излучения.

Из плотных материалов выбор осуществлялся из W, Ta и Au. Целью изготовления микромишеней с толщиной до 2-5 мкм из тяжелого материала было получить рекордно малый фокус со значительным выходом излучения, как в рентгеновской, так и в гамма области тормозного спектра, из-за существенно меньшего поглощения излучения в тонкой структуре, когда излучение выходит через боковую поверхность мишени, ориентированной вдоль пучка электронов. Кроме того, использование высокоплотного материала обеспечит больший выход излучения в обеих частях спектра, так как выход излучения обратно пропорционален радиационной длине материала. Для изготовления ультратонких мишеней из вольфрама был предложен методом магнетронного напыления на NaCl подложки с последующим их растворением. Были изготовлены образцы с 3, 5, 7, 9 мкм вольфрамовыми слоями, но, к сожалению, при растворении подложек W пленки разрушались, из-за внутренних напряжений хрупкого материала. Вольфрам совершенно не технологичен при изготовлении тонких структур, поэтому ему заменой послужил тантал с практически одинаковой

эффективностью генерации излучения, но более технологичный. Здесь основным его недостатком для изготовления 2-5 мкм мишеней методом прокатки Та фольг, является его твердость и упругость, которые обуславливают искривление пластины уже при толщинах менее 13 мкм. Искривление дает больший фокус излучения на величину увеличения профиля мишени перпендикулярного ее длине. Но, удалось изготовить ряд удовлетворительных тонких пластин из Та фольги толщиной 13 мкм обратной прокаткой вырезанных образцов при контроле искривления их поверхностей по расплыванию отраженного лазерного луча. Тантал является прекрасным заменителем сложного в изготовлении микромишеней вольфрама, так как их характеристики близки – атомные номера  $Z = 73$  и  $74$ , плотности  $16,65$  и  $19,25$  г/см<sup>3</sup>, соответственно. Отношение радиационных длин, для Si и W составляет около 27.

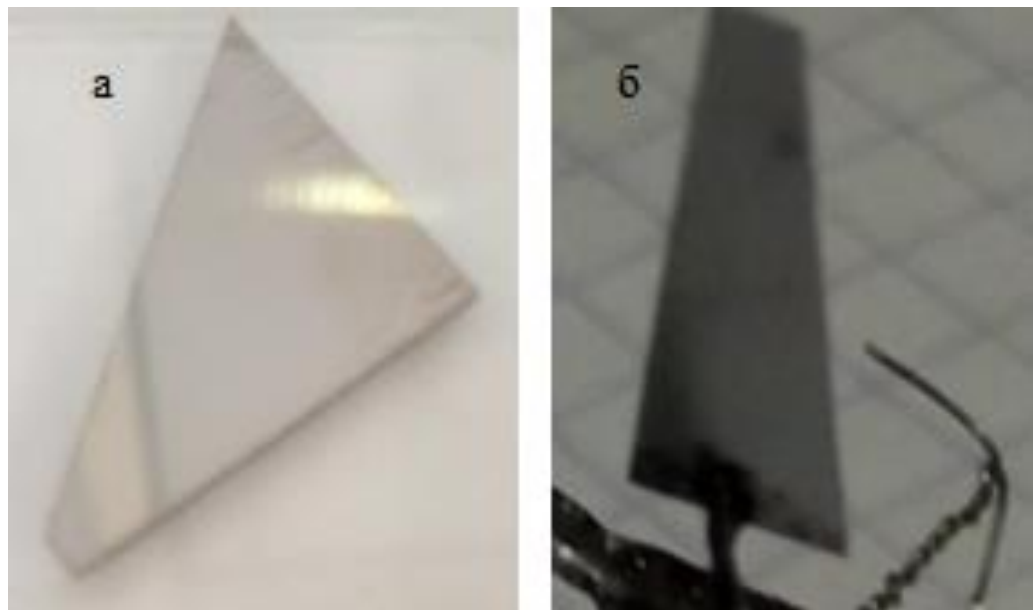


Рисунок 11 – Микромишени из лёгкого и тяжёлого материала:

а) – 50 мкм Si, б) – 13 мкм Та

Использование материалов промежуточных между легким кремнием и тяжелым танталом не имеет смысла. Поэтому, эксперименты были выполнены при использовании 50 мкм кремниевой и 13 мкм танталовой мишеней (рисунок 11), обеспечивающих радиографические изображения исследуемых объектов в рентгеновских и в гамма лучах.

### 2.1.2 Изготовление внутрикамерных гониометров

Для генерации микрофокусного излучения требуется точное позиционирование микромишени относительно электронного пучка, поэтому для ориентации мишени экспериментальная установка снабжается гониометрическим узлом, изображенным на рисунке 12.

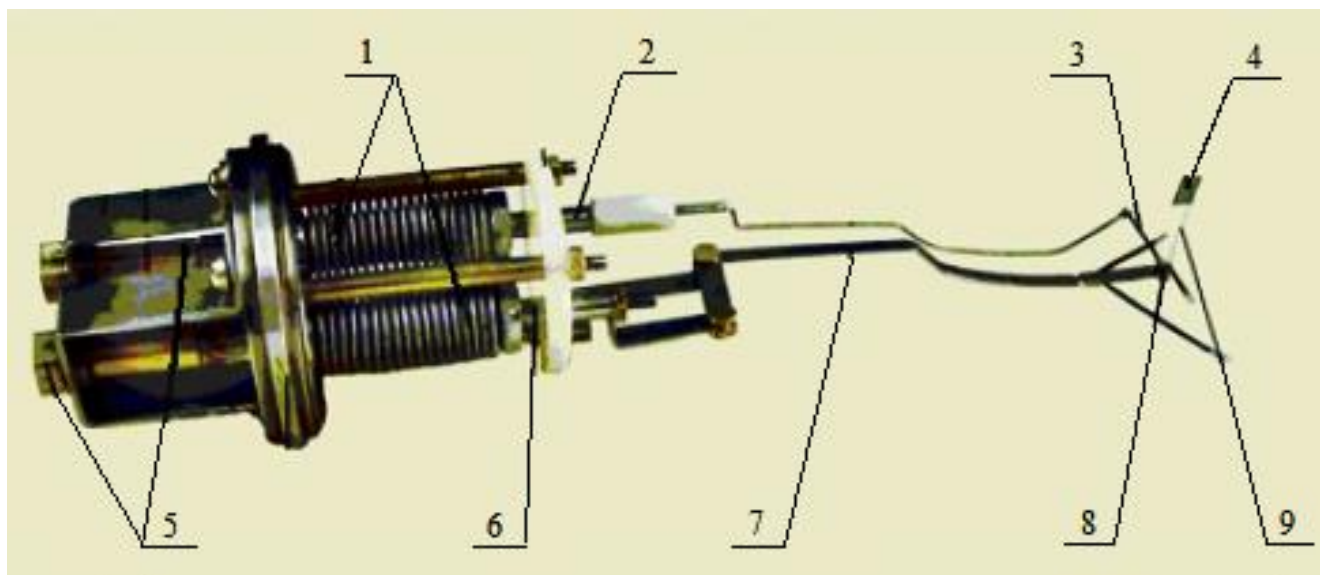


Рисунок 12 - Общий вид гониометрического узла: 1 – сильфонное соединение, 2 – шток тяги 3, 4 - микромишень, 5 – винты для перемещения держателя мишени, 6 – шток перемещения, 7 – шарнирная штанга, 8 – подпятник, 9 – держатель мишени

Узкая, но протяженная вдоль электронного пучка микромишень (4) первоначально устанавливается вблизи внутренней стенки ускорительной камеры, так чтобы ее середина высоты находилась в медианной плоскости межполюсного зазора электромагнита ускорителя. Для эффективной генерации излучения нужно менять высоту мишени внутри камеры. Это необходимо при использовании ультратонких мишеней, когда высота мишени должна быть достаточно малой, чтобы исключить колебания верхней части мишени в процессе работы ускорителя, из-за ее недостаточной жесткости, если мишень высокая. Мишень (4) крепится на поворотном держателе (8) и может ориентироваться относительно направления движения электронного пучка, а также регулироваться

по высоте в пределах 2 мм. Это позволило подводить мишень к пучку снизу так, чтобы электроны падали на верхнюю часть мишени подальше от ее тонкой стойки-держателя. На рисунке 13 изображены изготовленные гониометры для модифицированных бетатронов.

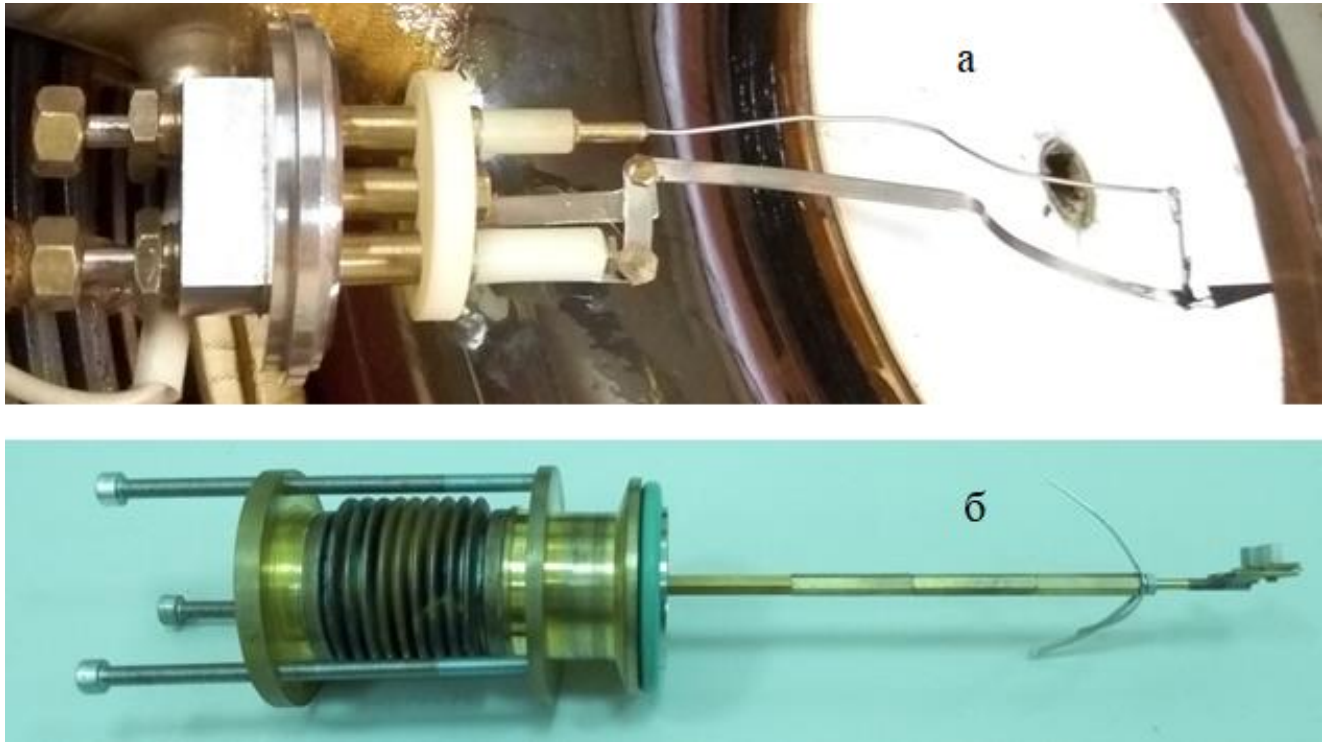


Рисунок 13 - Гониометр, изменяющий радиус расположения микромишени в камере и ее угол наклона относительно пучка электронов:

а) – для бетатрона Б-18; б) – для МИБ-4

Кроме мишени в сечении пучка оказывается держатель (9), на который также возможно попадание небольшой части ускоренных электронов. Тормозясь в держателе, они создают тормозное излучение. В качестве материала держателя (9) был выбран бериллиевый сплав с малым атомным номером с целью снижения до минимума выхода тормозного излучения в случае попадания на него ускоренных частиц, так как держатель не должен выполнять функцию мишени. Попавшие на держатель (9) ускоренные электроны проходят через металл держателя, теряя незначительную часть энергии, и рассеиваются с некоторым угловым распределением, которое носит гауссовский характер. Большая часть рассеянных электронов находится в телесном угле, не превышающем  $10^\circ$ .

Поэтому после прохождения держателя электроны переходят на орбиты меньшего радиуса с увеличенными амплитудами бетатронных колебаний и повторно участвуют в процессе попадания на мишень. Для исключения накопления объемного заряда мишень (4) к держателю (9) и держатель мишени к подпятнику (8) крепится с помощью токопроводящего клея.

Перемещение мишени (4) в радиальном направлении и изменение ее азимутального положения для достижения максимального захвата электронов в режим ускорения и без нарушения вакуума в ускорительной камере осуществляется с помощью изготовленных сильфонных соединений (1). Металлические сильфоны допускают осевое сжатие и растяжение на 20-30% от их длины в свободном состоянии. Этого вполне достаточно для установки мишени на требуемом радиусе и задания необходимых углов мишени относительно пучка электронов. Точная установка мишени (4) в вакуумной камере на заданный радиус осуществляется поворотом нижнего винта перемещения (5), который через шток перемещения (6) и шарнирную штангу (7) изменяет радиальное положение подпятника (8). Изменение азимутального положения мишени относительно направления движения электронного пучка выполняется путем перемещения (5) через шток тяги (2) поворотного рычага (3). Один полный оборот верхнего винта перемещения (5) осуществляет поворот мишени (4) в азимутальном направлении на угол  $1.5^\circ$ . Юстировка углового положения мишени выполняется с помощью лазерного луча, установленного в точке регистрации рентгеновского излучения.

### **2.1.3 Создание экспериментальных камер для бетатронов**

Электрон при движении по равновесной орбите во время ускорения совершает в бетатроне около миллиона оборотов, то есть проходит путь, исчисляемый сотнями километров. Для того что бы электрон мог пройти такой путь, необходимо создать условия, сводящие к минимуму возможность соударения электрона с молекулами воздуха. Поэтому ускорение электрона осуществляется в вакуумной камере.

Общий вид отпаянной камеры приведен на рисунке 14. Она состоит из трех основных узлов: стеклянного баллона, инжектора и титанового поглотителя газа – геттерного узла.

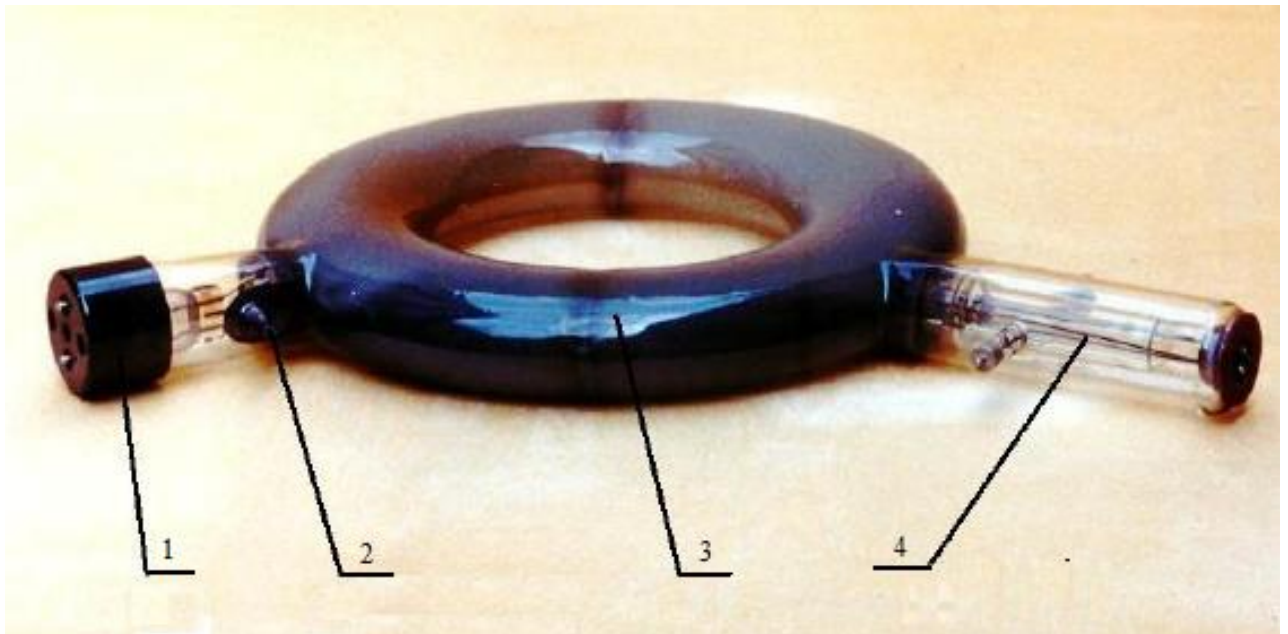


Рисунок 14 - Общий вид вакуумной ускорительной камеры: 1 – геттерный узел с мишенью, 2 – Вывод проводящего слоя, 3 – баллон камеры, 4 – инжектор

Баллон камеры изготавливается из молибденового стекла и имеет форму тороида. Овальная форма сечения камеры обеспечивает ее механическую прочность, а выбор материала обусловлен тем, что молибденовое стекло позволяет выполнять вакуумно-прочные спаи с молибденовыми держателями инжектора и выводами геттерного узла.

Для бетатрона Б-18 и МИБ-4 были созданы экспериментальные камеры (рисунки 15 и 16), которые принципиально отличаются от стандартных камер обычных бетатронов. В обычном бетатроне отпаянная камера имеет не сменяемый инжектор с прямонакальным вольфрам-торированным карбидированным катодом и толстую (1,5 мм) W мишень, закрепленную внутри или снаружи равновесной орбиты ускоряемых электронов на внутренней стенке на минимальном радиусе в камере Б-18 или на инжекторе в камере МИБ-4. Площадь мишеней больше в несколько раз сечения пучка с диаметром около 2-3 мм.



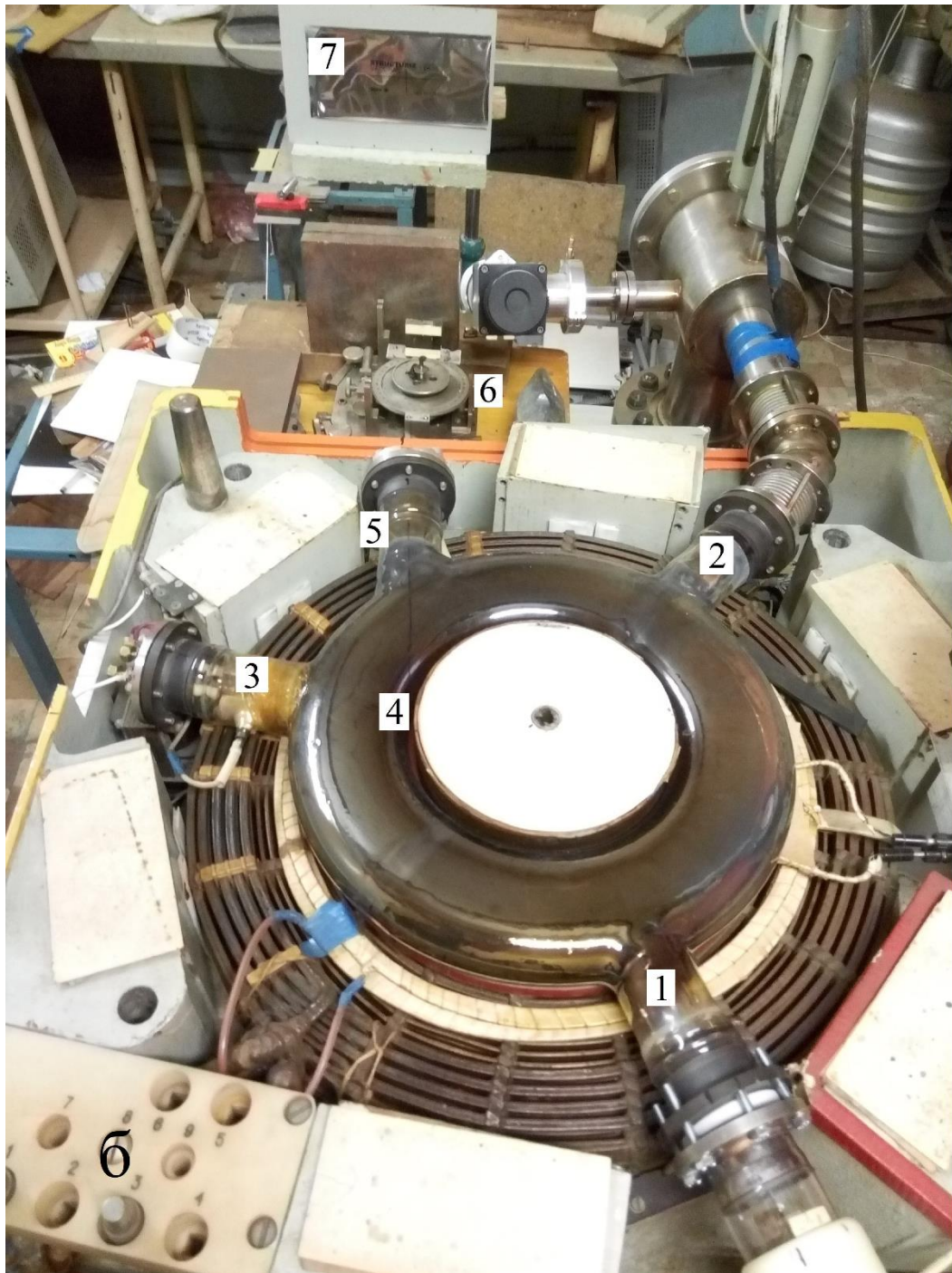


Рисунок 15 - Экспериментальная камера микрофокусного источника излучения на основе бетатрона Б-18: 1 - патрубок с инжектором; 2 - патрубок к вакуумному насосу; 3 – патрубок с гониометром (регулирует радиус расположения микромишени в камере и угол наклона к пучку электронов; 4 - место мишени внутри камеры; 5 - патрубок для выхода излучения, с окном, закрытым тонкой фольгой; 6 – внешний гониометр для образца с микродефектами; 7 – пленка Agfa D-4 или координатный детектор

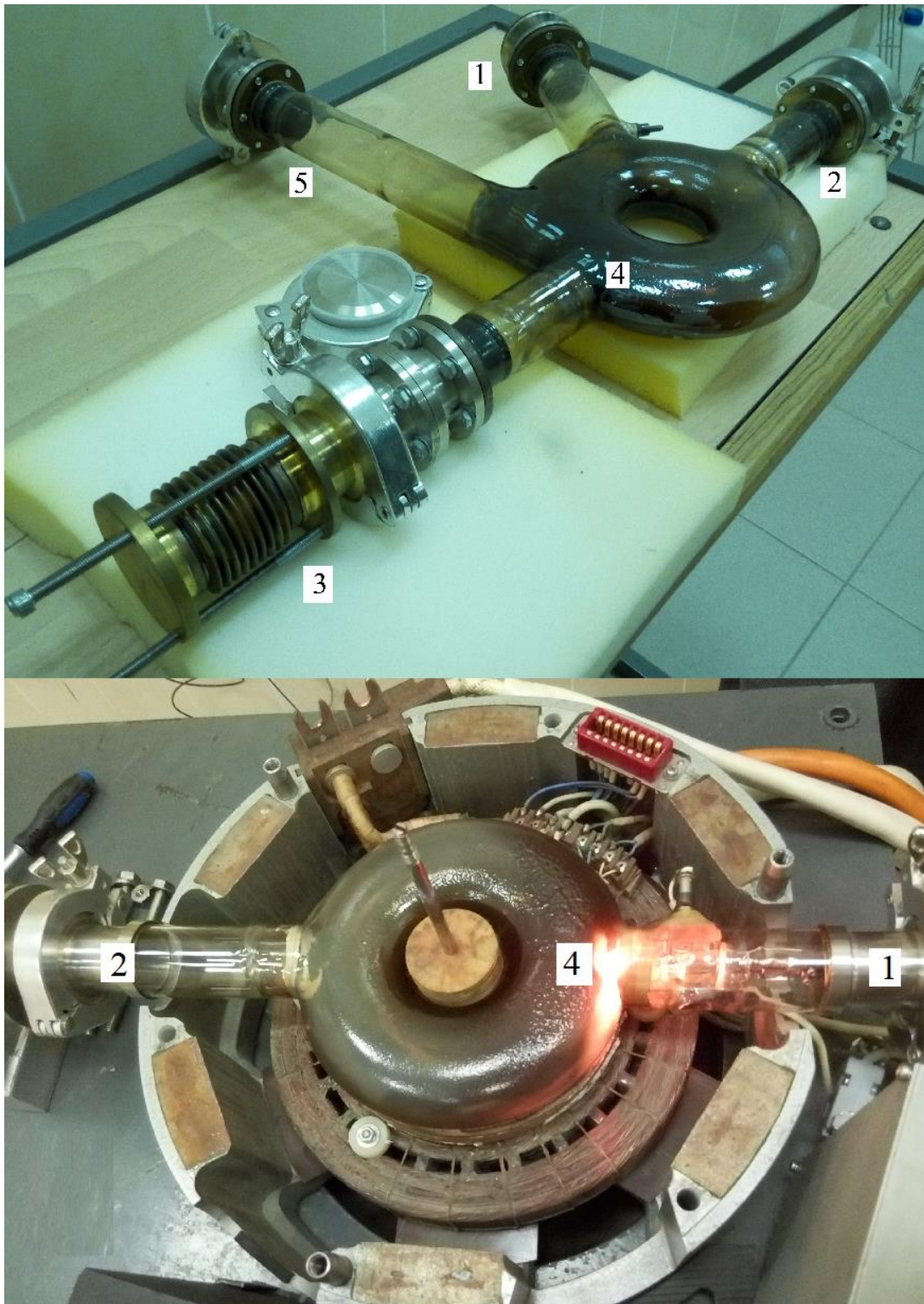


Рисунок 16 - Экспериментальная камера микрофокусного источника излучения на основе бетатрона МИБ-4: 1 - патрубок с инжектором; 2 - патрубок к вакуумному насосу; 3 – патрубок с гониометром (регулирует радиус расположения микромишени в камере и угол наклона к пучку электронов; 4 - место мишени внутри камеры; 5 - патрубок для выхода излучения, с окном, закрытым тонкой фольгой



В разработанных экспериментальных камерах инжектор бетатрона должен быть сменяемым, из-за старения катода в процессе работы. Долговечный в отпаянной камере вольфрам-торированный карбидированный катод здесь неприменим, из-за его «отравления» при относительно невысоком вакууме в экспериментальной камере, создаваемого вакуумным насосом, и нахождения на воздухе во время вскрытий камеры с различными целями. Поэтому, экспериментальная камера имеет патрубки с узлами для соединения с вакуумной системой, крепления инжектора и установки гониометра для позиционирования мишени в камере бетатрона по координате ее положения и скользящему углу ее ориентации относительно направления пучка электронов.

#### 2.1.4 Макеты модифицированных микрофокусных источников излучения на основе бетатронов Б-18 и МИБ-4

На рисунке 17 изображены схематично две проекции сечения излучателя бетатрона, на примере которого рассмотрим реализацию предлагаемого способа.

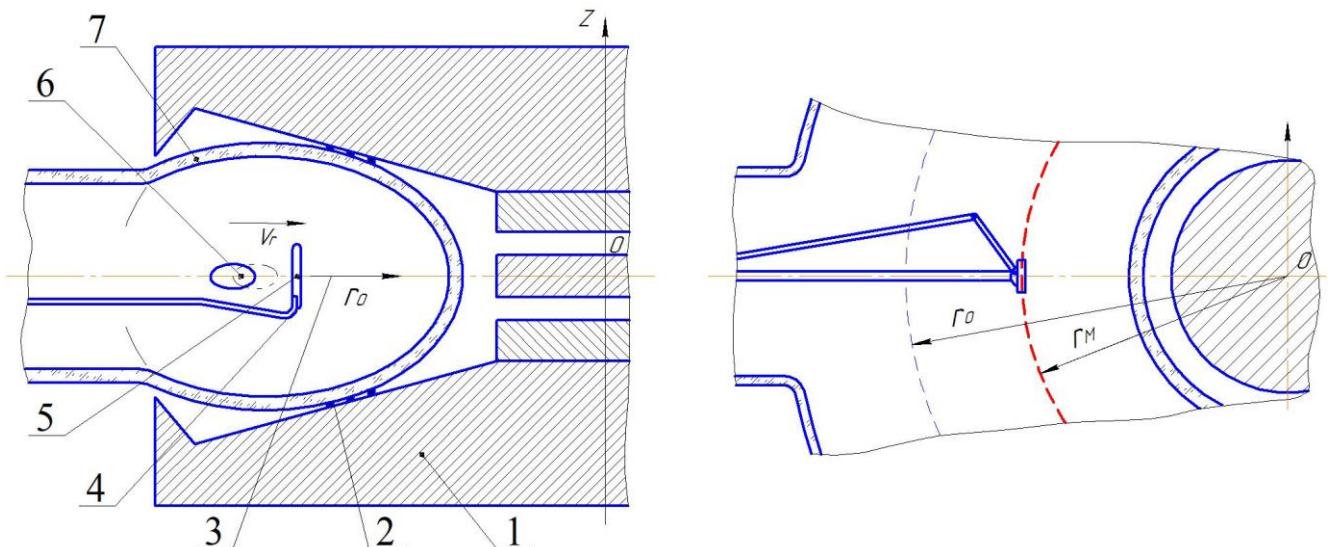


Рисунок 17 – Две проекции сечения излучателя бетатрона:

- 1 - электромагнит, 2 - обмотка смещения, 3 - медианная плоскость,
- 4 - держатель, 5 - мишень, 6 - сечение пучка ускоренных электронов
- 7 - ускорительная камера,  $r_m$  - радиус установки мишени,  $r_0$  - равновесный радиус,  $V_r$  - вектор скорости смещения ускоренных электронов

Способ получения фокусного пятна тормозного излучения малых размеров реализуется следующим образом. Полюсами (1) электромагнита формируется магнитное управляющее поле, в которое инжектируют электроны с некоторой начальной энергией. Захваченные управляющим полем электроны стягиваются к равновесной орбите  $r_0$  и ускоряются до максимальной энергии. В этот момент через витки обмотки (2) смещения пропускают импульс тока с регулируемой амплитудой. Обмотки (2) смещения усиливают магнитный поток внутри равновесной орбиты и электроны с определенной радиальной скоростью  $V_r$  начинают смещаться в медианной плоскости (3) наружу (МИБ-4) или внутрь (Б-18). При этом скорость  $V_r$  смещения пучка будет определяться скоростью роста тока, пропускаемого через обмотку (2) смещения. Через определенное время, определяемое значением  $V_r$  и расстоянием  $r_m r_0$  электроны достигнут радиуса  $r_m$  расположения мишени (5) на гониометре (4). Для получения фокусного пятна тормозного излучения малых размеров габариты сечения мишени (5) выбирают меньших размеров сечения (6) пучка. С момента времени, когда мишень (5) окажется внутри сечения (6) пучка начнется постепенное попадание ускоренных электронов на мишень (5) за счет их взаимосвязанных радиальных и вертикальных бетатронных колебаний. В результате торможения ускоренных электронов в мишени (5) генерируется тормозное излучение, интенсивность которого пропорциональна квадрату атомного номера  $Z^2$ . Часть электронов, траектории которых проходят через сечение мишени (5), попадут на нее на первых оборотах, остальные будут попадать на мишень (5) постоянно по мере совпадения координат траектории электронов на азимуте мишени (5) с ее пространственным положением. Для того чтобы большая часть ускоренных электронов попала на мишень (5), подбирают оптимальную скорость,  $V_{r\text{опт}}$  смещения пучка экспериментально по максимуму мощности дозы тормозного излучения. Таким образом, в отличие от известного способа получения фокусного пятна тормозного излучения в циклическом ускорителе в предлагаемом способе размеры фокусного пятна определяются не размерами сечения (6) пучка, а

фактически размерами сечения мишени, которые выбирают заведомо меньшими сечения (6) пучка.

Схема установки на базе бетатрона Б-18 и МИБ-4 приведены на рисунке 18а и 18б соответственно. Излучение из макета Б-18 выводится наружу по вакуумной камере через окно в выходном фланце, закрытом тонкой майларовой пленкой толщиной 50 мкм, обладающей низким коэффициентом ослабления рентгеновского излучения и фиксируется на рентгеновской пленке. В макете МИБ-4 излучение выводится наружу сквозь стеклянную вакуумную камеру и фиксируется детектирующим устройством.

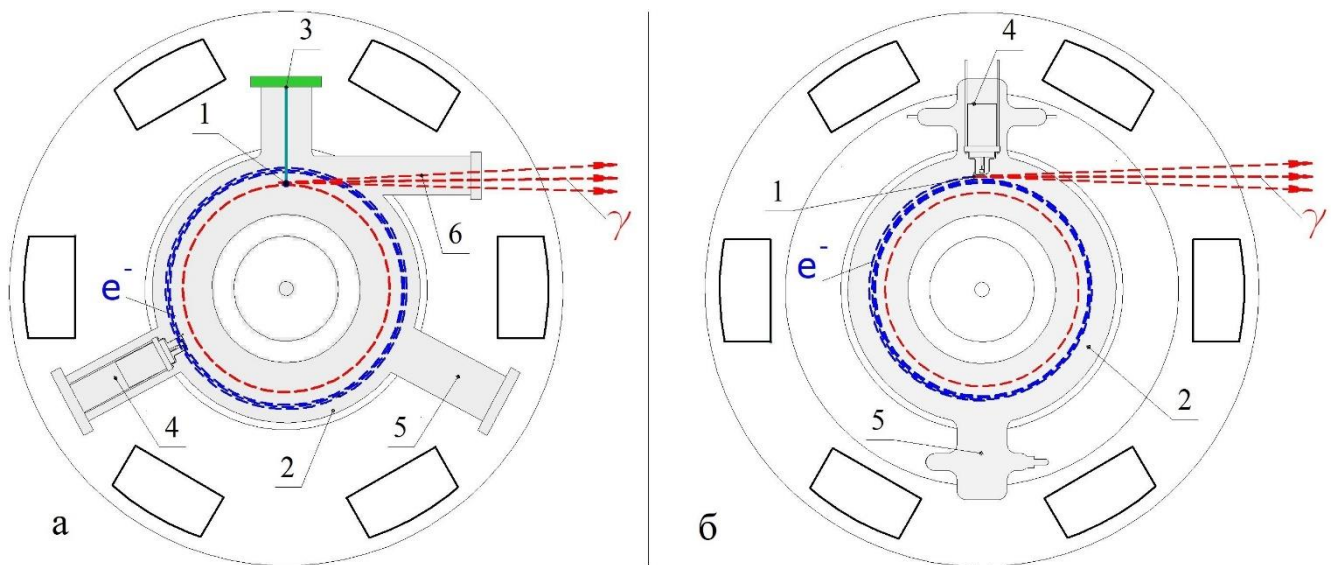


Рисунок 18 - Схема экспериментов Б-18 и МИБ-4: 1 – внутренняя микромишень, 2 - экспериментальная бетатронная камера; 3 - внутренний гониометр, управляемый извне; 4 – патрубок для инжектора; 5 – патрубок для откачки вакуума, 6 – патрубок для вывода генерирующего излучения

Общий вид созданного микрофокусного источника излучения на основе бетатрона Б-18 показан на рисунке 19.

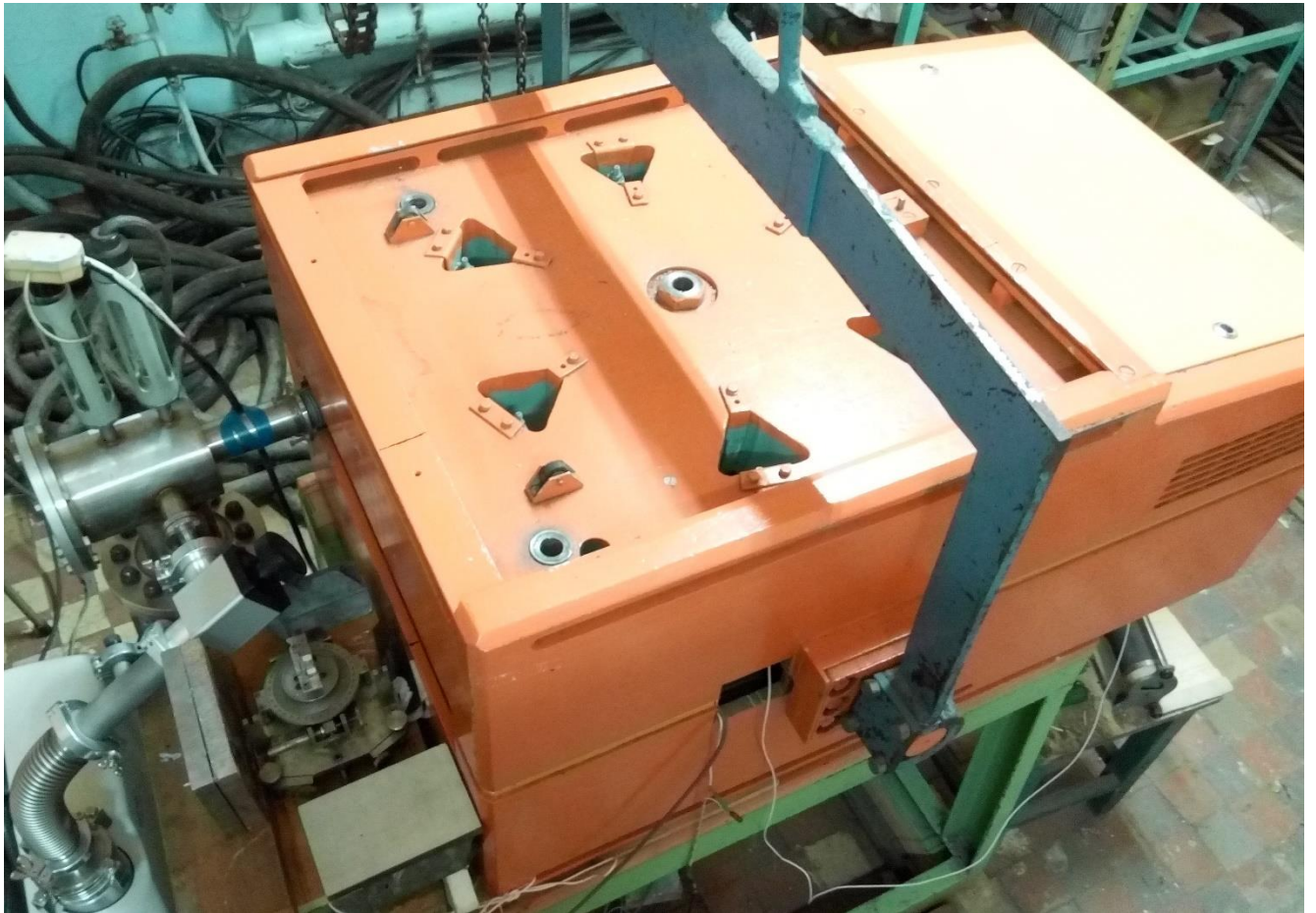


Рисунок 19 - Общий вид микрофокусного источника излучения на основе бетатрона Б-18



Общий вид созданного микрофокусного источника излучения на основе бетатрона МИБ-4 показан на рисунке 20.



Рисунок 20 - Общий вид созданного микрофокусного источника излучения на основе бетатрона МИБ-4

## 2.2. Исследование и сравнение угловых характеристик излучения классического и микрофокусных источников

### 2.2.1 Угловые распределения излучения в мишени из кремния

Кремниевая пластина с вертикальным и горизонтальным (вдоль пучка электронов) размерами 5 и 4 мм, соответственно, и толщиной 50 мкм помещалась на вертикальном тонком держателе гониометра внутри равновесной орбиты ускоряемых электронов (рисунок 21 а). Дополнительное магнитное поле, создаваемое обмоткой сброса в течение 30 мкс, уменьшало радиус орбиты, и электроны попадали на пластину.

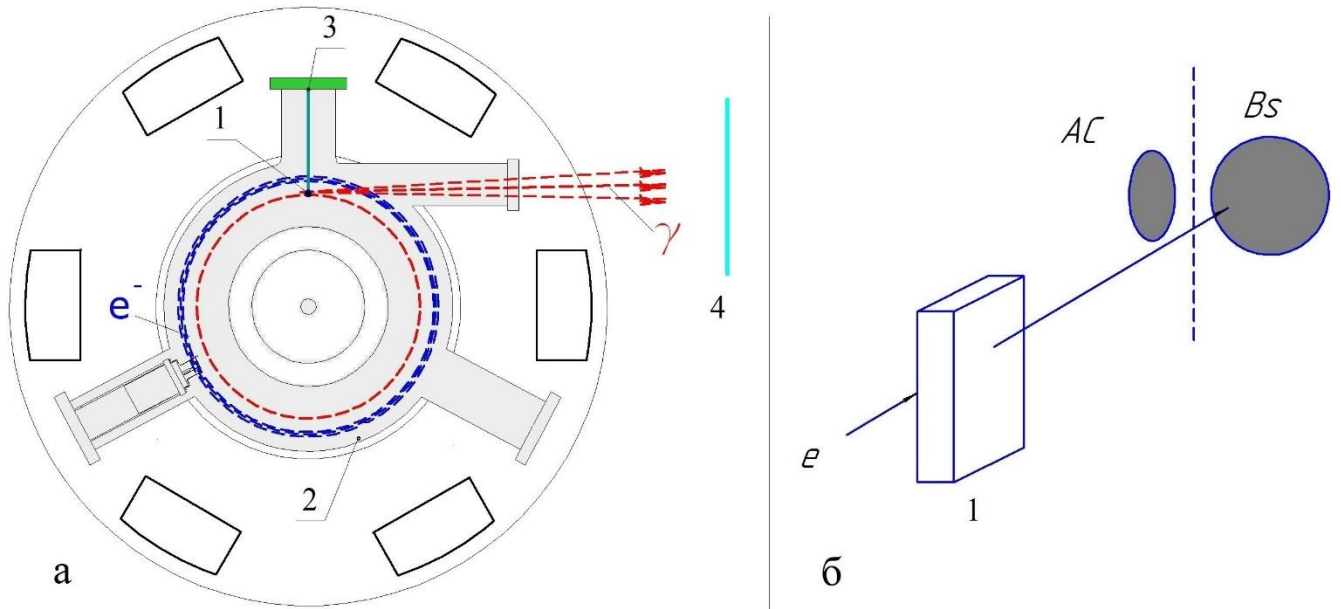


Рисунок 21 - Схема эксперимента - а): 1 – внутренняя микромишень Si на пучке электронов  $e^-$ , 2 – экспериментальная камера бетатрона, 3 – гониометр, 4 – фотопленка; б) - расположение 50 мкм Si пластины относительно пучка электронов, вертикальная штриховая линия – направление плоскости пластины,  $Bs$  – тормозное излучение,  $AC$  – дополнительная к  $Bs$  компонента излучения.

Излучение, генерированное электронами в тонкой Si пластине, установленной вдоль пучка электронов, выходило через 50 мкм лавсановое окно экспериментальной камеры и попадало на рентгеновскую пленку Kodak,

установленную на расстоянии 56 см от пластины. Полученные фотографии пучков излучения в рентгеновской области спектра обрабатывались на сканере для последующего анализа. На рисунке 22б приведена схема расположения Si пластины относительно направления пучка электронов  $e$  (стрелки), падающего на боковую грань пластины под скользящим углом. Гониометр позволял вращать пластину вокруг вертикальной оси так, что электроны могли попадать на ту или иную ее боковую поверхность.

Угол ориентации кристалла относительно направления пучка электронов мог изменяться в области  $5^\circ > \theta_0 > -5^\circ$ . Область отрицательных углов  $\theta_0$  соответствует падению пучка электронов на поверхность пластины, которая обращена к центру ускорителя. При изменении угла  $\theta_0$  изменялось также и расстояние между изображением пучка генерированного излучения и проекцией плоскости пластины (вертикальная штриховая линия на рисунке 22 на фотографии углового распределения интенсивности излучения). Особенности в угловых распределениях излучения наблюдались при скользящих углах падения электронов на кристалл, то есть когда направление плоскости кристалла лежало внутри конуса излучения.

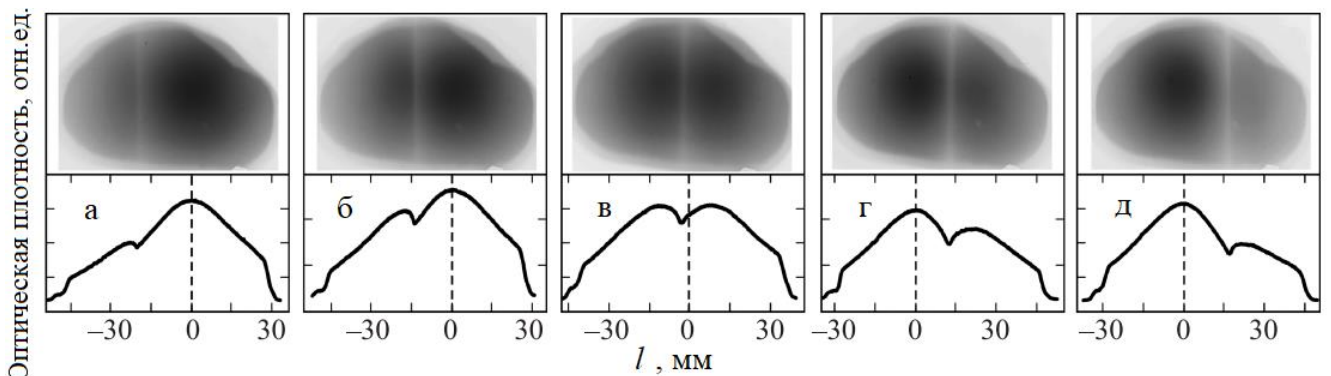


Рисунок 22 - Фотографии пучков излучения, генерированного 18 МэВ электронами при углах ориентации Si пластины  $\theta_0 = 1.9^\circ$  (а);  $1.25^\circ$  (б);  $0.05^\circ$  (в);  $-1.25^\circ$  (г) и  $-1.8^\circ$  (д). Ниже приведены профили плотностей почернения вдоль горизонтальных линий, проходящих через центры пятен почернения. Интервал в 1 мм на фотографиях соответствует  $0.05^\circ$  в угловом распределении

На рисунке 22 приведены фотографии угловых распределений интенсивности излучения, генерированного 18 МэВ электронами в Si пластине, ориентация которой относительно пучка электронов изменялась в области углов  $\theta_0 = 1.9^\circ; 1.25^\circ; 0.05^\circ; -1.25^\circ$  и  $-1.8^\circ$ , фотографии (а–д) соответственно. Изображения на пленке Kodak формировались, в основном, рентгеновским излучением с энергией фотонов в области 5–50 кэВ. Ниже, приведены распределения интенсивностей почернения на фотографиях, полученных с использованием сканера. Фотографии (а) и (д) показывают, что при значительном и примерно равном угловом расстоянии между пучком электронов и направлением плоскости пластины при падении электронов на внешнюю или внутреннюю поверхности кристалла виды угловых картин подобны. На фотографиях присутствует пятно почернения от тормозного излучения в направлении пучка электронов и светлая полоса в направлении плоскости пластины, образованная поглощением излучения в пластине и дополнительным преломлением тех частей излучения, которые выходят через боковые поверхности пластины. Различие только в том, что в случае, изображенном на фотографии (а), пучок электронов пересекает пластину «слева–направо», а в случае, изображенном на фотографии (д), «справа–налево». Фотографии (б–г), полученные при меньших скользящих углах падения электронов на внешнюю и внутреннюю поверхности пластины, показывают резкое изменение формы углового распределения при наклоне кристалла. При ориентациях  $\theta_0 = 1.25^\circ$  и  $-1.25^\circ$  фотографии демонстрируют асимметричные распределения интенсивности излучения с максимумами в направлении пучка электронов. Картина угловых распределений при этих ориентациях состоит из основного широкого пятна, профиль интенсивности которого похож на профили пятен от тормозного излучения на фотографиях (а и д, рисунок 22), и дополнительной компоненты по другую сторону от направления плоскости кристалла. Но, при ориентации кристалла  $\theta_0 = 0.05^\circ$  угловое распределение состоит из двух широких пятен интенсивности, расположенных по обе стороны от светлой полосы в направлении проекции пластины, которые образованы двумя пучками тормозного излучения,



если принять во внимание угловые ширины этих компонент, составляющих общее угловое распределение интенсивности излучения.

Эти две компоненты общего углового распределения равноценны, а небольшое различие в их интенсивности определяется небольшим наклоном кристалла относительно его расположения строго вдоль пучка электронов. Это угловое распределение ясно показывает, что распределения, полученные при углах  $\theta_0 = 1.25^\circ$  и  $-1.25^\circ$ , следует также рассматривать как состоящие из двух компонент – основной и дополнительной, которые расположены по разные стороны от направления пластины. Вероятно, эти компоненты излучения генерируются двумя частями электронного пучка, на которые делится первоначальный пучок при взаимодействии с кристаллом. Например, при  $\theta_0 = 0.05^\circ$ , за счет бетатронных колебаний электроны могут попадать на обе стороны кристалла, а электроны, попавшие на торец кристалла, могут, за счет многократного рассеяния, выйти через ту или иную поверхность, генерируя при этом излучение в направлении своего выхода.

### **2.2.2 Угловые распределения излучения в микромишени из тантала и классической толстой вольфрамовой мишени**

Схема эксперимента подобна с использованием Si мишени, но в данном случае применяли танталовую (Ta) мишень с вертикальным и горизонтальным (вдоль пучка электронов) размерами 10 и 2.5 мм, соответственно, и толщиной 13 мкм, которую помещали внутри камеры бетатрона на тонкий держатель компактного гониометра на радиусе меньшем радиуса орбиты ускоряемых электронов. Внутренним гониометром управляли извне с помощью туг, проложенных по дну камеры. Гониометр позволял вращать пластину вокруг вертикальной оси для изменения ее ориентации относительно пучка электронов в области скользящих углов  $-2^\circ < \theta_0 < 2^\circ$ .

При фотографировании пучков излучения рентгеновскую пленку устанавливали на расстоянии 46 см от пластины. Для получения увеличенных

изображений объекты располагали на внешнем гониометре на расстоянии 46 см от мишени, а рентгеновскую пленку устанавливали на расстоянии 114 см от мишени. Внешний гониометр позволял ориентировать объект исследования относительно пучка излучения. Полученные фотографии пучков излучения и рентгенограммы образцов обрабатывали на сканере для последующего анализа негативных или позитивных изображений.

На рисунке 23 показаны изображения распределения интенсивности тормозного излучения, генерируемого электронами с энергией 18 МэВ в обычной мишени W толщиной 1,5 мм (а), полученные в [81], и в мишени Та 13 (б, в) под углами ориентации.  $\theta_0 = -1^\circ$  и  $0^\circ$  относительно направления электронного пучка. Для сравнения на рисунке 23г приведена фотография углового распределения излучения, генерируемого электронами с энергией 18 МэВ в мишени 50 мкм Si, ориентированного вдоль электронного пучка, полученные ранее. Детальные исследования ориентационных зависимостей угловых распределений, приведенные ранее, показали асимметрию распределений с генерацией излучения преимущественно в направлении электронного пучка.

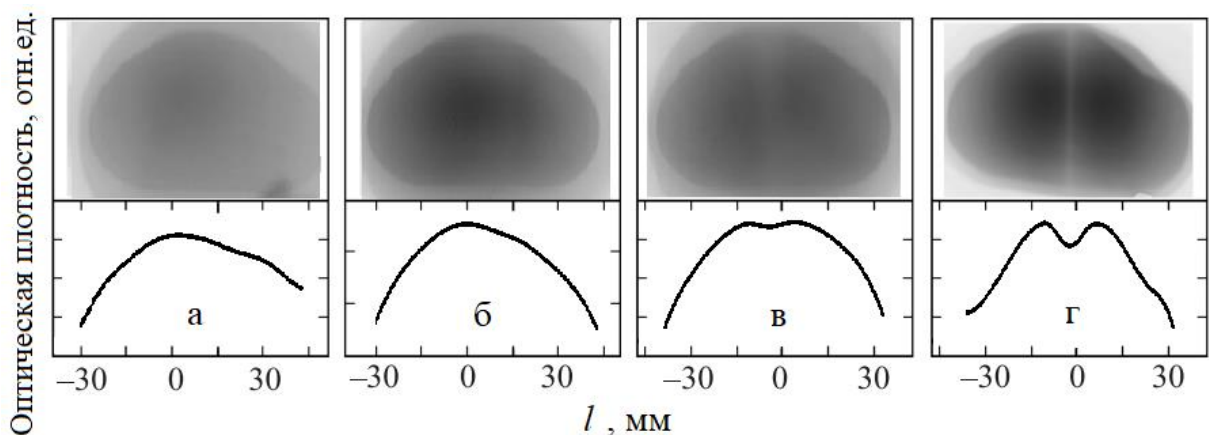


Рисунок 23 – Фотографии распределения интенсивности излучения, генерируемого в мишени W 1,5 мм(а), мишени Та 13 мкм, ориентированной при  $\theta_0 = -1^\circ$  (б) и  $\theta_0 = 0^\circ$  (в); и кристалл Si 50 мкм, ориентированный при  $\theta_0 = 0^\circ$  (г)

Фотографии излучения, генерируемого в толстой мишени W (используемой в обычных бетатронах) и Та-мишени, почти совпадают; следовательно, в мишени

Та генерируется твердое тормозное излучение с энергией фотонов  $E_\gamma > 1$  МэВ, а мягкая часть генерируемого спектра подавляется поглощением в тяжелом материале мишени. Это подтверждается изображением фланца окна бетатронной камеры, которое не наблюдалось при использовании более мягких фотонов, возбуждаемых в кристалле Si из-за их меньшей проникающей способности.

На фотографии угловых распределений, рисунок 23б, было видно чернеющее пятно, вызванное тормозным излучением в направлении электронного пучка, и пятно более низкой интенсивности на другой стороне размытой световой линии, ориентированной к плоскости мишени, которая была тенью микромишени, образованная поглощением излучения в мишени и преломлением частей излучения, прошедших через ее боковые поверхности.

Однако когда мишень была ориентирована вдоль электронного пучка,  $\theta_0 = 0^\circ$ , симметричная картина двух одинаковых конусов излучения наблюдалась по обе стороны от направления плоскости мишени (рисунок 23в). Эти компоненты излучения генерируются двумя частями электронного пучка, на которые исходный пучок распадается при взаимодействии с мишенью. Распределение излучения, генерируемого электронами с энергией 18 МэВ в мишени Ta 13 мкм (рисунке 23в), сильно отличается от распределений для мишени Si (рисунок 23г). Распределения на рисунке 23в значительно шире, а пятна интенсивности размыты, что указывает на высокую степень рассеяния электронов в Ta-мишени. Угловая структура рисунке 23г является более отчетливой из-за меньшей степени рассеяния электронов в более легком материале мишени.

Результаты экспериментальных исследований ориентационных зависимостей угловых распределений интенсивности излучения, генерированного в этой мишени, превышают по ценности результаты, которые можно получить при 50 мкм W мишени, с длиной вдоль пучка электронов 1,5 мм. Основное достоинство – меньший, примерно в 4 раза, фокус излучения, а, следовательно, и большая яркость (brilliance) излучения, которая обратно пропорциональна размеру фокуса.

## 2.3. Исследование и сравнение интенсивности излучения классического и микрофокусных источников

### 2.3.1 Сравнение яркости классического и микрофокусного источников излучения

Сравнение мощности дозы излучений из узкой  $Ta$  и широкой  $W$  мишеней было проведено при использовании  $W$  пластины толщиной 1,5 мм при нормальном падении электронов на ее поверхность и  $Ta$  мишень толщиной 13 мкм, ориентированной вдоль пучка электронов, с длиной вдоль пучка 4 мм. Высота мишеней превышала диаметр пучка электронов (1,5 мм), поэтому размеры фокусов излучения составляли –  $1,5 \times 0,3 \text{ мм}^2$  и  $1,5 \times 0,013 \text{ мм}^2$ , соответственно.

Для сравнения яркость можно вычислить по упрощенной формуле:

$$brilliance = \frac{\Delta P}{\Delta S}, \quad (2)$$

где  $\Delta P$  – мощность дозы,  $\Delta S$  – площадь фокусного пятна.

Отношение площадей фокусов  $\Delta S = 24$ . Измерение мощности дозы генерированного в этих мишенях излучения было проведено с использованием дозиметра ДКС – АТ 5350/1 с ионизационной камерой ТМ 30010, расположенной на расстоянии 1,3 м от мишени в максимуме углового распределения генерированного излучения. Площадь сечения регистрирующей камеры дозиметра около  $1 \text{ см}^2$ . Спектральная область регистрируемых фотонов  $>30 \text{ кэВ}$ . Показания дозиметра составляли для  $W$  и  $Ta$  мишеней примерно 20 и 9 Р/мин, соответственно. При отношении мощности дозы излучения (brightness), генерированного в широкой и узкой мишени, около 2.2, отношение яркостей (brilliance) генерированного излучения составляет 0,092, так как яркость источника прямо пропорциональна мощности дозы излучения и обратно пропорциональна размеру источника. То есть, яркость источника излучения на основе узкой внутренней мишени бетатрона примерно в 11 раз выше, чем при стандартной широкой и толстой  $W$  мишени. Этот эффект, возможно, обусловлен

многооборотным сбросом электронов на мишень. При этом, так как мишень ориентирована вдоль пучка, то циркулирующие электроны за счет бетатронных колебаний будут попадать не только на переднюю грань, но и на боковые поверхности мишени. Эффективность такой «конденсации» электронов на мишень зависит от длительности нахождения пучка около мишени (это – изменение радиуса орбиты  $R$  от  $r + d/2$  до  $r - d/2$ , где  $d$  - диаметр пучка электронов,  $r$  – радиус расположения мишени), то есть длительности сброса электронов на мишень. В настоящем эксперименте использовался быстрый сброс, разработанный для стандартного бетатрона Б-18 с толстой и широкой  $W$  мишенью. Поэтому увеличение длительности сброса электронов на микромишень может существенно увеличить яркость генерированного излучения.

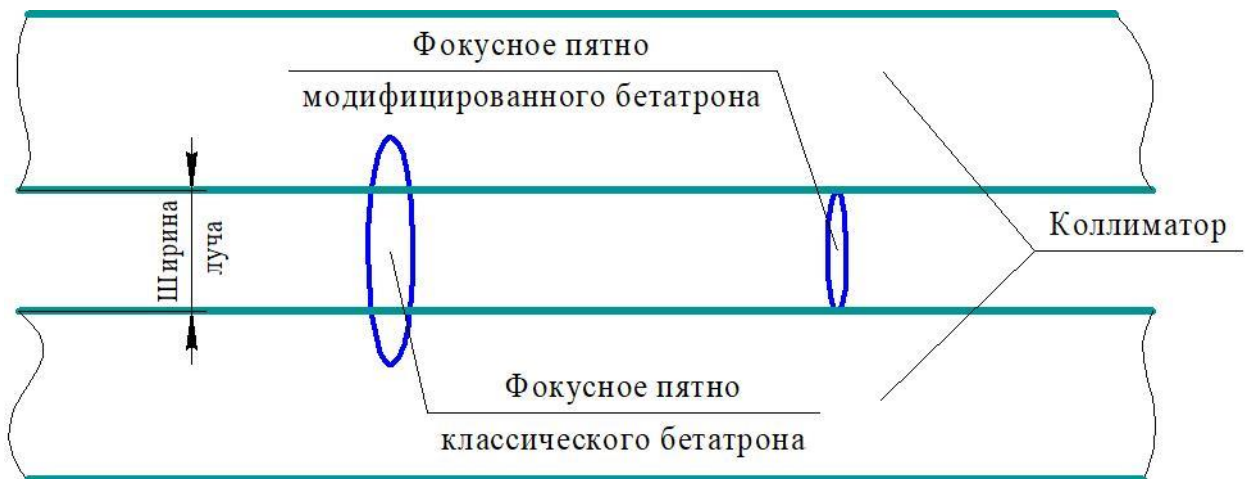


Рисунок 24 – Уменьшение фокусного пятна коллимированием

Необходимо отметить, что простым коллимированием пучка излучения, например, щелевым коллиматором (рисунок 24) возможно только уменьшить размер фокуса излучения, но не получить увеличение яркости излучения. В этом случае, этот параметр будет уменьшаться за счет уменьшения мощности дозы излучения пропорционально отношению размеров источника и коллиматора.

### 2.3.2 Зависимость интенсивности излучения от параметров сброса электронов на микромишень

Определение мощности дозы излучения в зависимости от параметров сброса электронов на мишень микрофокусного источника решалась созданием управляемой системы сброса электронов, которая позволяла оперативно регулировать амплитуду тока в обмотке сброса, скорость его нарастания и длительность импульса. После ускорения электронов на равновесной орбите на определенной фазе изменения тока в обмотках магнита бетатрона включается обмотка сброса и под ее действием изменяется, так называемое, бетатронное соотношение, в результате чего радиус равновесной орбиты электронов уменьшается или увеличивается и электроны попадают на стандартную толстую мишень, закрепленную внутри камеры бетатрона на ее внутреннем или внешнем (минимальном) радиусе. При стандартном сбросе электронов на узкую мишень, установленную на несколько большем радиусе (на 1,5 см), чем стандартная мишень, пучок электронов с изменяющимся радиусом орбиты быстро проходил положение мишени и далее попадал на стенку камеры. Управляемая система сброса позволяла регулировать величину минимального радиуса орбиты электронов, который достигался под действием обмотки сброса.

Была измерена зависимость мощности дозы излучения (рисунок 25), генерированного в 13 мкм Та мишени при различных режимах сброса и определена минимальная энергия сброса 30 Дж, при которой излучение не генерируется, так как пучок не попадает на узкую мишень, то есть минимальный радиус орбиты пучка больше радиуса расположения мишени. Также определена максимальная энергия сброса 58 Дж, превышение которой приводит к падению излучения за счет быстрого «проскакивания» электронов места расположения мишени и оседания на стенках ускорительной камеры.

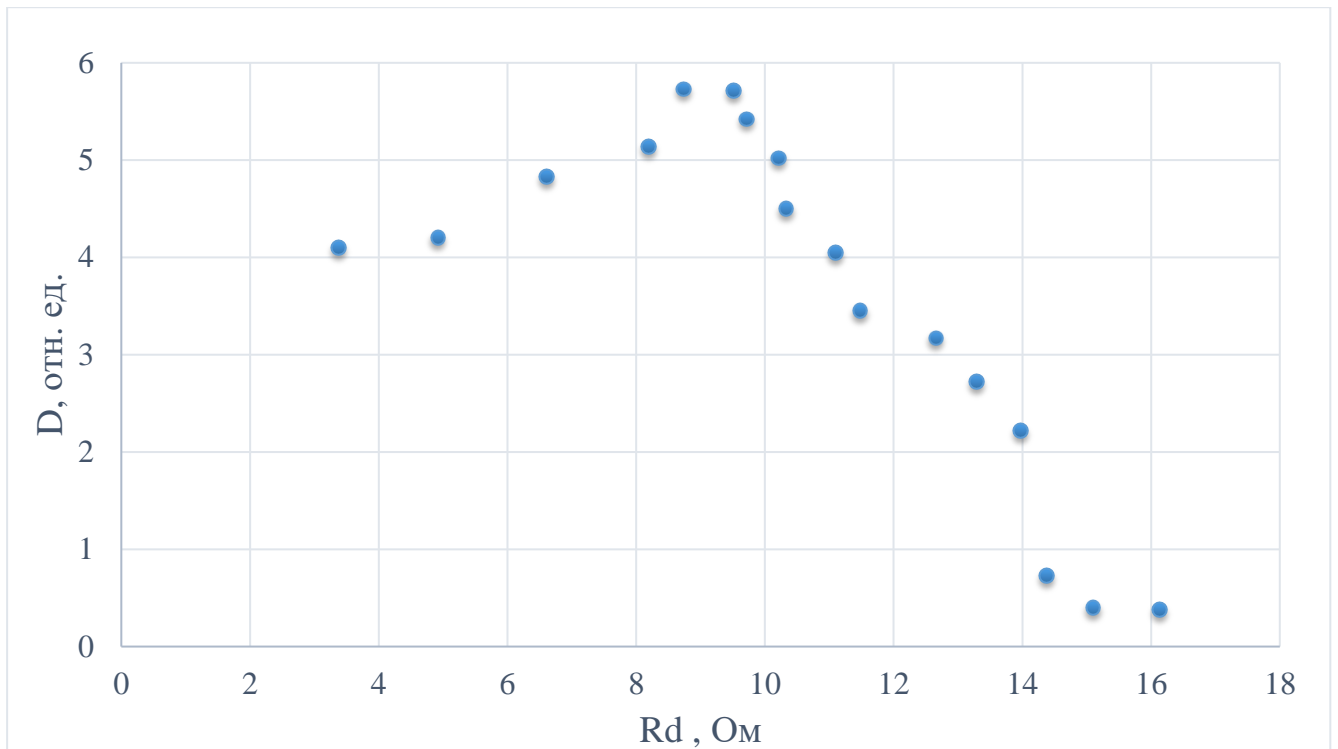


Рисунок 25 - Зависимость мощности дозы излучения, генерированного в 13 мкм танталовой мишени, от величины добавочного сопротивления в цепи обмотки сброса

Включение в цепь обмотки сброса реостата с регулировкой сопротивления от 0 до 20 Ом позволило регулировать ток в обмотке сброса, а, следовательно, и величину минимального радиуса орбиты электронов, который достигался действием обмотки сброса. При сопротивлении  $> 14$  Ом излучение не генерируется, потому что минимальный радиус орбиты пучка больше радиуса расположения мишени. При изменении сопротивления от 14 до 13 Ом наблюдается резкий рост мощности дозы, то есть пучок начинает попадать на мишень. Далее мощность дозы растет до максимума при сопротивлении в 9 Ом, а затем падает примерно до 80 процентов при дальнейшем уменьшении величины сопротивления.

В средних режимах сброса плотность излучения растет до максимума, что свидетельствует о высокой степени «конденсации» ускоренных электронов на микромишени. Изменение формы импульса тока в обмотке сброса показал, что при увеличении длительности импульса тока в обмотке длительность переднего

фронта излучения не изменяется, в то время как длительность заднего фронта увеличивается примерно в два раза.

Анализ полученной информации показал, что, для получения максимального выхода излучения, генерированного в узкой мишени, следует, кроме регулировки сдвига пучка электронов на радиус расположения мишени, увеличить длительность переднего фронта у импульса тока обмотки сброса. Это увеличит время нахождения пучка на мишени, а, следовательно, и вероятность попадания электронов на узкую мишень, ширина которой гораздо меньше диаметра пучка электронов.

#### **2.4 Уменьшение фокусного пятна за счет уменьшения скорости смещения электронов на стандартную мишень**

В данном разделе экспериментально исследован еще один способ уменьшения размеров фокусного пятна в бетатроне – за счет уменьшения скорости смещения электронов на стандартную мишень. Размер мишени в этом случае больше размеров пучка электронов.

Исследование проводилось на классическом малогабаритном бетатроне МИБ-4, с номинальной кинетической энергией ускоренных электронов 4МэВ. Данный бетатрон комплектуется отпаянной ускорительной камерой, не нуждающейся в дополнительных средствах поддержания рабочего вакуума. Электроны инжектируются в ускорительную камеру бетатрона с начальной энергией 40кэВ и ускоряются до номинальной энергии (рисунок 26).



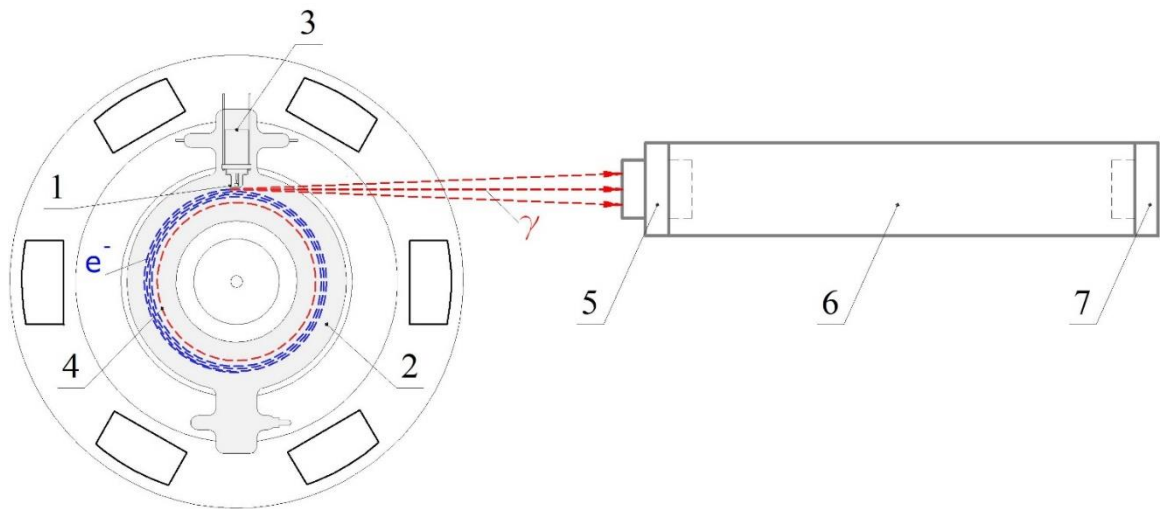


Рисунок 26 - Схема эксперимента: 1 - мишень, 2 - ускорительная камера, 3 - инжектора, 4 - равновесный радиус ускорения, 5 - камера обскуры, 6 - свинцовый экран, 7 - кассета с рентгеновской пленкой

В конце цикла ускорения система расширения орбиты с помощью центральной обмотки формирует приращение магнитного потока в круге равновесной орбиты, необходимое для увеличения радиуса орбиты электронов, с радиуса равновесной орбиты до радиуса установки мишени. Скорость приращения магнитного потока в круге равновесной орбиты определяет радиальную скорость смещения электронов на мишень. В ускорительной камере бетатрона МИБ-4 установлена танталовая мишень, высотой 12 мм, шириной 1.6мм, толщиной 0,6 мм, закреплённая на аноде. Согласно формуляру, на бетатрон МИБ-4, максимальный вертикальный размер фокусного пятна – 3 мм, горизонтальный – 0,3 мм. Из приведенных характеристик видно, что геометрические размеры мишени значительно превышают размеры фокусного пятна. Очевидно, что в данном случае, вертикальный размер фокусного пятна повторяет вертикальный размер сечения электронного пучка, а горизонтальный размер определяется радиальной скоростью расширения орбиты. Следовательно, меняя радиальную скорость расширения орбиты можно влиять на горизонтальный размер фокусного пятна.

Для проверки данного предположения были проведены относительные измерения размеров фокусного пятна бетатрона МИБ-4 при энергиях ускоренных

электронов 1МэВ, 2МэВ, 3,5МэВ. Влияние радиальной скорости расширения орбиты на размер фокусного пятна оценивалось по двум контрольным значениям на каждой энергии.

Для оценки изменения размеров фокусного пятна использовался метод с применением свинцового объектива (камеры-обскуры) [82]. Тормозное излучение с мишени бетатрона, направлялось в свинцовый объектив, имеющий отверстие, и на фотоплёнке получали изображение фокусного пятна. Объектив и фотоплёнку надёжно экранировали от вторичных излучений свинцовыми экранами. Все снимки были сделаны с единой набранной дозой. Полученные изображения (рисунок 27) фокусных пятен сканировались с разрешением 2400dpi и анализировались. Из-за отсутствия достоверной методики измерения размеров фокусного пятна методом с применением свинцового объектива, оценка изменения размеров фокусного пятна производилась в относительных единицах.

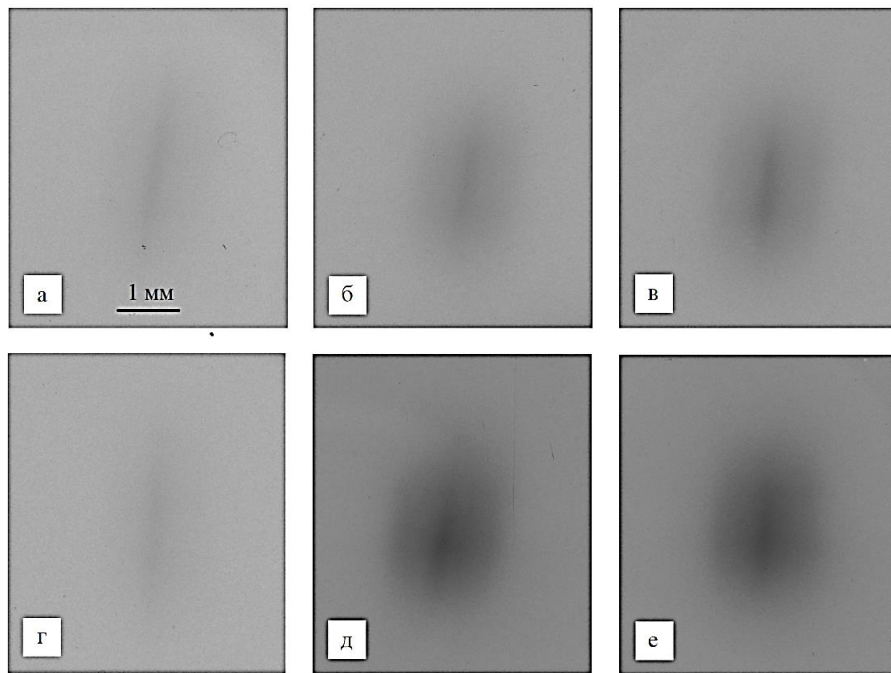


Рисунок 27 – Негативные изображения фокусных пятен при энергии (а, г) - 1 МэВ; (б, д) – 2,5 МэВ; (в, е) – 3,5 МэВ и радиальной скорости расширения орбиты (а, б, в)  $v_R = 1.3 \cdot 10^4$  м/с и (г, д, е)  $v_R = 6.3 \cdot 10^3$  м/с

Результаты эксперимента представлены на рисунке 28. Графики представляют собой нормированные зависимости плотности почернения

фотопленки от горизонтальной и вертикальной координат. За нулевую пространственную координату приняты координаты с максимальной плотностью почернения.

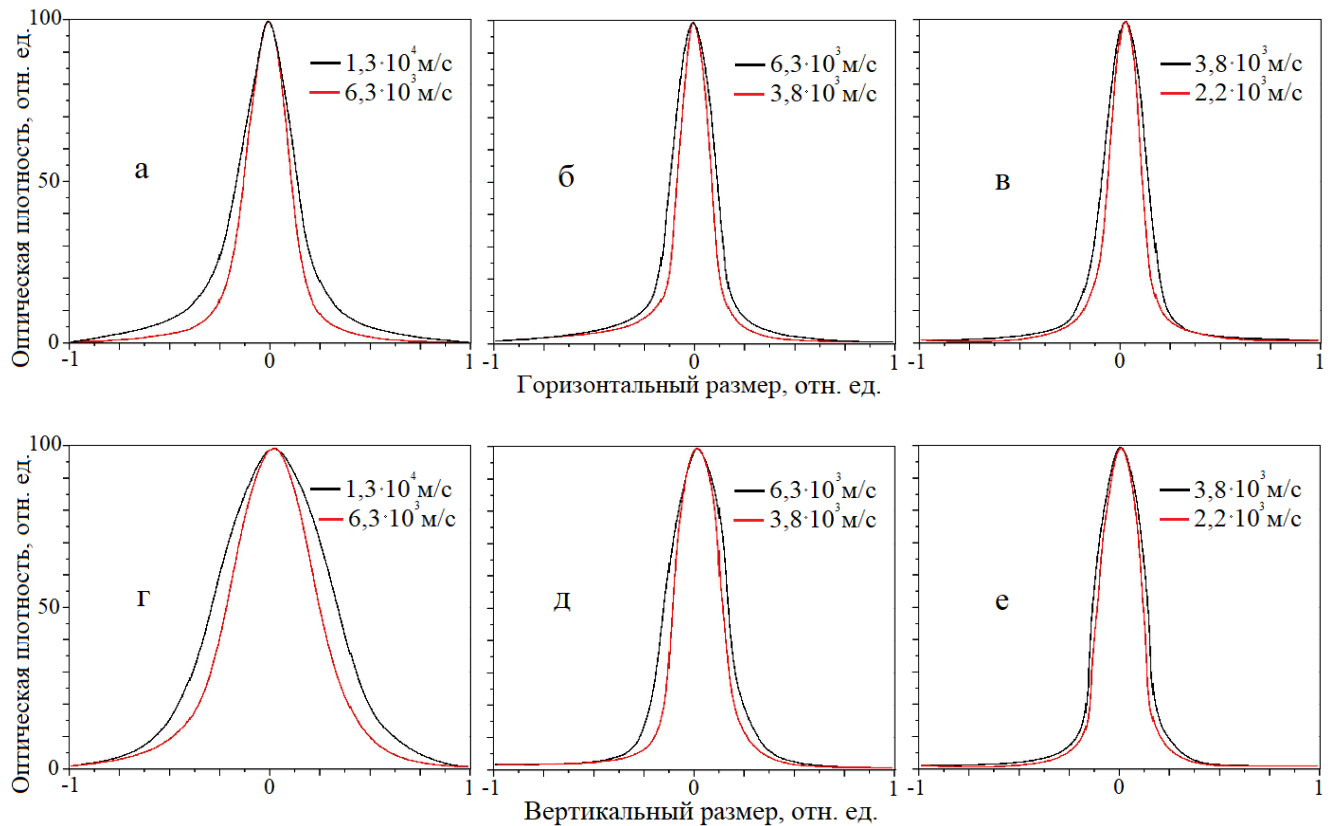


Рисунок 28 – Горизонтальные (а-в) и вертикальные (г-е) размеры фокусного пятна в относительных единицах в зависимости от энергии (а, г) - 1 МэВ; (б, д) – 2,5 МэВ; (в, е) – 3,5 МэВ

На рисунке 28 явно определяется уменьшение размеров фокусного пятна с уменьшением радиальной скорости расширения орбиты, до 0.75-0.8 от первоначального размера, как по горизонтальному размеру, так и по вертикальному. Таким образом, изменение скорости расширения орбиты, изменяет не только горизонтальный размер фокусного пятна, но и вертикальный. Если не учитывать изменение углового распределение фотонов, которое, как мы предполагаем, при снижении скорости смещения, будет повышать яркость источника, т.е. излучение будет более сфокусировано по угловой координате, то максимальное увеличение яркости источника излучения за счет уменьшения размеров в обоих направлениях составит  $(1/0.75) \cdot (1/0.75) = 1.8$  раз.

На рисунке 29 представлено сравнение горизонтального и вертикального размеров фокусного пятна при энергиях 1МэВ и 2МэВ, при одинаковой радиальной скорости расширения орбиты.

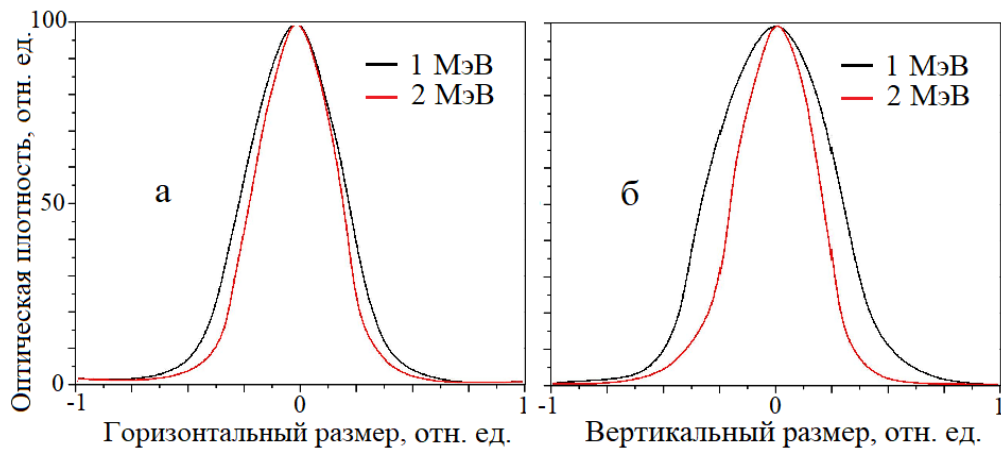


Рисунок 29 - Горизонтальный (а) и вертикальный (б) размеры фокусного пятна при энергиях 1МэВ и 2МэВ, при одинаковой радиальной скорости расширения орбиты  $v_R = 6.3 \cdot 10^3$  м/с

Поперечный размер электронного пучка бетатрона определяется амплитудой бетатронных колебаний, которые тем меньше, чем выше фокусирующие силы магнитного поля. С ростом энергии ускоренных электронов растут и фокусирующие силы магнитного поля, что приводит к уменьшению размеров фокусного пятна. Особенно значительно изменение вертикального размера фокусного пятна. Горизонтальный размер в большей степени определяется радиальной скоростью расширения орбиты и при одинаковой скорости изменение данного размера с ростом энергии, не значительно. При энергии выше 2МэВ пучок ускоряемых электронов уже достаточно сжат и уменьшение его поперечного сечения и, следовательно, вертикального размера фокусного пятна не значительно.

Результаты эксперимента показали, что уменьшение радиальной скорости расширения орбиты достоверно приводит к уменьшению и горизонтального, и вертикального размеров фокусного пятна даже на стандартной мишени, значительно превышающий размер ускоряемого электронного пучка.

## 2.5 Выводы к главе 2

Результатом данной главы является создание новых источников микрофокусного излучения на базе индукционных ускорителей – бетатронов МИБ-4 и Б-18 с внутрикамерными гониометрами с ультратонкими держателями для позиционирования микромишеней по положению и углам ориентации относительно взаимодействующих с ними пучков электронов.

В качестве материала для изготовления микромишеней целесообразно выбирать Si в качестве легкого и Ta в качестве тяжелого материала. Мишени из этих материалов обладают достаточной жесткостью и стойкостью к воздействию пучков электронов, а также технологичны при их изготовлении.

При сбросе электронов на микромишени из легкого материала (Si), генерация излучения происходит преимущественно в рентгеновской области спектра (условно, энергия фотонов  $< 1$  МэВ), при сбросе на тяжелые микромишени – излучение преимущественно в гамма-области спектра (энергия фотонов  $> 1$  МэВ), так как излучение рентгеновской части спектра поглощается в тяжелом материале мишени.

Зависимость углового распределения излучения из Ta мишени показала, что характер динамики изменения вида углового распределения идентичен случаю Si мишени, но угловое распределение гораздо шире и более размыто, за счет сильного многократного рассеяния электронов в тантале.

Параметры системы сброса бетатрона достаточно сильно влияют как на угловое распределение генерируемого излучения, так и на экспозиционную мощность дозы. Для каждого конкретного случая (размер мишени, радиус установки мишени, энергия электронов) существуют оптимальные параметры сброса, при которых мощность экспозиционной дозы максимальна.

Несмотря на уменьшение мощности экспозиционной дозы микрофокусного источника по сравнению с классическим бетатроном, яркость разработанного микрофокусного источника увеличена на порядок за счет уменьшения размеров фокусного пятна.

### **ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ МИКРОСТРУКТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОФОКУСНОГО ИСТОЧНИКА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Для применения разработанного источника в микрофокусной рентгенографии и томографии необходимо исследовать качество изображения, полученного с его помощью. Основными характеристиками, определяющими качество рентгеновского изображения, являются контрастная чувствительность, разрешающая способность и нерезкость. Последние две являются обратно пропорциональными величинами (чем больше нерезкость, тем меньше разрешающая способность, и наоборот). Нерезкость, зависит от конечного размера фокусного пятна источника и фокусного расстояния, увеличение которого ограничено МЭД.

Модифицированный источник излучения на основе бетатрона имеет размер фокусного пятна соизмеримый с размером сечения микромишени вдоль пучка излучения. Однако на данный момент нет возможности измерения размеров фокусных пятен ниже 60 мкм в диапазоне энергий килоэлектронвольт, поэтому необходимы новые способы и стандарты измерения. В МэВ-ном диапазоне результаты определения фокусного пятна различными способами (камерой обскуры, диафрагмы щелевой и с отверстием, методом «края») дают разные значения, поэтому определения размера фокусного пятна и нерезкости в данной главе являются косвенными и применяются для сравнения стандартного и микрофокусного источников излучения на основе бетатрона.

Качество радиографического изображения определяет минимальный размер дефектов, которые могут быть обнаружены. Наиболее часто используемым инструментом для индикации качества изображения в промышленной радиографии является двухпроволочный эталон Duplex IQI [83] – Image Quality Indicator, описанный в стандартах [84–90] специально разработанный для оценки общей нерезкости и базового пространственного разрешения на рентгенограмме или цифровом изображении. Также его можно использовать для оценки размера

фокусного пятна. Косвенный метод основан на связи между основным пространственным разрешением и нерезкости изображения [91, 92].

Второй основной характеристикой рентгенографического изображения является контрастность, т.е. зрительное восприятие разницы оптических плотностей (степени почернения) соседних участков изображения исследуемого объекта или всего объекта и фона. Следовательно, необходимо исследовать формирование контраста увеличенных изображений исследуемых объектов. В настоящее время, помимо улучшения абсорбционного контраста, широко и активно исследуются методы формирования фазового контраста для рентгеновской области спектра с использованием излучения рентгеновских трубок различных конструкций и синхротронного излучения [93-95]. Главной новой физической задачей работы в вопросе о контрасте изображений является исследование формирования как абсорбционного, так и фазового контраста изображений с использованием энергии излучения свыше 1 МэВ. Эта задача для гамма-области спектра совсем не исследована. Ее решение позволит создавать источники излучения для высококачественного контроля толстых деталей из тяжелых материалов с использованием пучков жесткого гамма-излучения от микромишеней бетатронов Б-4 и Б-18.

### **3.1 Определения пространственного разрешения рентгенограмм, полученных с применением микрофокусного источника**

Базовое значение пространственного разрешения изображения – мельчайшая геометрическая деталь, которая может быть разрешена в цифровом изображении при увеличении  $>1$  и соответствует половине измеренной нерезкости изображения с помощью дуплексного эталона IQI в соответствии с ISO 19232-5:

$$SR_b^{image} = \frac{U_T}{2}, \quad (3)$$

где  $U_T$  – общая нерезкость изображения.



IQI состоит из 13 пар проволочных элементов, изготовленных из металла высокой плотности, встроенных в жесткий пластик толщиной 4 мм и размером  $15 \times 70 \text{ мм}^2$ . Проволоки из платины (Pt) и вольфрама (W) с диаметрами, варьирующимися от пары к паре в диапазоне 0,8-0,05 мм разнесены на расстояние друг от друга, соответствующе диаметру каждой пары. Степень нерезкости указывается количеством пар проволок, которые можно увидеть раздельно. По мере увеличения нерезкости проволоки сливаются в единое изображение. Внешний вид индикатора приведен на рисунке 30.

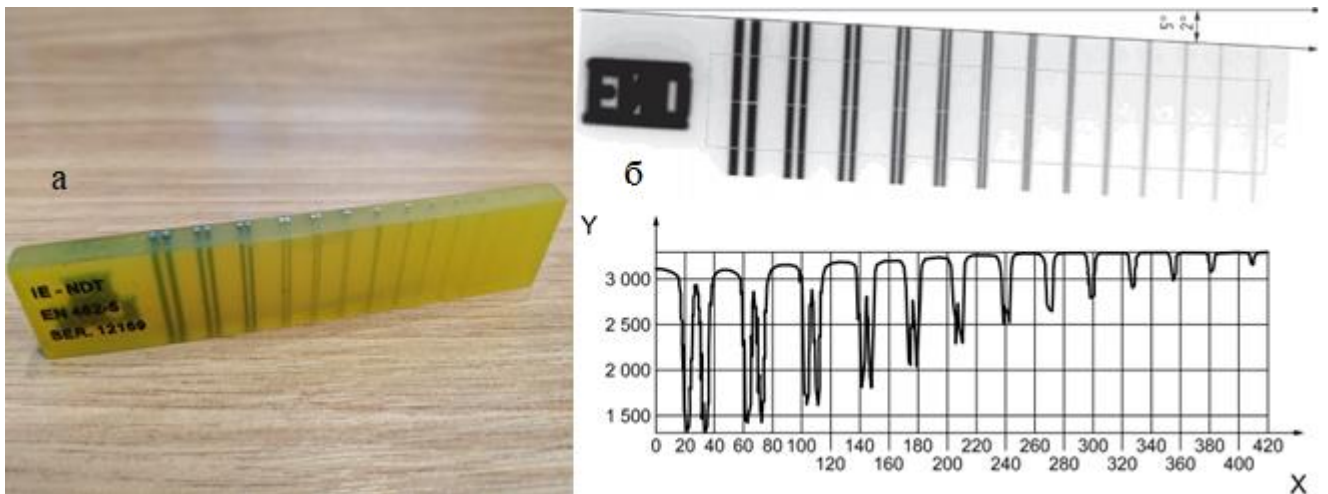


Рисунок 30 – а) - внешний вид индикатора Duplex IQI, б) - процедура измерения нерезкости

Для определения значения общей нерезкости изображения необходимо определить наименьшее количество пар дуплексных проволок, которые недостаточно разделены и соответствуют диаметру проволоки и расстоянию между ними. Выбирается область по длине индикатора, так чтобы ширина составляла не менее 21 линии для улучшения отношения «сигнал-шум» (рисунок 30 б).

Наименьшее число дуплексных проволок, которые будут разделены функцией профиля с глубиной модуляции менее 20% в линеаризованном профиле соответствуют предельной нерезкости изображения  $U_T$ . Величина модуляции (обозначается  $\text{dip}$ ) на паре проволок вычисляется как относительная разница между суммой «впадин» и «пиком» (рисунок 31):

$$dip = \frac{A + B - 2C}{A + B} \cdot 100\% \quad (4)$$

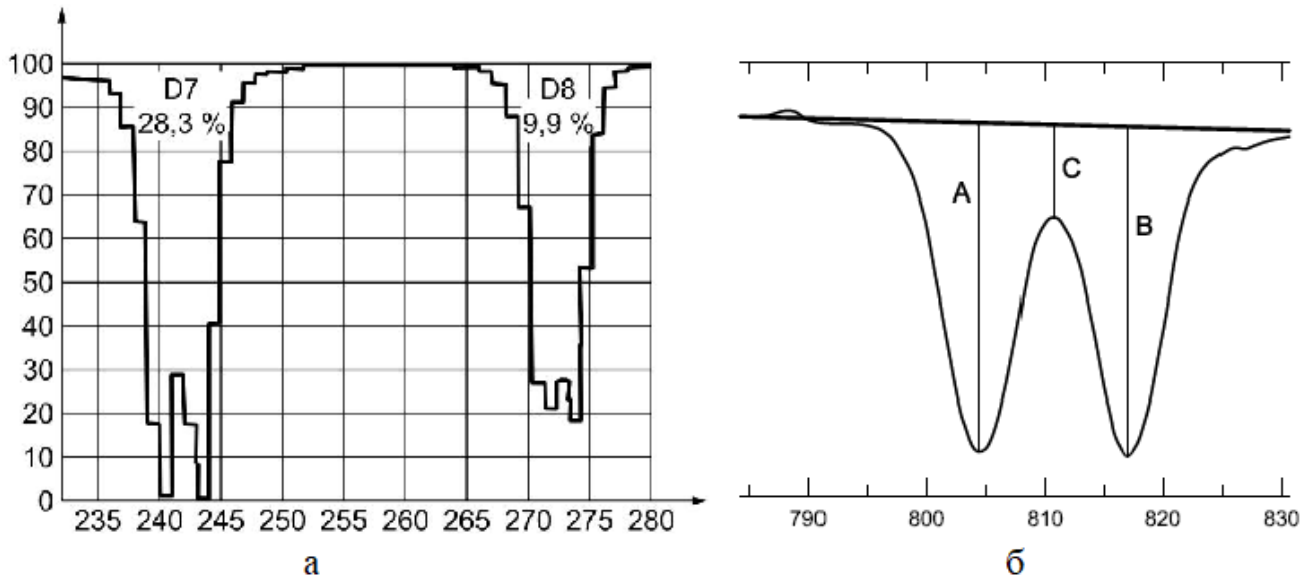


Рисунок 31 - Процедура измерения модуляции (dip, %): а) - увеличенное изображение профиля, б) - схема для расчета модуляции

Для определения более точного значения  $SR_b^{image}$  значение модуляции в 20% находится аппроксимацией полиномом второго степени значений от соседних проволочных пар. Точка пересечения аппроксимирующей функции с линией, на уровне 20% модуляции соответствует искомому значению.

Для исследования качества изображения был применен микрофокусный источник излучения Б-18 с узкой мишенью Si (энергия фотонов <MэВ), ширина которой примерно в 30 раз меньше диаметра электронного пучка (рисунок 32). Дуплексный IQI был установлен на внешнем гониометре на расстоянии 38 и 48 см от мишени соответственно, и мог перемещаться относительно оси пучка для создания рентгеновских изображений в разных областях конуса излучения. Радиографические изображения эталона регистрировались с использованием рентгеновских пленок (Kodak или Agfa), установленные на расстоянии 114 см от мишени. Затем рентгенограммы обрабатывались сканером с разрешением 2400 dpi (10 мкм) и более для получения изображений микроструктуры и их денситограмм.

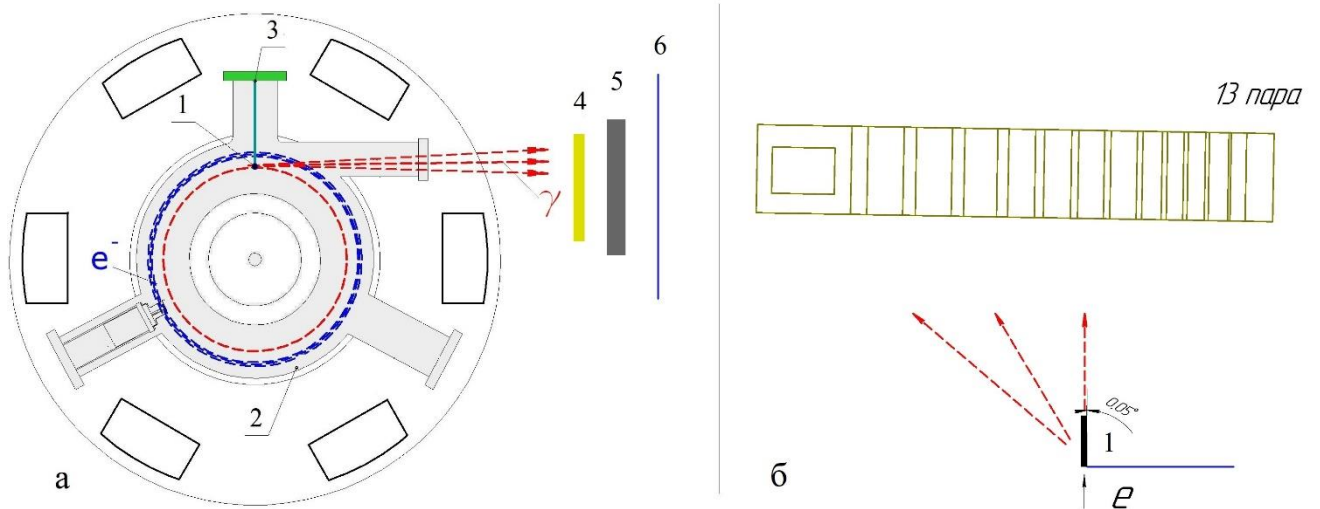


Рисунок 32 - Схема экспериментов: а) - 1- узкая мишень в экспериментальной бетатронной камере 2, 3 - внутренний гониометр, 4 - объект исследования, 5 - стальная пластина, 6 - рентгеновская пленка;  
 б) - тонкопроволочная структура, расположенная относительно узкой мишени 1 на электронном пучке

Для оценки и анализа изображений использовались специализированные программы, например ISee!, ImageJ [96, 97].

На рисунке 33 показано позитивное изображение и профиль оптической плотности части дуплексного устройства IQI с 9 – 13 парами проволок, полученное с трехкратным увеличением при ориентации кристалла Si  $\theta_{Si} = 0.05^\circ$ , рисунок 32 б. Благодаря геометрии мишени источника излучения, в виде узкой вертикальной полосы, плоскость устройства во время измерений была перпендикулярна оси конуса, и пары проволок располагались под углом около  $2^\circ$  к плоскости кристалла. Контраст изображения верхнего края устройства размыт из-за большого вертикального размера источника излучения.

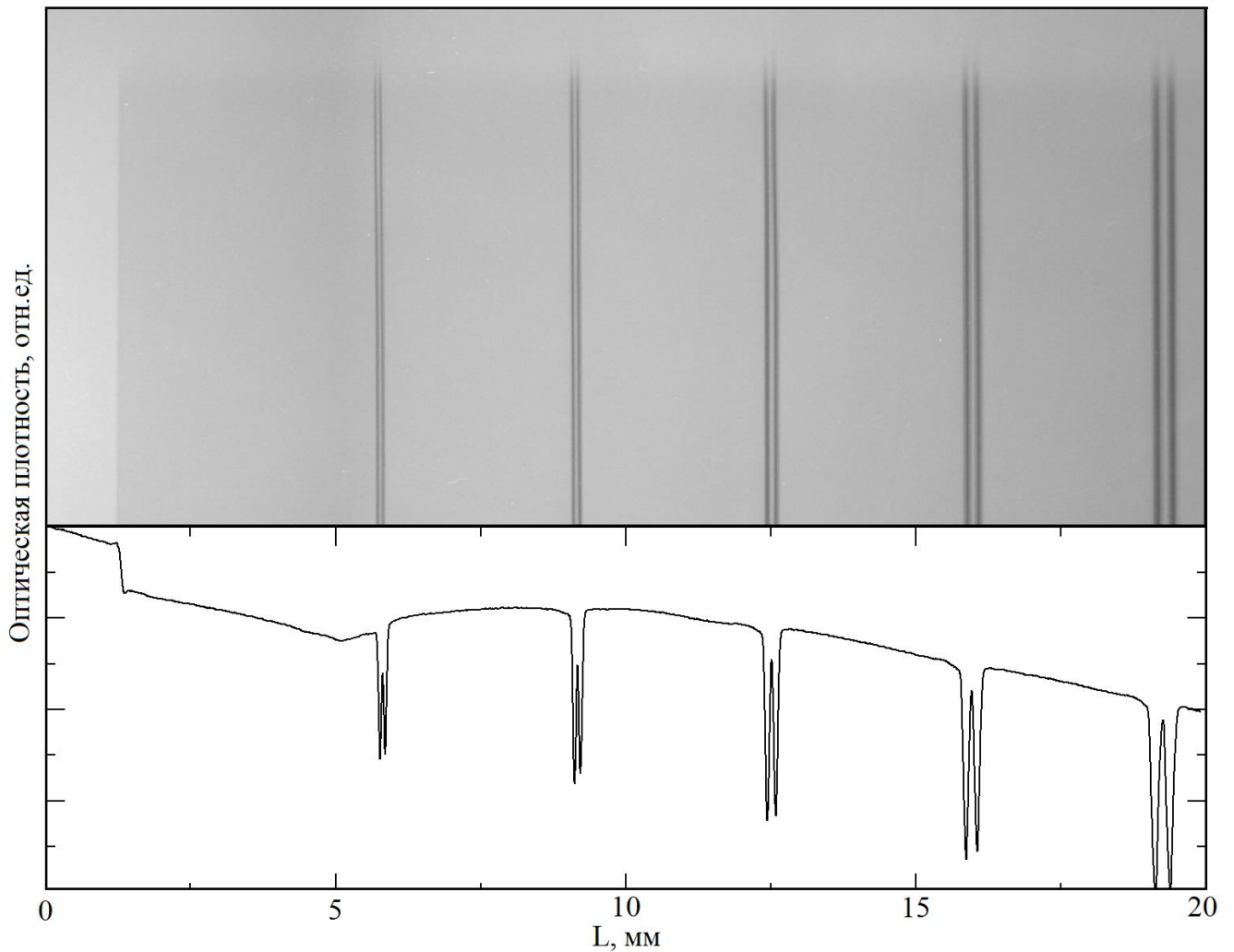


Рисунок 33 - Изображение части эталона нерезкости Duplex IQI и денситограмма с парами 9 -13 проволок при использовании источника с 50 мкм Si- мишенью, ориентированной вдоль пучка электронов

Глубина минимума в центре двойного пика на кривой фотометрирования изображения 13-й пары проволоки составляет 58 %, следовательно, пространственное разрешение, рассчитанное аппроксимацией значений от соседних проволочных пар, изображения составило менее 50 мкм.

Микроструктура может эффективно использоваться с энергией фотонов рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий до 400 кэВ. При использовании излучения с энергией в мегавольтном диапазоне результаты могут быть не вполне удовлетворительными. Однако, для сравнения уменьшенного фокусного пятна источника с узкой мишенью Ta (энергия фотонов > 1МэВ) и с

применением стандартной мишени W толщиной 1,5 мм также были получены рентгенограммы двухпроволочного эталона (рисунок 34 и 35).

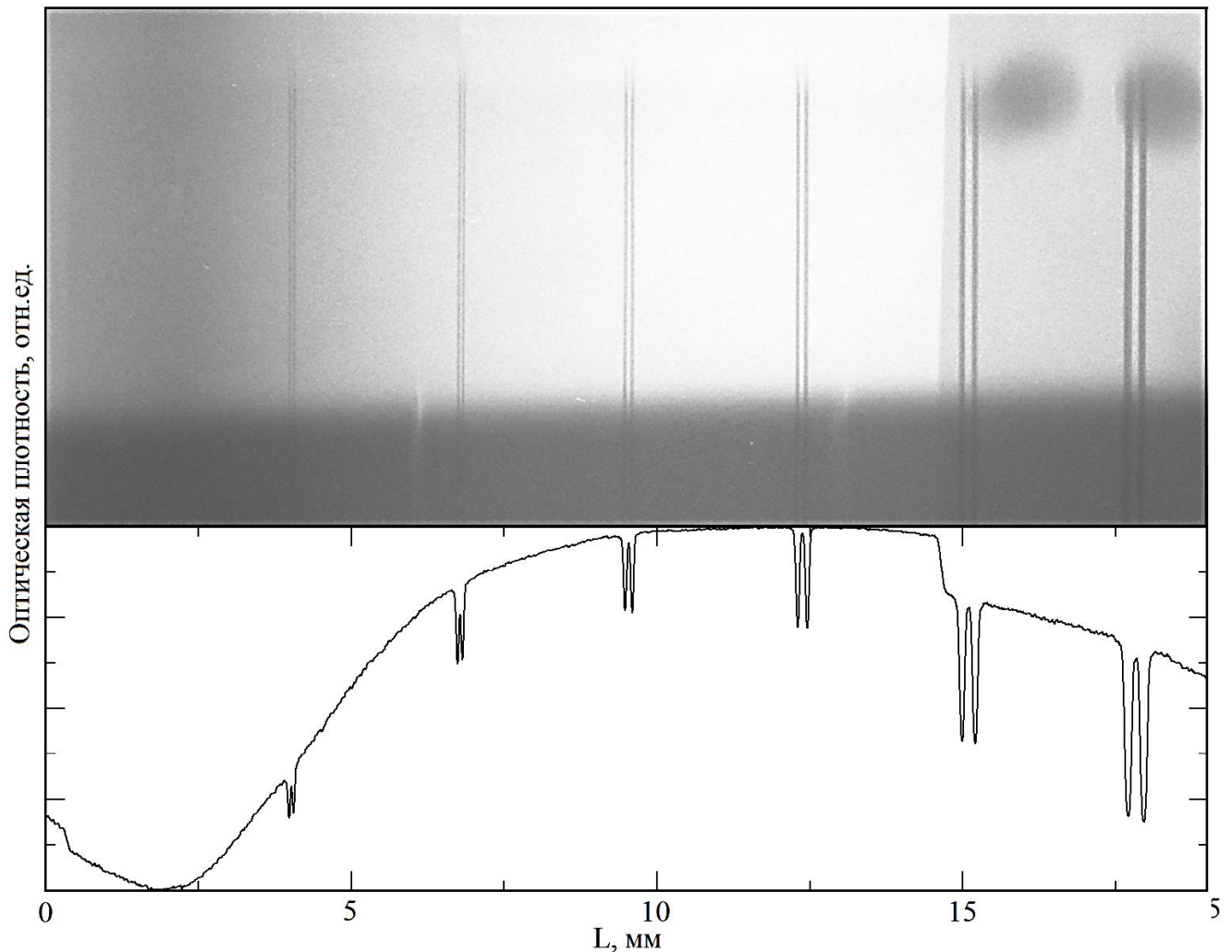


Рисунок 34 - Позитивное изображение и денситограмма части эталона нерезкости Duplex IQI с 8 -13 парами проволок при использовании источника с 13 мкм Та- мишенью, ориентированной вдоль пучка электронов

Глубина минимума в центре двойного пика на кривой фотометрирования изображения полученного с микрофокусным источником с использованием 13 мкм Та мишени 13-ой пары проволоки Duplex IQI составляет 63 % (рисунок 34), следовательно, пространственное разрешение рассчитанное изображения составило также менее 50 мкм.

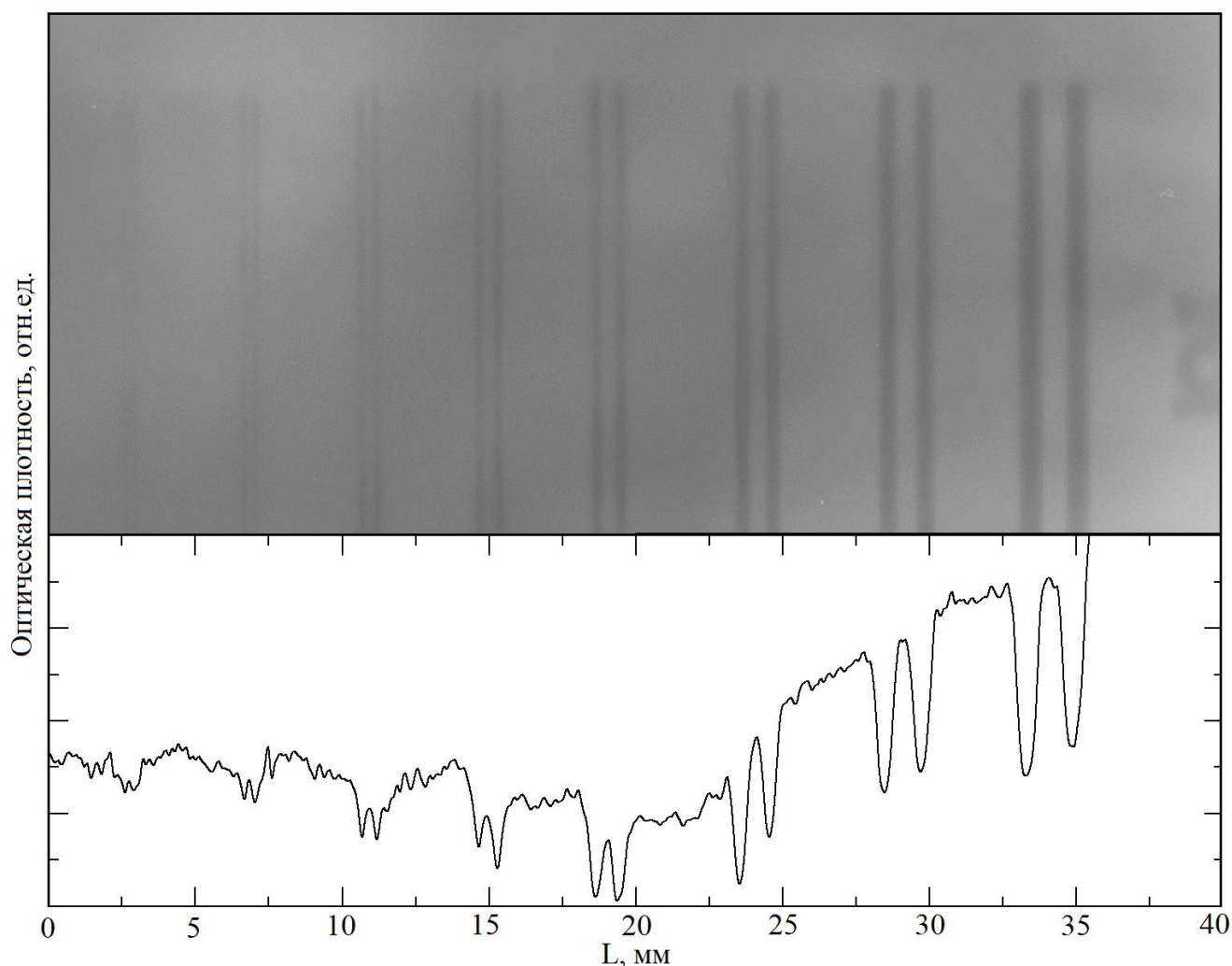


Рисунок 35 - Позитивное изображение и денситограмма части устройства Duplex IQI с 1 – 8 парами проволок при использовании источника с обычной W мишенью

Глубина минимума в центре двойного пика на кривой фотометрирования изображения полученного с применением источника с обычной W мишенью 6-ой пары проволок составляет 28 % (рисунок 35), следовательно, пространственное разрешение рассчитанное аппроксимацией значений от соседних проволочных пар изображения составило 220 мкм.

Для сравнения результатов пространственного разрешения рентгенографических изображений, полученных с применением трех источников излучения с разными размерами фокусного пятна, приведен график  $SR_b^{image}$



(рисунок 36). Пространственное разрешение в случае использования микромишеней в десятки раз лучше, чем с обычной мишенью.

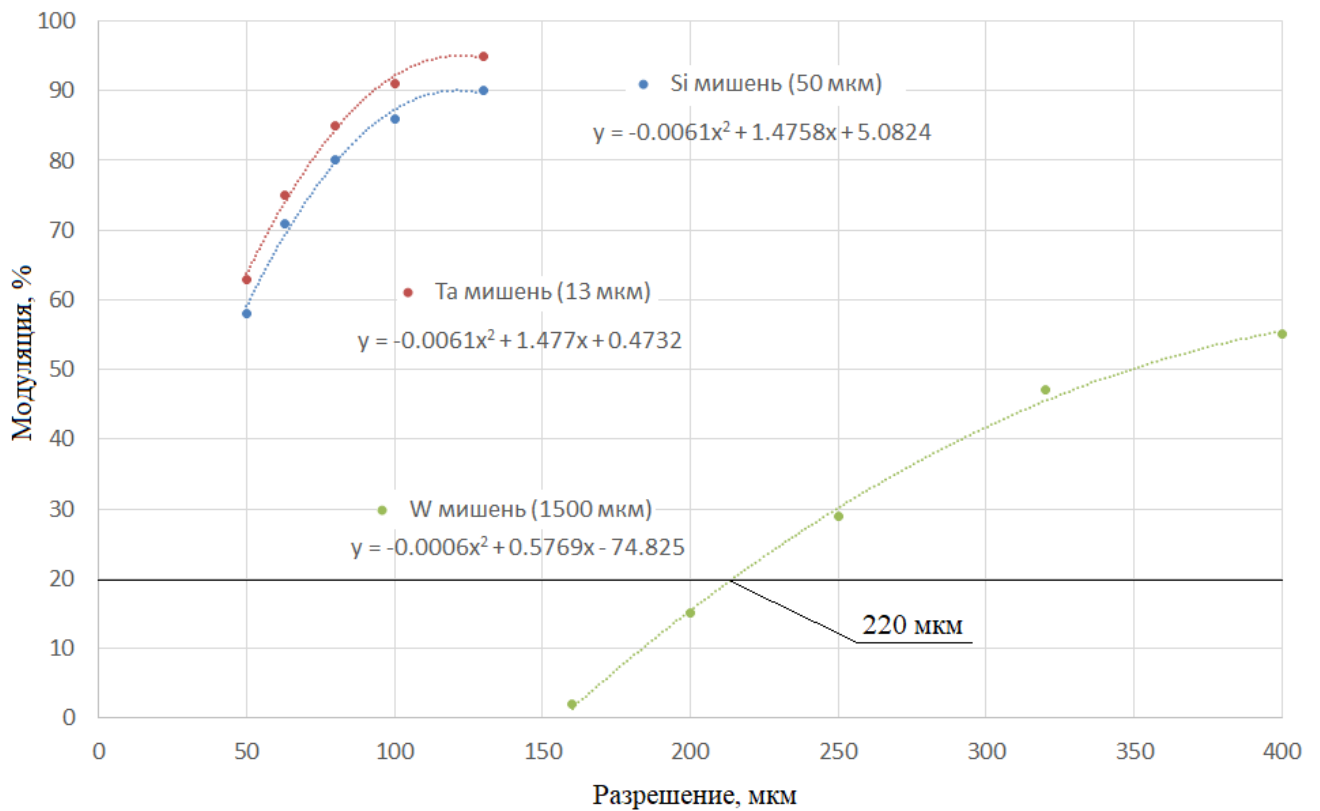


Рисунок 36 – Сравнение пространственного разрешения рентгеновских снимков, полученных с применением классического и микрофокусных источников излучения

На рисунке 37 представлено дополнительно увеличенное изображение 13-ой и 12-ой пар самых тонких Pt-проволок эталона Duplex IQI с диаметрами 50 (а, в) и 63 (б, г) мкм с применением микрофокусного источника с Si (а, б) и Ta мишенью (в, г).



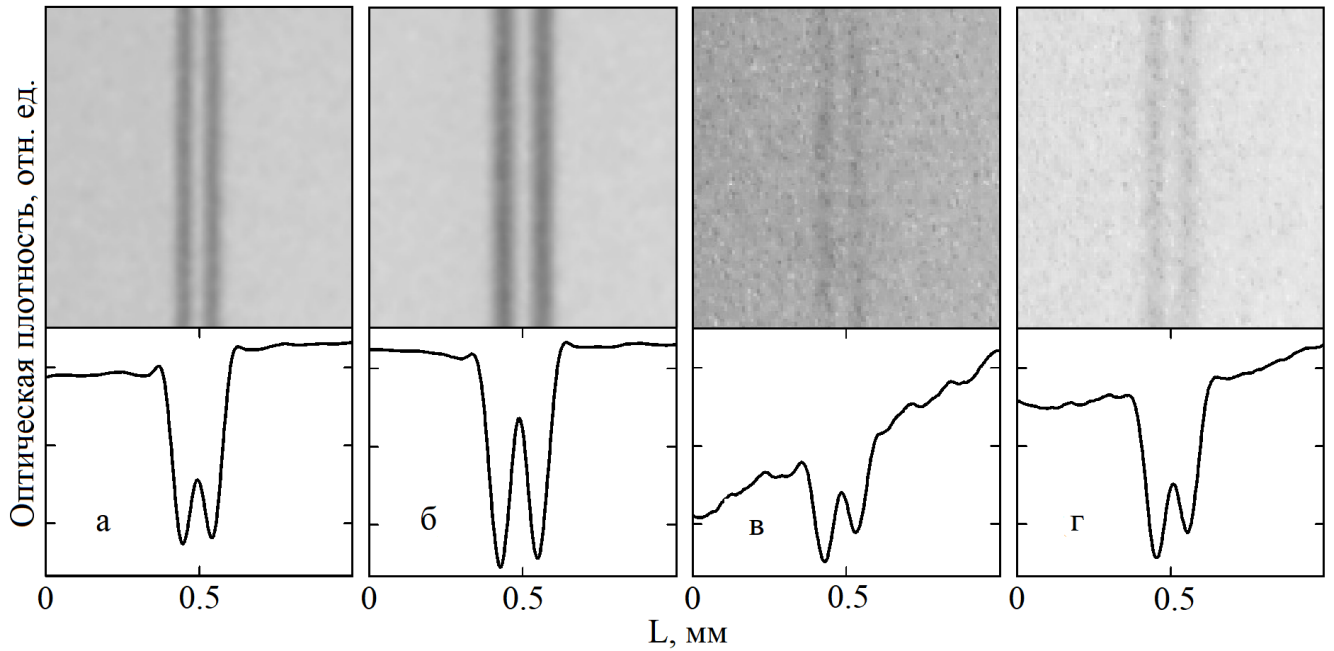


Рисунок 37 – Увеличенное позитивное изображение и денситограмма 13-ой и 12-ой пар Pt-проволок эталона Duplex IQI с диаметрами 50 (а, в) и 63 (б, г) мкм с применением микрофокусного источника с Si (а, б) и Ta мишенью (в, г).

Видно, что контрастность и резкость тонких деталей объекта ухудшается с применением энергий в МэВ-ном диапазоне, так как излучение из Ta-мишени более жесткое, из-за поглощения мягкой части спектра в тяжелом материале мишени. Следовательно, только более толстые проволоки обеспечивают достаточно хороший абсорбционный контраст.

Сравнивая просвечивающие способности микрофокусного и стандартного источников тормозного излучения в рентгенографии с применением эталона Duplex IQI (рисунок 30) можно сказать о приблизительной разрешающей способности снимка, которая гораздо выше в случае применения источника с микромишенью. Нерезкость в данном случае больше и зависит от размера фокусного пятна источника, который приблизительно равен размеру сечения микромишени, ориентированной вдоль электронного пучка.

Генерированное тормозное излучение в узкой Ta-мишени, может способствовать получению высококонтрастных изображений деталей

исследуемых объектов из более плотных материалов, чем при использовании излучения, генерированного в кремниевой мишени.

### 3.2 Косвенный метод исследования размеров фокусного пятна в модифицированном бетатроне с микромишенью

Косвенный метод измерения фокусных пятен основан на связи между пространственным разрешением и размером фокусного пятна приведен в стандарте ASTM E 2698 [90] и в научной статье [91]. Его можно использовать для оценки размера фокусного пятна путем уже измеренного базового пространственного разрешения  $SR_b$  и нерезкости изображения  $U_T$ .

$$F = \frac{M}{M-1} \sqrt[3]{U_T^3 - \left(\frac{2.0}{M} SR_b\right)^3}, \quad (4)$$

Для тестирования горизонтального размера источника был использован эталон IQI с 13-ой парой платиновых проволок диаметром 50 мкм и промежутком 50 мкм между ними. Плоскость эталона при измерениях была перпендикулярна оси конуса излучения, а проволоки этого элемента при измерениях располагались параллельно плоскости кристалла для достижения наилучшего разрешения.

В случае протяженного вдоль пучка электронов источника излучения, контрастность изображения определенной пары проволок определяется проекцией источника в направлении этой пары. При ориентации 50 мкм Si пластины вдоль пучка электронов следует ожидать высокого разрешения деталей микроструктуры, которые расположены вблизи направления плоскости пластины. В данном случае эффективный горизонтальный размер  $F_H$  разработанного источника излучения можно оценить, как:

$$F_H = t + T |\theta_H|, \quad (5)$$

где  $t, T$  – толщина и длина мишени вдоль электронного пучка,  $\theta_H$  – горизонтальный угол электронной эмиссии из пластины в направлении выбранной пары проволок эталона IQI.

В эксперименте были получены рентгенограммы эталона нерезкости IQI при различных его положениях в конусе излучения. На рисунке 38 приведены фрагменты изображений 13-ой пары проволок, при ориентации Si пластины  $\theta_{Si} = 0.05^\circ$  и угловых положениях этой пары  $\theta = -1.45^\circ; -0.89^\circ; -0.15^\circ; 0.82^\circ$  и  $1.25^\circ$  относительно направления пучка электронов (рисунок 21). Точки с координатой  $l_0 = 0$  на приведенных изображениях отстоят от светлой полосы (рисунок 21) на рентгенограммах на расстояниях 27.9; 16.8; 2.1 мм (слева от полосы) и 17.3; 25.8 мм (справа от полосы), фотографии (а – в) и (г, д), соответственно. Ниже приведены профили плотностей почернения на изображениях вдоль горизонтальных линий, перпендикулярных полосам почернения.

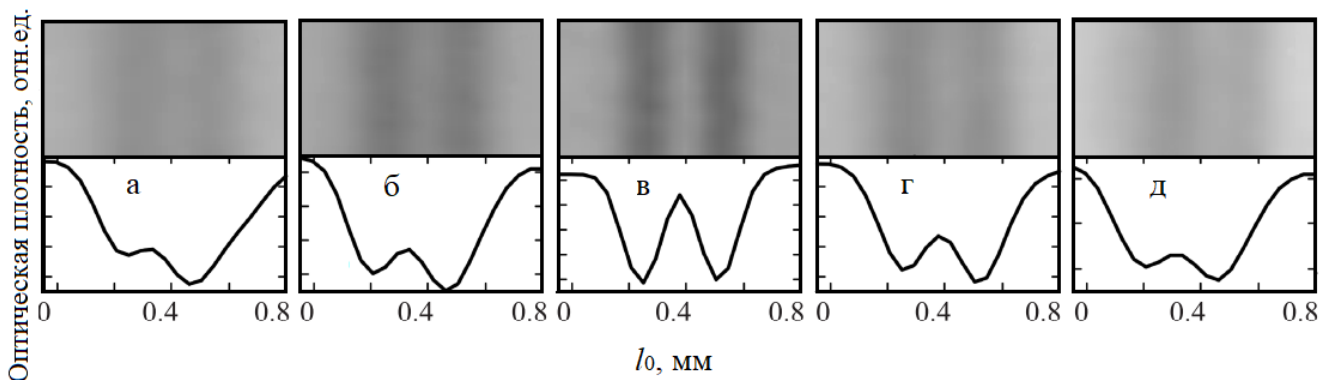


Рисунок 38 - Изображения 13-й пары проволок эталона IQI и профили плотностей почернения, полученные при обработке рентгенограмм, измеренных при увеличении  $\times 3$ ,  $\theta_{Si} = 0.05^\circ$  и угловых положениях этой пары  $\theta = -1.45^\circ$  (а);  $-0.89^\circ$  (б);  $-0.15^\circ$  (в);  $0.82^\circ$  (г) и  $1.25^\circ$  (д) относительно пучка электронов

Согласно вышеприведенной формуле (5), эффективный горизонтальный размер  $F_H$  источника излучения, соответствующий вышеприведенным угловым положениям  $\theta$  этой пары в конусе излучения, составляет  $F_H = 147, 108, 57, 110$  и  $140$  мкм, так как угловые положения этой пары относительно направления плоскости мишени  $\theta_H = -1.4^\circ; -0.84^\circ; -0.1^\circ; 0.87^\circ$  и  $1.3^\circ$ ,

соответственно. Приведенные изображения показывают, что наилучшее разрешение 13-ой пары проволок эталона IQI демонстрирует фотография (в), которая соответствует минимальному эффективному размеру источника. Как видно, качество изображения 13-ой пары уменьшается при смещении объекта от оси конуса излучения из-за увеличения эффективного размера источника. Кривые фотометрирования, представляющие собой двойные максимумы, демонстрируют при этом уменьшение глубины центрального минимума.

Согласно подхода [91], разработанного для анализа полученных изображений эталона IQI, горизонтальный размер источника можно оценить, используя приведенную в [91] формулу (4) для расчета размера источника излучения по диаметру той пары проволок, которые будут разделены функцией профиля с глубиной модуляции менее 20%. Критерию  $K$  соответствует изображение (а) на рисунке 38, где  $K \approx 19\%$  от средней высоты двойного пика. Расчет по формуле (4) работы [91] дает величину горизонтального эффективного размера источника  $F_H = 148$  мкм для этого положения эталона IQI в конусе излучения. Эта величина согласуется с расчетной величиной  $F_{H\text{exp}} = 147$  мкм, рассчитанной по вышеприведенной формуле (5). Так как в этом случае  $T|\theta_H| = 97$  мкм, то имеем  $t = F_{H\text{exp}} - 97$  мкм = 51 мкм, что хорошо согласуется с реальной толщиной кристалла.

Был измерен и вертикальный размер фокусного пятна источника с кристаллом Si. Для этого получено изображение IQI, когда пары проволок были перпендикулярны светлой полосе на фотографии углового распределения интенсивности излучения, и можно было по размытию их изображений оценить вертикальный размер источника излучения. Вертикальный размер источника  $F_V$  излучения равен диаметру пучка электронов  $D_e$ , который гораздо больше толщины использованной Si мишени. Эффективный вертикальный размер источника  $F_{V\text{exp}} = F_V \cos \theta_V$  слабо зависит от вертикального углового положения  $\theta_V$  точки наблюдения в конусе излучения, так как раствор конуса излучения составляет около  $3^\circ$ . На рисунке 39 приведен фрагмент эталона IQI, где

присутствуют изображения первых пять пар проволоки, диаметры которых и промежутки между ними равны 0.8; 0.63; 0.5; 0.4; 0.32 мм. Видно, что с разным контрастом достоверно разрешаются проволоки первых трех пар. Согласно подходу [91], в этом случае вертикальный размер источника можно оценить в 1.5 мм по параметрам третьей пары проволок, для которой глубина минимума в центре двойного пика на кривой фотометрирования составляет  $K \approx 26\%$  от его высоты.

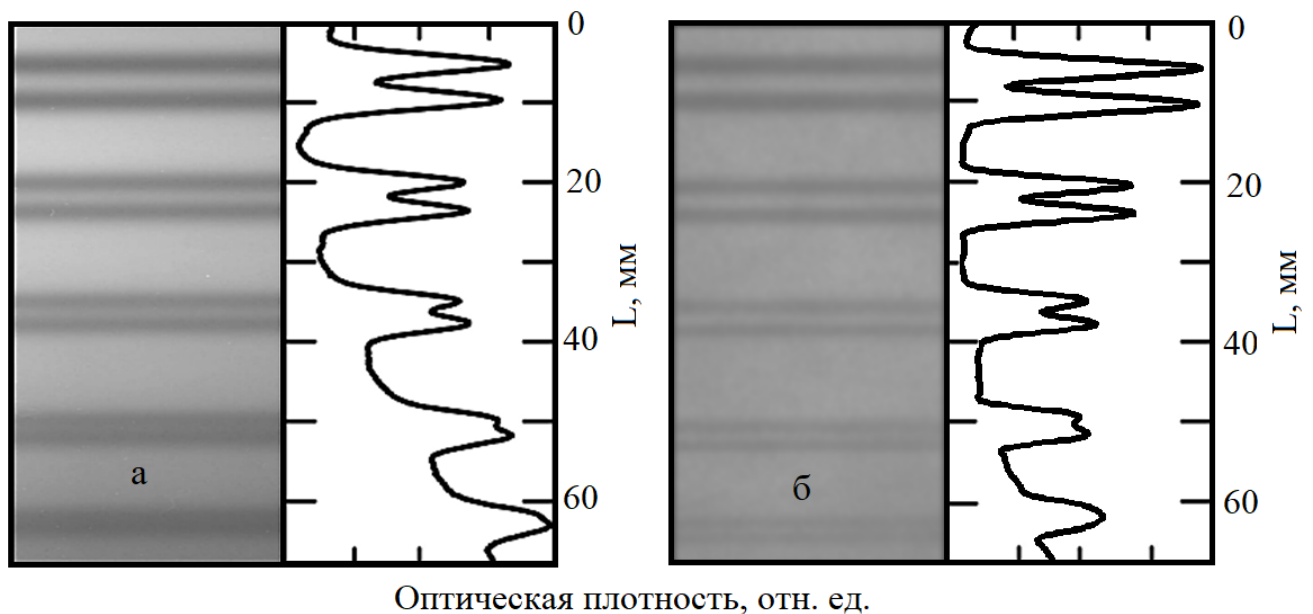


Рисунок 39 – Изображение части эталона нерезкости Duplex IQI и денситограмма с 1 – 5 парами проволок при использовании источника с 50 мкм Si- мишенью (а), и с 13 мкм Ta (б), ориентированной вдоль пучка электронов

Размеры фокусного пятна по вертикали для мишеней Si и Ta практически одинаковы, так как определяются размером электронного пучка. Для стандартной W мишени проволоочки оказались не видны из-за большого размера электронного пучка (более 3 мм).

### 3.3 Контроль сопряжений поверхностей деталей с использованием микрофокусного тормозного излучения

Дуплексный эталон можно эффективно использовать с радиационными энергиями до 400 кэВ. Для энергий в диапазоне МэВ результаты могут быть не совсем удовлетворительными. Поэтому, для исследования качества изображения, полученного с применением жесткого тормозного излучения ( $E_{\gamma} > 1$  МэВ), генерируемого в Та мишени, использовался объект контроля, состоящий из четырех стальных прямоугольных стержней (рисунок 40) размерами  $9 \times 9 \times 35$  мм<sup>3</sup> с зазорами шириной 10 мкм между их полированными поверхностями. Такой подход также применялся для моделирования продолговатого дефекта в толще стали.

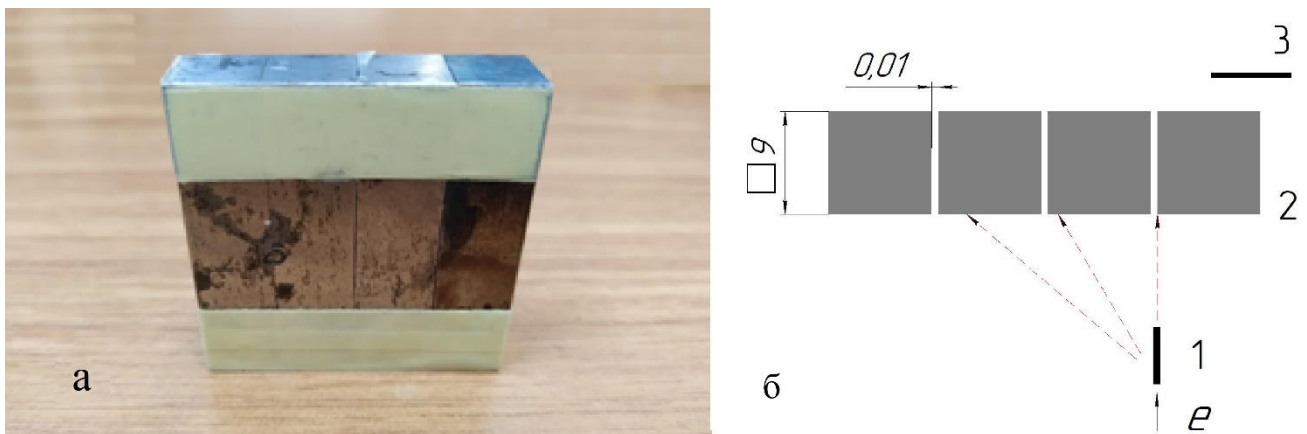


Рисунок 40 – а) - объект контроля, состоящий из четырех стальных прямоугольных стержней размерами  $9 \times 9 \times 35$  мм<sup>3</sup> с зазорами шириной 10 мкм между их полированными поверхностями, б) - схема эксперимента (вид сверху):

1 – расположение узкой мишени на электронном пучке 2 – объект контроля,

3 - стальная пластина

Зазоры рассматривались как модель неточности сборки, которая должна быть обнаружена с помощью радиографии с использованием созданного источника. Объект также снабжен прикрепленной стальной пластиной толщиной 0,5 мм. Изображение объекта и пластины было получено с увеличением 2,4 раза (рисунок 41).

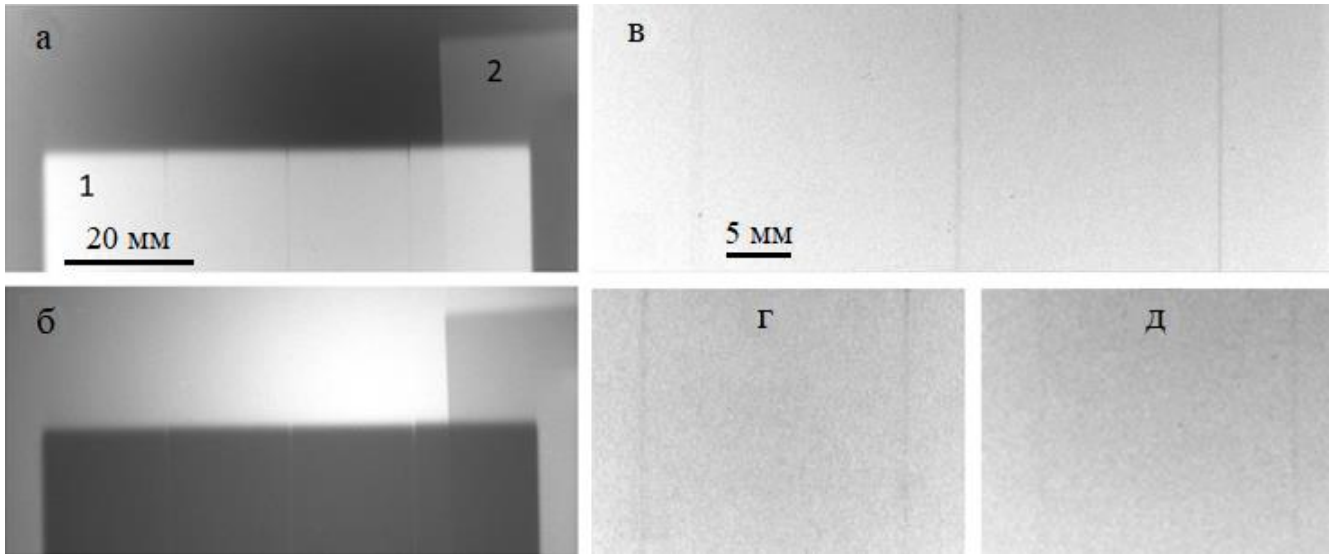


Рисунок 41 - Негативное (а) и позитивное (б) изображения объекта (1) и тонкой стальной пластины (2); увеличенные изображения левого, среднего и правого промежутков (в); изображения среднего и правого зазоров с дополнительной стальной пластиной толщиной 20 и 40 мм (г и д)

Негативное (а) и позитивное (б) изображения объекта, представленные на рисунке 41, показывают достаточно хорошее разрешение зазоров. Также можно видеть, что их ширина увеличивается справа налево. Это увеличение щелевого изображения обусловлено различной ориентацией поверхностей стержней, образующих зазоры относительно оси конуса излучения (рисунок 41а). Объект ориентирован так, чтобы поверхности стальных стержней, которые образовывали правый зазор, были параллельны части излучения, проходящей вдоль этих поверхностей. Поверхности среднего и левого зазоров имеют углы наклона относительно направлений гамма-лучей  $\theta_z = 1^\circ$  и  $2^\circ$  соответственно.

Ширина  $S_z$  изображения щели может быть оценена как:

$$S_z = \frac{L_2 ((t_z + l_z \cdot \theta_H) + F_H)}{L_1 - F_H} \quad (6)$$

где  $t_z$  и  $l_z$  - ширина и длина щели,  $L_1$  и  $L_2$  - расстояния от мишени до объекта и до рентгеновской пленки,  $\theta_H$  - горизонтальный угол излучения от



мишени в направлении зазора, а  $F_H$  - эффективный горизонтальный размер источника, который ориентировочно равен ширине сечения мишени. В этом случае  $\theta_H = \theta_Z$ , ширина  $S_Z$  щелевого изображения увеличивается с увеличением угла  $\theta_Z$ .

Кроме того, изображения на рисунке 41 демонстрируют повышенную контрастность изображений правого края объекта (1) и левого края тонкой пластины (2). Это связано с эффектом фазового контраста, так как размер источника близок к 13 мкм. Изображение левого края объекта размыто, так как изображение формируется излучением, испускаемым от мишени под углом около  $\theta_H = 3^\circ$  к поверхности мишени. Вероятно, эффект фазового контраста не реализуется из-за достаточно большого эффективного размера  $F_H$  источника излучения, который в этом случае равен  $F_H = 222$  мкм. Для достижения наилучшего разрешения дефектов или границ раздела сред на изображениях, образованных поглощением или фазовым контрастом, необходимо ориентировать их вдоль направления плоскости внутренней мишени. Этот эффект хорошо виден на рисунке 42, где показаны дополнительно увеличенные зазоры изображений без стальной пластины (а, б), ориентированных под углом  $\theta_Z = 0$  и  $2^\circ$ , относительно проходящих гамма лучей, и со стальной пластиной толщиной 40 мм (в, г), соответственно. Стальные пластины использовались в качестве поглотителей рентгеновского излучения, что увеличивало долю жесткой части энергетического спектра  $\gamma$ -квантов тормозного излучения. Это также имитировало ситуацию для выявления зазоров находящихся в стальном объеме с помощью микрофокусной рентгенографии.

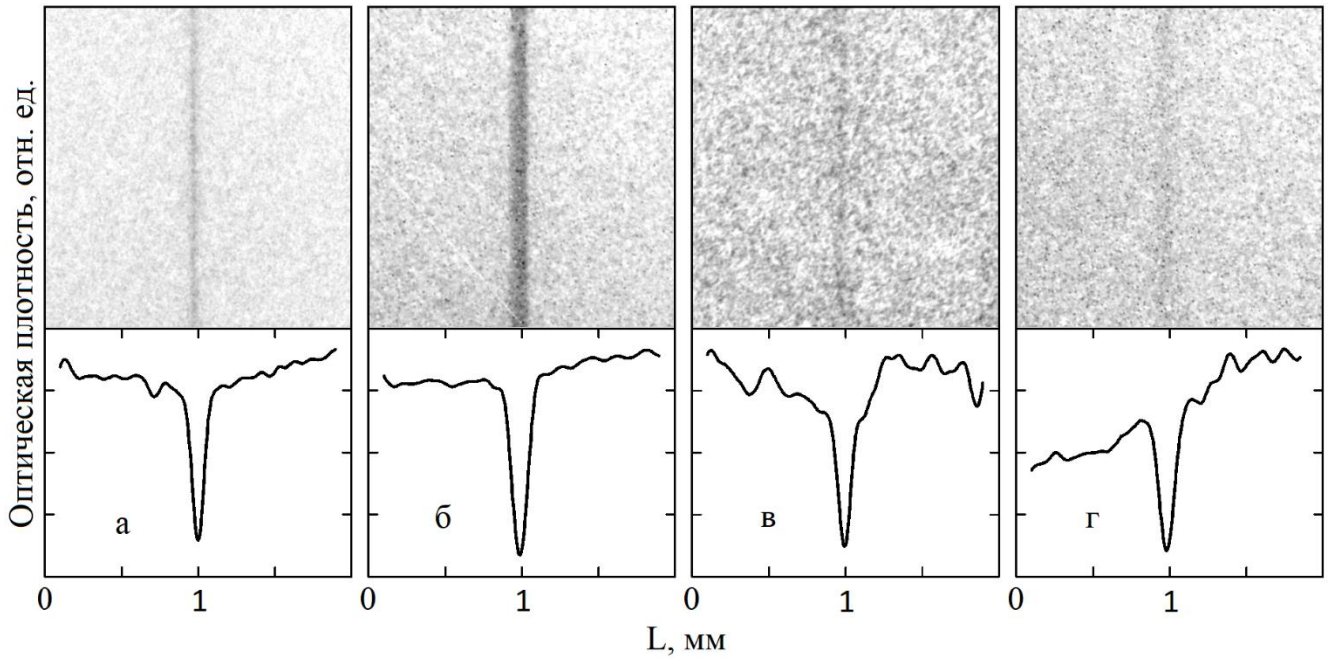


Рисунок 42 - Увеличенные в 2,4 раза негативные изображения и денситограммы изображений воздушного зазора между стальными пластинами толщиной 20 мкм без (а, б) и с (в, г) дополнительным стальным пластинчатым поглотителем толщиной 40 мм. Углы ориентации зазоров  $\theta z = 0^\circ$  (а, в) и  $\theta z = 2^\circ$  (б, г)

Для сравнения результатов контроля, выполненных с применением бетатрона с обычной мишенью, были получены рентгенограммы того же составного объекта исследования при тех же параметрах контроля (рисунок 43 б).

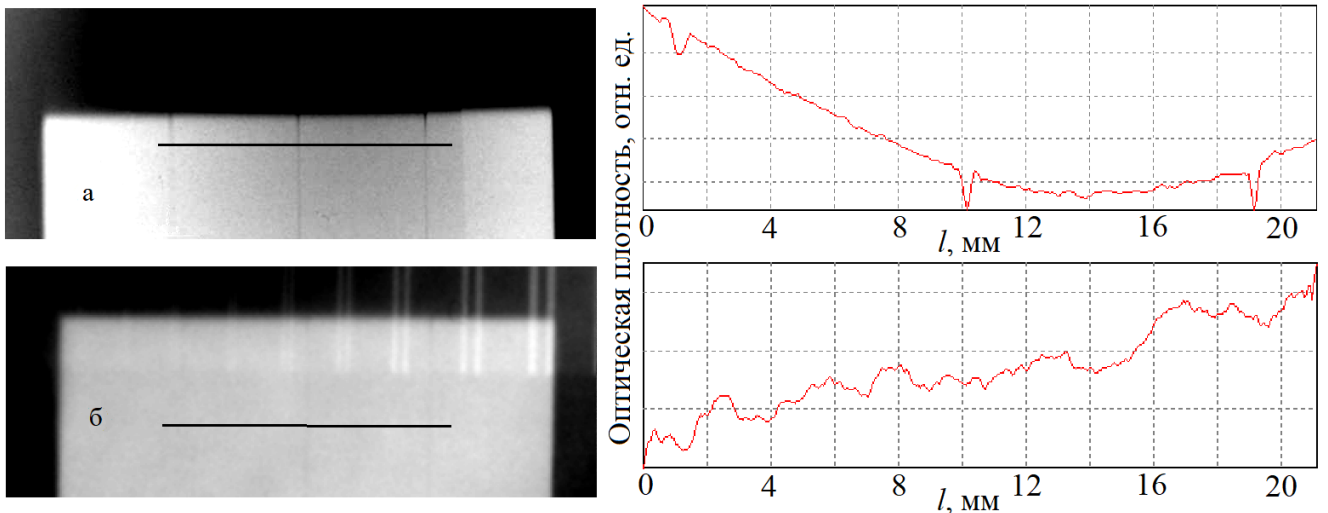


Рисунок 43 - Негативные изображения объекта и денситограммы, полученные с применением микрофокусного (а) и классического (б) источников тормозного излучения

На рисунке 43а прослеживается высокая чувствительность контроля 10 мкм зазора, чего не скажешь о результате, полученном при классическом источнике излучения с большей мишенью. Дальнейшее сравнение источников не имеет смысла, так как появляется размытость изображений, снижается нерезкость и контраст изображений.

Повторный эксперимент был проделан со сборкой шести стальных пластин с зазорами 20 мкм и толщиной 15 мм вдоль пучка излучения (рисунок 44), что может обеспечить достаточно сильное поглощение излучение и сформировать изображение за счет абсорбционного контраста. Сверху сборку прикрывал седьмой горизонтально расположенный стальной блок идентичный остальным. Экспериментальный образец помещался перед прямоугольными пластинами толщиной 10, 15 и 15 мм различной высоты, так что излучение проходило разные толщины стали в разных участках сборки. Пластины служили поглотителями излучения, которые увеличивали долю тормозного излучения в жесткой области спектра.



Рисунок 44 – Экспериментальный образец из шести стальных пластин с толщинами 15 мм и зазорами шириной 20 мкм между ними

На рисунке 45а показано изображение (негатив) сборки. Наиболее светлый участок изображения соответствует участку сборки с наибольшей суммарной толщиной стали 55 мм, чуть выше - 40 мм стали.

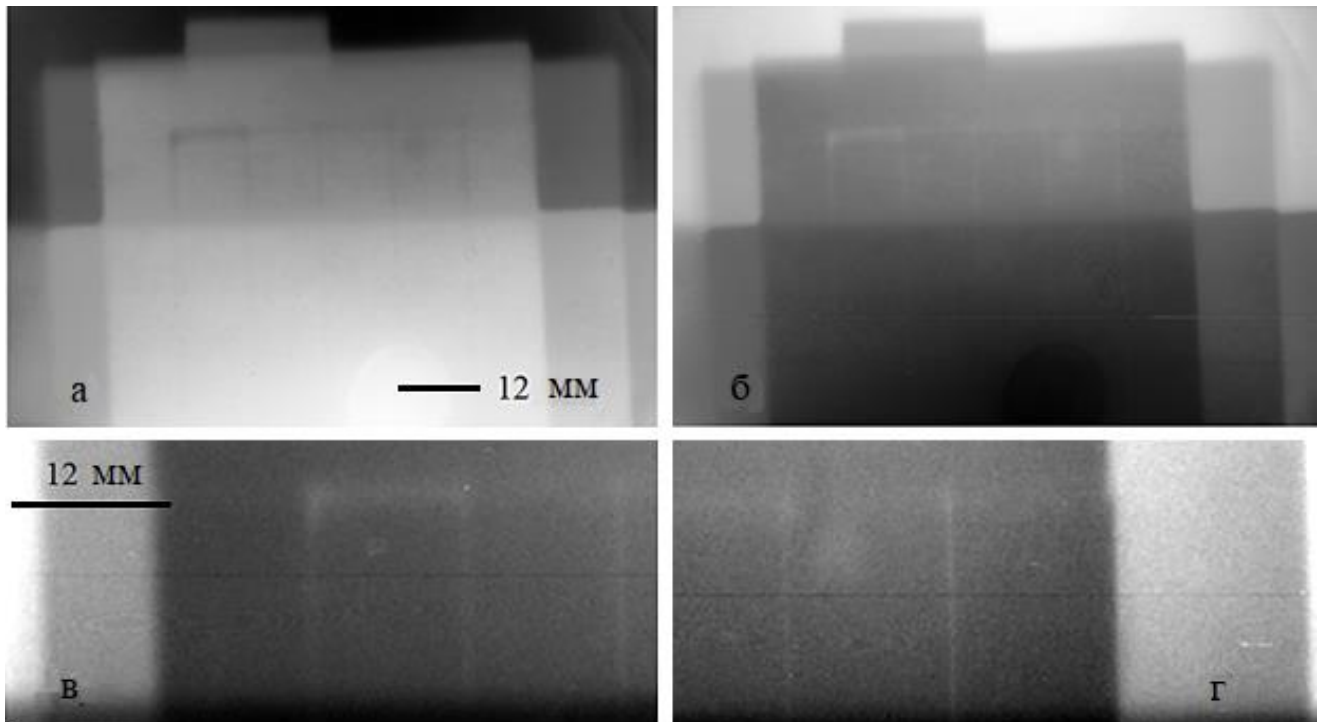


Рисунок 45 - Негативное (а) и позитивное (б) изображения объекта с 20 мкм зазорами между блоками: (в) и (г) увеличенные для демонстрации фрагменты изображения (б), расположенные в районах левого и правого ее углов, соответственно

Негативное и позитивное изображения образца с 20 мкм зазорами между блоками (рисунок 45) демонстрируют хорошее разрешение зазоров в исследуемом образце за толщиной стали 40 мм. Так же, как и в прошлом эксперименте, ширина увеличивается от зазора к зазору справа-налево, а контраст изображений уменьшается. Это объясняется различной ориентацией плоскостей, образующих зазоры, относительно оси конуса излучения. Образец был ориентирован так, что поверхности блоков, образующие первый зазор справа, были практически параллельны лучам центральной части конуса излучения, которые проходят вдоль этих поверхностей. Поверхности следующих четырех зазоров в образце имеют

углы наклона относительно направления гамма-лучей  $\theta_z = 0.6^\circ, 1.2^\circ, 1.8^\circ, 2.4^\circ$ . Ширину  $S_z$  изображения зазора можно оценить по формуле (6). Видно, что  $S_z$  увеличивается при увеличении угла  $\theta_H$ .

Визуальное оцениваемое качество снимков высокое и показывает достаточно хорошее разрешение пробела. Это связано с эффектом фазового контраста, так как горизонтальный размер фокусного пятна источника близок к 13 мкм.

### **3.4 Контроль плоских включений с использованием микрофокусного тормозного излучения**

Схема эксперимента подобна предыдущим, описанным в главах выше. Исследуемый образец, содержит танталовую фольгу 13 мкм, зажатую между двумя пластиковыми блоками (рисунок 46а). За образцом помещалась стальные пластины с суммарной толщиной до 55 мм на расстоянии 5 см от образца. Пластины использовались для дополнительного поглощения мягкой компоненты спектра ( $E_\gamma < 1$  МэВ) генерированного тормозного излучения и моделирования расположения плоского включения из материала с высокой плотностью в толще стали. Полученные рентгенограммы (негативные изображения) образца (рисунок 46) при различных его ориентациях относительно направления пучка тормозного излучения были обработаны на сканере для их анализа и получения кривых почернения изображений деталей объекта.

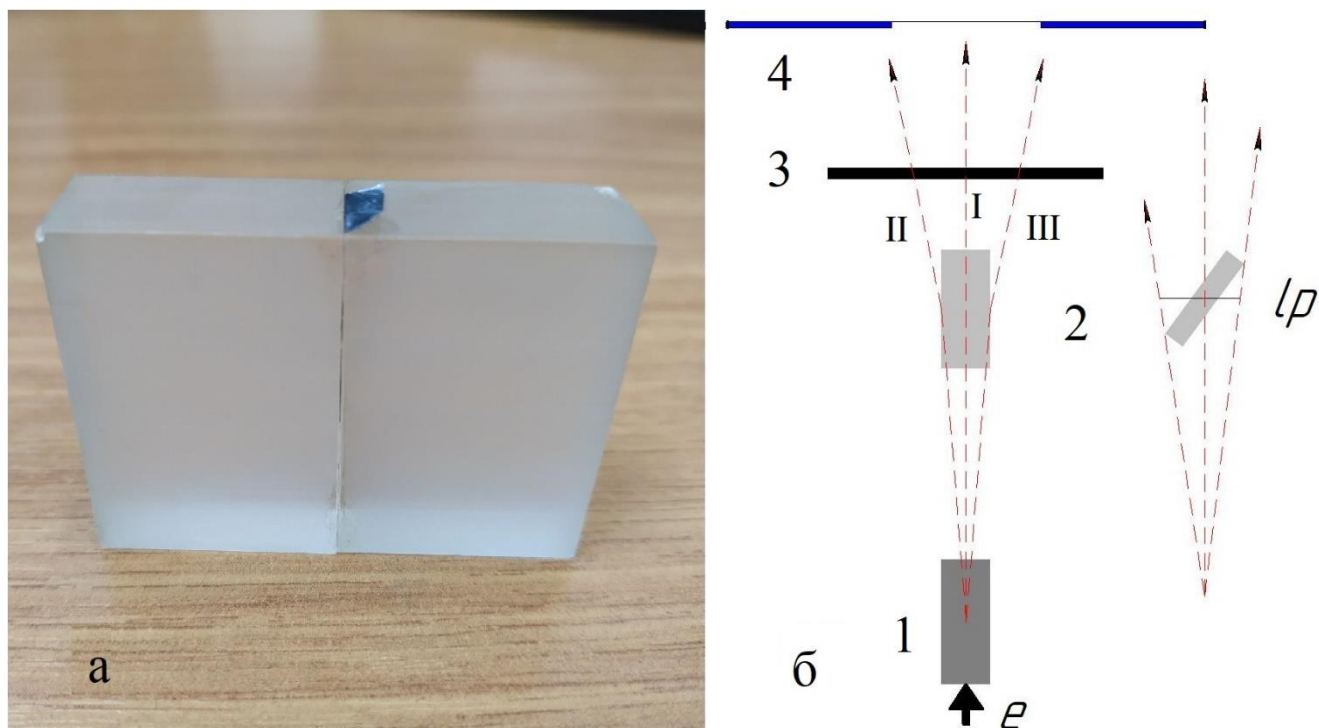


Рисунок - 46 а) - исследуемый образец, состоящий из двух пластиковых блоков с танталовой фольгой толщиной 13 мкм между ними; схема эксперимента: б)  $e$  – электронный пучок, 1 – Та мишень, 2 – Та фольга, 3 – стальная пластина-поглотитель, 4 – схема изображения, I – центральный луч, II и III – преломленные лучи,  $lp$  – проекция Та фольги при ее ориентации относительно направления электронного пучка

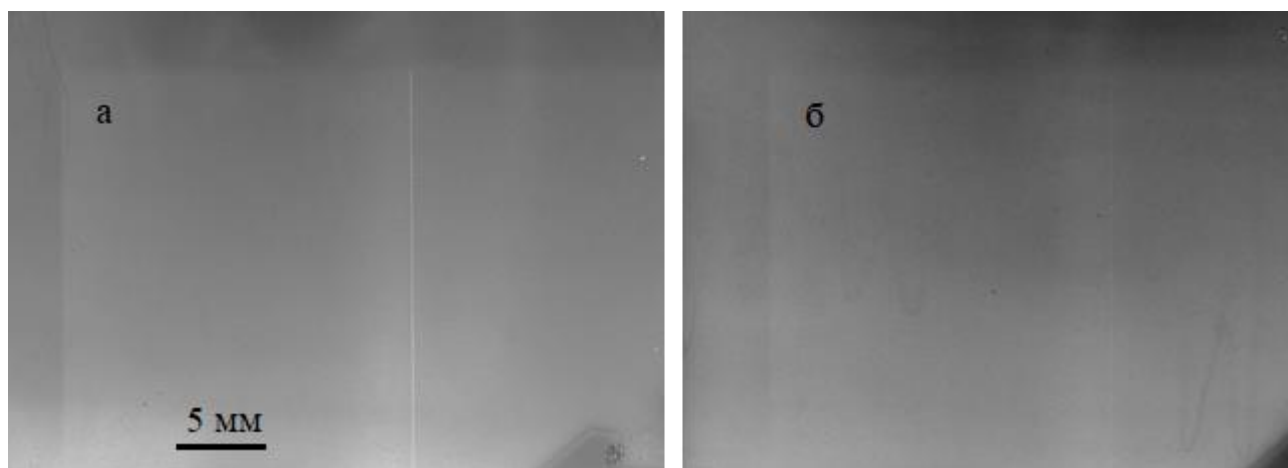


Рисунок 47 – Негативное изображение пластиковых блоков с 13 мкм танталовой фольгой между ними при ориентации фольги вдоль оси конуса излучения без пластины-поглотителя (а) и с пластиной-поглотителем толщиной 55 мм (б)

На рисунке 48 приведены изображения Та фольги ориентированной под углом  $\theta = 0.6^\circ$  относительно оси конуса излучения (а) и вдоль оси конуса излучения (б) с помощью внешнего гониометра. Изображения были получены с увеличением 2.4, а затем дополнительно увеличены для демонстрации. Длина фольги вдоль пучка излучения составляет 4 мм, что обеспечивает достаточно сильное поглощение жесткого излучения и формирует ясное изображение фольги за счет абсорбционного контраста, которое становится уже при уменьшении угла  $\theta$ .

Рисунок 48 демонстрирует нормированные на максимум денситограммы, которые были измерены вдоль линий, которые перпендикулярны изображениям фольги.

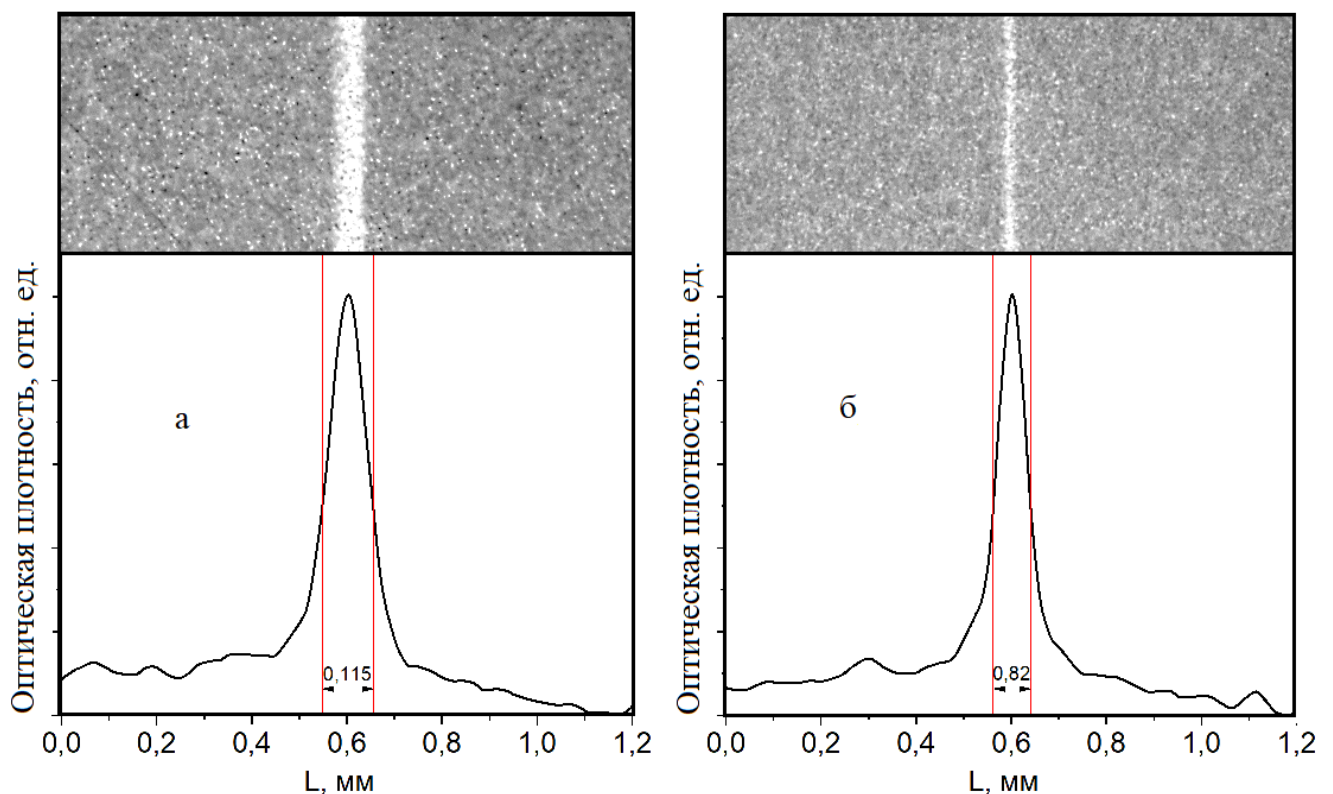


Рисунок 48 - Изображения 13 мкм Та фольги, ориентированной под углами  $\theta = 0.6^\circ$  (а) и  $0^\circ$  (б) к оси конуса излучения и их денситограммы

Денситограмма позволяет измерить геометрические параметры изображения деталей объекта исследования. Приведенные денситограммы



показывают, что при наклоне фольги на угол  $\theta = 0.6^\circ$  относительно оси конуса излучения ширина  $\Delta L$  денситограммы на половине ее высоты больше в 1,4 раза, чем в случае  $\theta = 0^\circ$ .

На рисунке 49 представлена измеренная зависимость ширины  $\Delta L(\varphi)$  денситограммы изображения на половине ее высоты от угла  $\varphi$  наклона Та фольги в пучке излучения от начального положения  $\varphi = 0^\circ$ . Из ориентационной зависимости следует, что при угле ориентации около  $\varphi = 0.8^\circ$  относительно начального положения  $\varphi = 0^\circ$ , фольга ориентирована вдоль направления излучения, так как ширина изображения Та фольги здесь является минимальной. Ожидалось, что ширина изображения фольги будет изменяться линейно в согласии со штриховыми линиями, показанными на рисунке 49. Точка пересечения штриховых линий будет соответствовать точной ориентации фольги вдоль пучка излучения. Но, измеренная ориентационная зависимость  $\Delta L(\varphi)$  демонстрирует иное поведение в области  $\varphi = 0.8^\circ - 1^\circ$ .

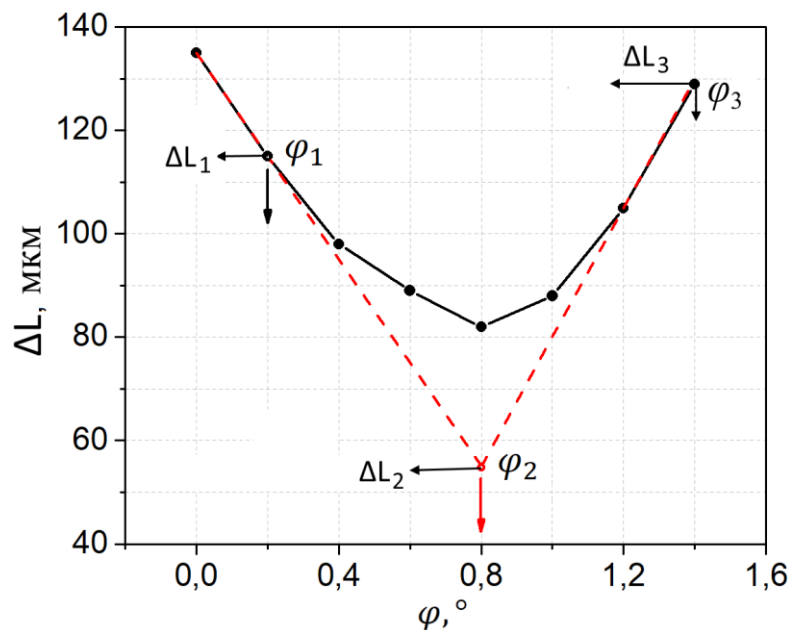


Рисунок 49 - Зависимость ширины  $\Delta L$  денситограммы изображения от угла  $\varphi$  наклона Та фольги в пучке излучения от начального положения  $\varphi = 0^\circ$

Возможно, это определяется эффектом преломления излучения на поверхностях фольги, что приведет к уширению изображения фольги, как это

показано на рисунке 46б (боковые лучи). Отметим, что эффект преломления формирует краевой фазовый контраст в изображениях, образованных полихроматическим излучением [94, 98].

Угол  $\alpha_2$  выхода излучения из фольги связан с углом  $\alpha_1$  падения на поверхность фольги изнутри и углом  $\alpha_f$  полного внешнего отражения излучения выражением  $\alpha_2 = (\alpha_1^2 + \alpha_f^2)^{0.5}$ . Ясно, что при наклоне фольги отношение  $\alpha_2/\alpha_1$  стремится к 1. Эффект преломления становится малым и значительного уширения изображения фольги не наблюдается (рисунок 48а). Рисунок 49 показывает, что при  $1,2^\circ < \varphi < 0,4^\circ$  экспериментальная зависимость ширины изображения фольги согласуется с ожидаемыми линейными зависимостями, показанными штриховыми линиями.

При угле  $\theta$  наклона Та фольги относительно направления излучения ширину изображения фольги можно оценить по формуле (6). Расчетная величина  $S_H$  изображения фольги увеличивается линейно при увеличении угла  $\theta$  и равна  $S_H = 0.15$  мм при  $\theta = 0.6^\circ$ . Это равно ширине, нормированной денситограммы, на высоте 30 % (рисунок 48а).

На рисунке 50 представлены увеличенные изображения Та фольги для наглядного сравнения изменения резкости и контраста в зависимости от ее ориентации и толщины просвечиваемой стали.

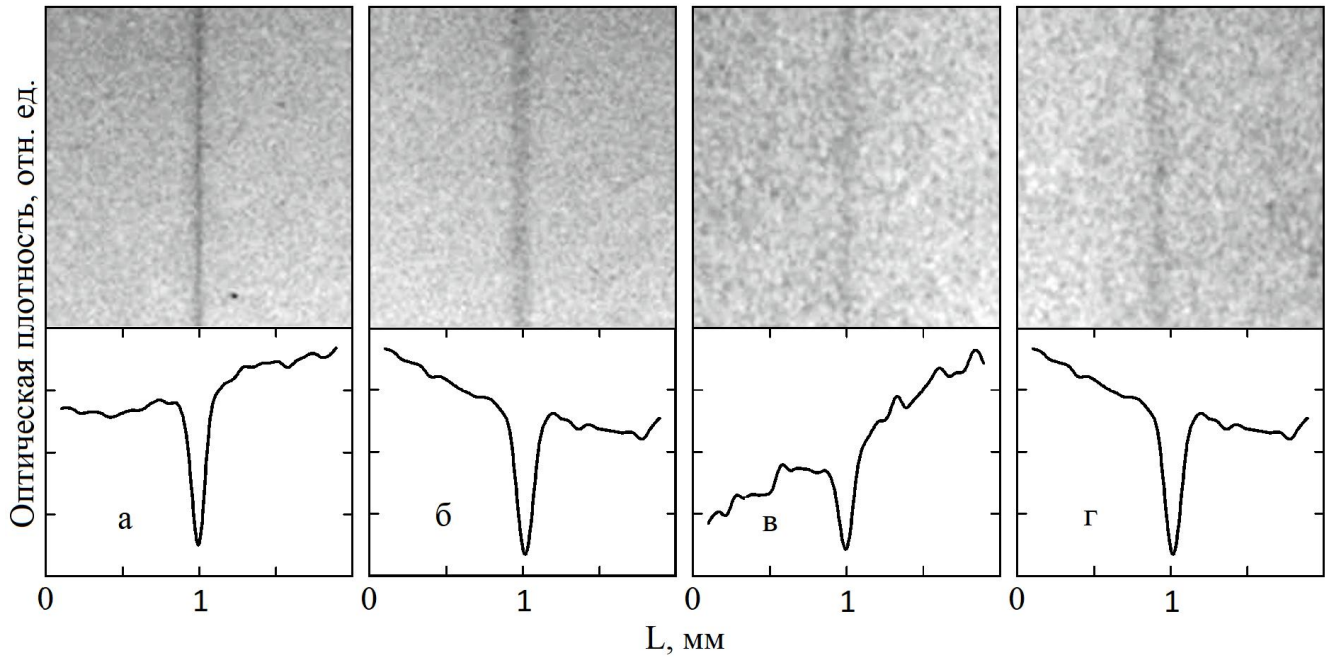


Рисунок 50 - Увеличенные в 2,4 раза позитивные изображения и денситограммы изображений фольги Та 13 мкм ориентированной при  $\theta = 0$  (а, в) и  $\theta = 0.6^\circ$  (б, г) относительно пучка излучения: без (а, б) и с (в, г) дополнительными стальными пластинчатыми поглотителями толщиной 55 мм.

При увеличении толщины пластины контраст изображения фольги уменьшается, так как преобладает все более жесткое излучение, из-за поглощения мягкой части спектра генерированного излучения в пластине. Тем не менее, видно, что наличие Та-фольги за 55 мм стальной пластиной уверенно определяется, чего нет при использовании бетатрона с толстой мишенью.

### 3.5 Рентгеновский метод фазового контраста и демонстрация применения его для исследования толстостенных изделий

В настоящее время метод фазового контраста широко используется для получения увеличенных изображений микрообъектов при использовании источников острофокусного монохроматического рентгеновского излучения и соответствующей оптики. Для исследований используются источники рентгеновского излучения такие, как синхротрон [99], рентгеновская трубка [100]

и источник излучения фемтосекундной лазерной плазмы [98, 101]. Для исследований эффекта фазового контраста в изображениях необходим источник с достаточно малым фокусом, чтобы обеспечить достаточно высокую пространственную когерентность излучения. Но, фазовый контраст формируется и при использовании полихроматического излучения за счет эффекта преломления излучения на резкой границе раздела двух сред с различными коэффициентами преломления [94]. При этом имеет место ослабление интенсивности излучения в направлении падающей на поверхность раздела сред доли излучения и усиление интенсивности излучения в направлении преломленного пучка.

На рисунке 51 представлен фрагмент изображения эталона Duplex IQI, который был получен в главе 3.1 при использовании рентгеновского излучения, генерируемого в 50 мкм Si мишени. Изображение демонстрирует высокий контраст пары 50 мкм Pt проволок, из-за малого горизонтального размера источника излучения. Обращая внимание на формирование контраста изображений верхней и боковой граней угла пластикового держателя проволочной микроструктуры, видно, что изображение верхнего края Duplex IQI, который перпендикулярен длинной стороне мишени, размыто, из-за большого вертикального размера источника излучения. Но, наблюдается ясный контраст в изображении правого края эталона IQI. Дополнительно увеличенное изображение (б) края эталона и денситограмма (в) демонстрируют резкий максимум и минимум почернения на фотографии, которые соответствуют темной и светлой полосам с расстоянием между ними около 320 мкм. Это типичная картина для фазового контраста на резкой границе раздела двух сред с различной диэлектрической проницаемостью, обусловленная эффектом преломления полихроматического излучения на поверхности раздела сред. При преломлении пучка излучения на краевой поверхности, формируется узкая светлая полоса в изображении, фиксируемом рентгеновской пленкой, в направлении первоначального пучка, а преломленное излучение складывается с излучением, прошедшим рядом с краем, что формирует узкую темную полосу в изображении.

Отметим, что картина контраста подобна той, которая наблюдалась в [18], где краевой фазовый контраст был подробно исследован с использованием рентгеновского излучения микрофокусного источника, созданного на базе компактного синхротрона.

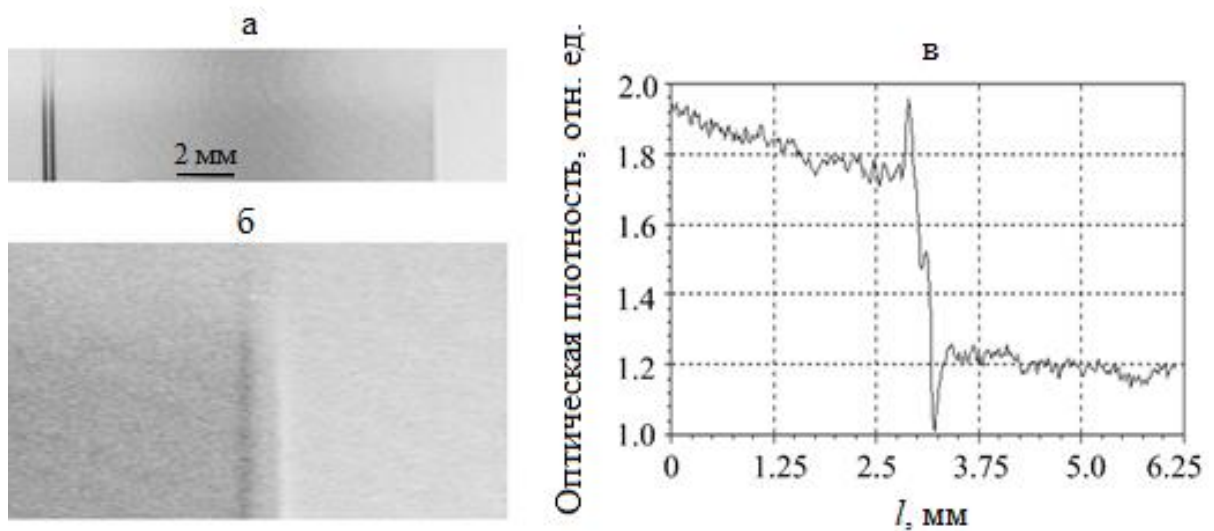


Рисунок 51 - а) – увеличенное ( $\times 3$ ) изображение 13-й пары Pt проволок и края эталона IQI при 50 мкм Si мишени; б) – дополнительно увеличенное изображение края эталона IQI; в) – денситограмма изображения (б)

На рисунке 51а приведен увеличенный фрагмент рентгенограммы Duplex IQI, который располагался в пучке излучения так, чтобы изображение пар проволок было перпендикулярно, а изображение края эталона параллельно светлой полосе на распределении интенсивности излучения и отстояло от нее на расстоянии 1 мм. Фрагмент показывает изображения W проволок второй пары эталона диаметром 0,63 мм, размытые по вертикали за счет большого вертикального размера области генерации излучения электронами, и резкое контрастное изображение правого края эталона. Контраст края пластикового держателя и торцов проволок образован узкими полосами повышенного и пониженного почернения по разные стороны от границы раздела сред, из-за эффекта краевого фазового контраста. Особенно ярко выражен краевой контраст торцов проволок эталона (рисунок 52), вероятно, из-за их более плотного материала.

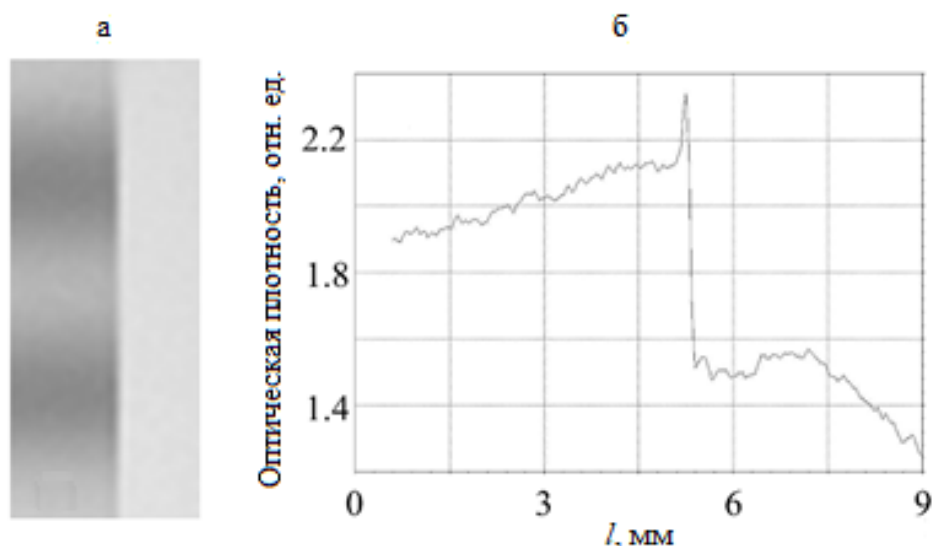


Рисунок 52 – а) фрагмент изображения эталона IQI, когда пары проволок были перпендикулярны светлой полосе в угловом распределении интенсивности излучения, б) денситограмма изображения (а)

На рисунке 54 показано изображение сборки из двух стальных пластин (2 и 3, рисунок 53) толщиной 15 и 10 мм, соответственно, и пластины-поглотителя (7, рисунок 53) толщиной 30 мм, которое было получено с увеличением 2,5 при использовании жесткого тормозного излучения, генерируемого в 13 мкм Та фольге. Прямоугольные пластины были расположены одна за другой, так что излучение проходило через различные толщины стали в разных участках сборки (рисунок 53б). Целью эксперимента было наблюдение фазового контраста в изображениях краев пластин с различными толщинами, которые сформированы тормозным гамма-излучением. Пластина (7) служила поглотителем излучения, которая подавляла долю тормозного излучения в рентгеновской области спектра. Гамма-лучи проходили через стальные пластины с общей толщиной 55 и 40 мм в областях вблизи маркеров \*1 и \*2, соответственно. Боковая поверхность правого края пластины (2) толщиной 10 мм была ориентирована с точностью  $0,1^\circ$  вдоль направления гамма-лучей, которые попадали на этот край пластины. Боковая поверхность первой пластины была параллельна боковой поверхности второй пластины.

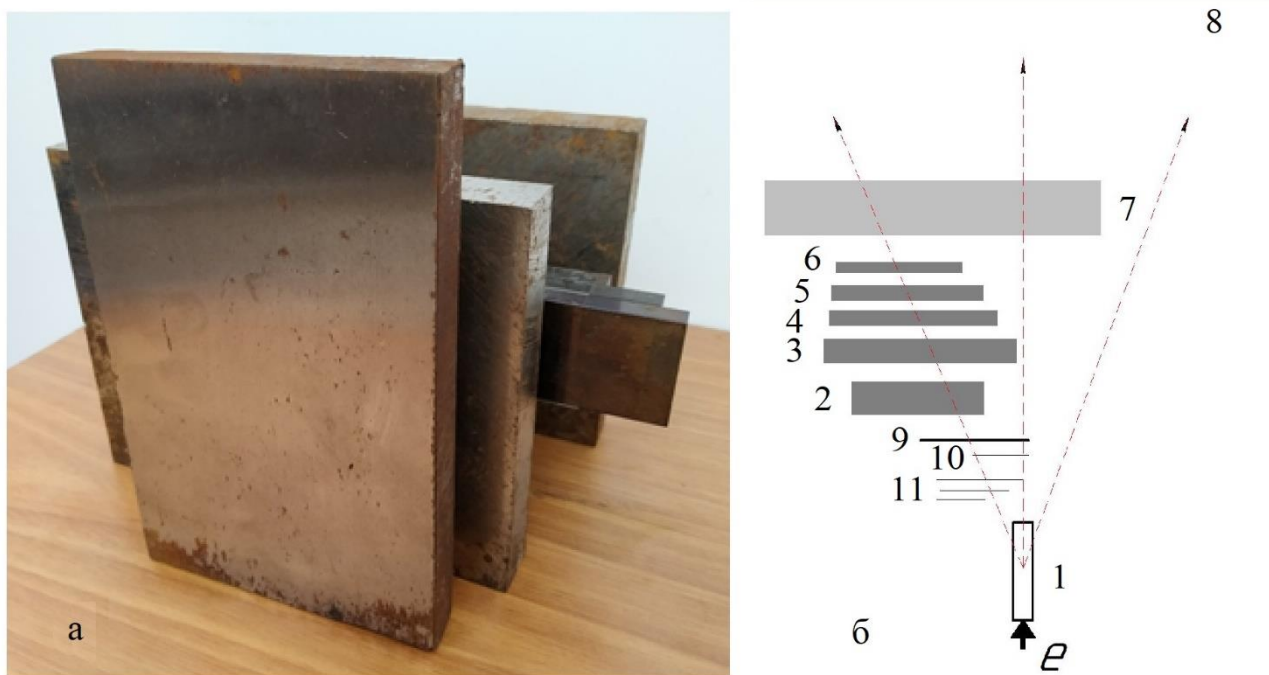


Рисунок 53 – а) общий вид объекта контроля; б) схема расположения образцов в пучке микрофокусного тормозного гамма-излучения 18 МэВ бетатрона: сборки из пластин 2-3 с толщинами 15 и 10 мм, 3-6 с толщинами 10 мм и три по 5 мм, пластины 9 и 10 с толщинами 0,9 и 0,3 мм, а также сборка 11 из трех 25 мкм свинцовых фольг

Рисунок 54 демонстрирует повышенную контрастность изображений правых боковых поверхностей первой и второй пластин. Это определяется эффектом фазового контраста. Размер источника в этом случае составляет около 13 мкм. Изображения левых поверхностей пластин размыты. Изображения этих граней образованы частью излучения, испускаемого мишенью под углом около  $4^\circ$  относительно поверхности мишени. Вероятно, в этом случае эффект фазового контраста не эффективен, из-за достаточно большого эффективного размера источника излучения, который определяется толщиной мишени и проекцией ее боковой поверхности. Зависимость эффективного размера источника, протяженного вдоль электронного пучка, от положения объекта в конусе излучения была исследована в главе 3.2. В этом случае эффективный горизонтальный размер источника излучения рассчитанный по формуле (5) равен



$F_H = 280$  мкм, так как  $t = 13$  мкм - толщина пластины,  $T = 2,5$  мм - длина пластины вдоль пучка электронов,  $\theta_H = 3.83^\circ$  - горизонтальный угол эмиссии из мишени в направлении левого края второй пластины. Кроме того, эти боковые грани пластин наклонены относительно направления излучения, которое формирует изображение краев в данном случае, что также влияет на контраст картины.

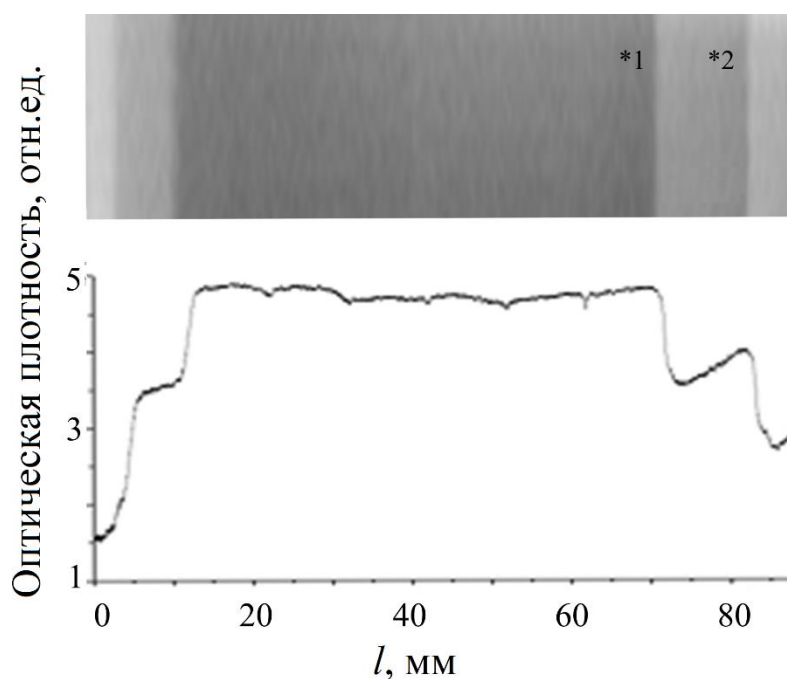


Рисунок 54 - Увеличенное ( $\times 2,5$ ) изображение сборки из двух стальных пластин, полученное при использовании микрофокусного источника тормозного излучения, генерированного в 13 мкм Та фольге 18 МэВ электронами

На рисунке 54 приведена денситограмма демонстрирующая более резкие изменения почернения на фотографии, которые соответствуют правым краям пластин. В районе измерения  $l = 72$  и  $83$  мм график демонстрирует увеличение почернения слева от края 10 мм пластины и уменьшение почернения справа от ее края, что характерно для краевого фазового контраста. Но профиль почернения здесь резко отличается от профиля почернения при краевом фазовом контрасте в изображении, образованном более мягким излучением, генерированным 18 МэВ электронами в 50 мкм Si пластине (рисунок 51, 52). Не наблюдается яркого максимума и минимума, как на денситограмме на рисунке 51б.

На рисунке 55 показаны увеличенные ( $\times 2,5$ ) изображения сборки, состоящей из стальной пластины (3) толщиной 10 мм и трех стальных пластин (4 – 6) (см. рисунок 53) толщиной 5 мм каждая. Изображения получены без дополнительной стальной пластины-поглотителя (а) и при пластине-поглотителе (9) толщиной 15, 35 или 55 мм (б-г). Прямоугольные пластины были расположены одна за другой, так что излучение проходило через различные толщины стали в разных участках сборки. Целью эксперимента было наблюдение краевого фазового контраста при пластинах с толщиной меньшей, чем в первом случае. Также, как и во всех экспериментах, стальная пластина (7) служила поглотителем излучения, увеличивая долю тормозного излучения в гамма-области спектра. Боковая поверхность правого края пластины (4) была ориентирована вдоль направления тормозных гамма-лучей. Боковые поверхности пластин (5) и (6) были параллельны боковой поверхности пластины (4). Рисунок 54 демонстрирует повышенную контрастность изображений боковых поверхностей пластин, из-за эффекта фазового контраста. Но, изображения краев пластин сформированы излучением с различным микрофокусом и различной мягкой частью спектра. Эффективный размер источника для краев пластин (4 – 6) составляет около  $F_H = 13, 24$  и  $35$  мкм, соответственно. Гамма-лучи проходили в областях вблизи маркеров \*1-\*4 через стальные пластины со следующими общими толщинами: (а) 25, 20, 15 и 10 мм; (б) 40, 35, 30 и 25 мм; (в) 60, 55, 50 и 45 мм; г) 80, 75, 70 и 65 мм, соответственно. При увеличении толщины пластины (7), то есть при более жестком спектре излучения, из-за поглощения фотонов мягкой части спектра, различие в почернении в различных частях изображения сглаживается, но, фазовый контраст по-прежнему высок, что определяет достаточную выявляемость краев пластин сборки.

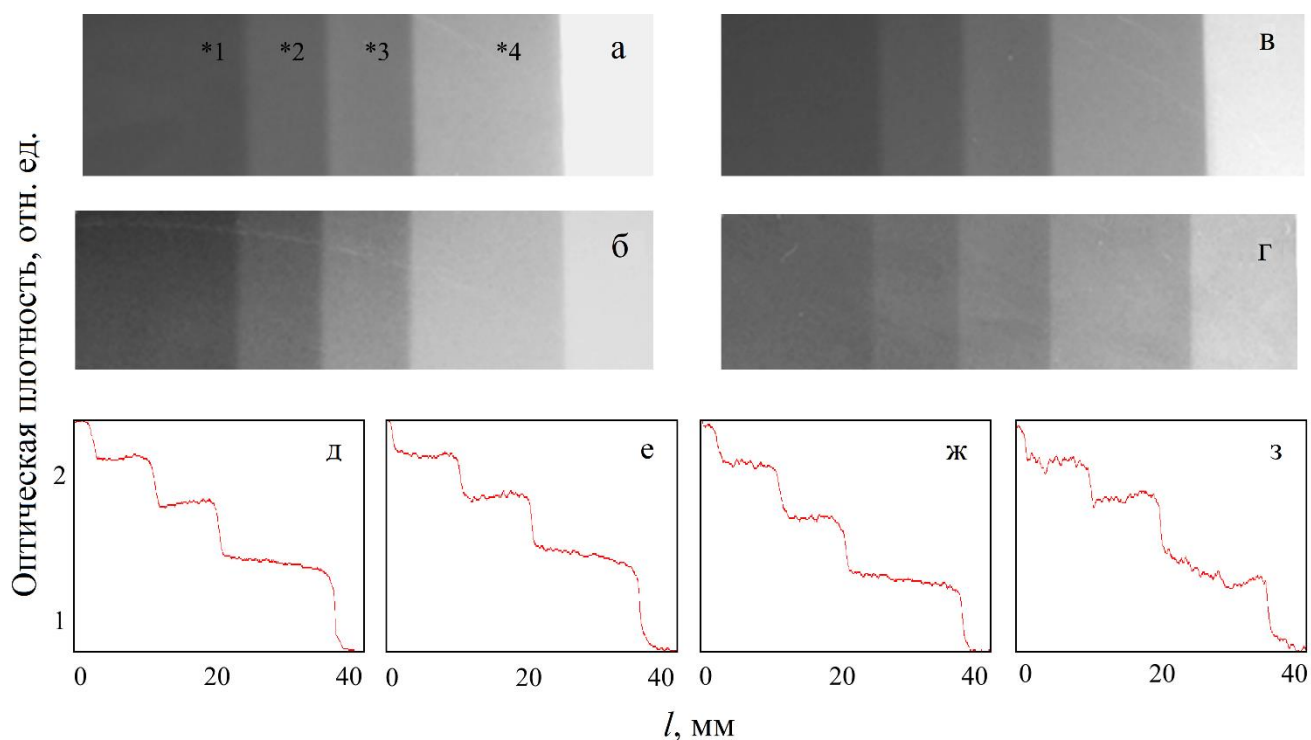


Рисунок 55 - Увеличенные в 2,5 раза изображения сборки из четырех стальных пластин: а) – без дополнительной стальной пластины-поглотителя; б – г) - при толщинах дополнительной стальной пластины-поглотителя 15, 35 и 55 мм, соответственно, и денситограммы изображений, представленных на рисунке д – з, соответственно

Краевой фазовый контраст наблюдался и при гораздо меньших толщинах пластин. На рисунке 56 показаны изображения края стальной пластины толщиной 0,9 мм (а), верхней части стальной пластины толщиной 0,3 мм (б) и правого верхнего угла сборки из трех свинцовых фольг с толщинами 25 мкм (в), составленных друг за другом.

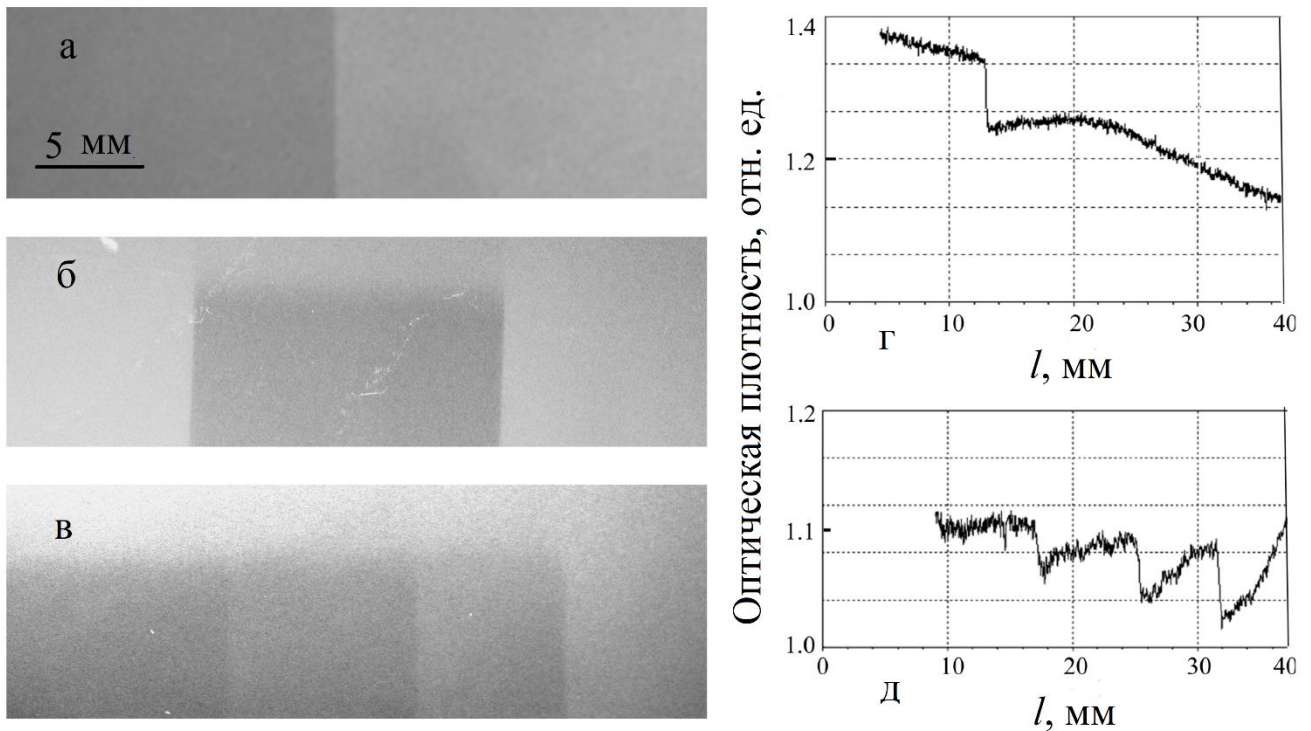


Рисунок 56 - Изображения краев 0,9 и 0,3 мм стальных пластин, (а) и (б), и сборки из трех 25 мкм свинцовых фольг (в). Денситограммы изображений края 0,9 мм стальной пластины (г) и краев свинцовых фольг (д)

Как и в случае толстых пластин, изображения на рисунке 55 демонстрируют фазовый контраст изображений вертикально расположенных краев пластин, за счет малого горизонтального размера источника излучения. Верхние края 0,3 мм пластины (б) и 25 мкм фольг (в) размыты, так как вертикальный размер источника излучения составляет около 1,5 мм.

### 3.6 Выводы к главе 3

В рамках методов рентгеновской томографии и радиографии для получения хорошо разрешимой картины необходимо использовать микрофокусный источник тормозного излучения. В результате проделанных экспериментов было получено практическое подтверждение возможности повышения информативности фазоконтрастных рентгеновских изображений используя источник с микронным пятном.

Представленные экспериментальные результаты показали, что источник излучения на основе бетатрона с внутренней микромишенью можно успешно использовать для получения увеличенных изображений с высоким разрешением при участии наряду с абсорбционным контрастом и эффекта фазового контраста в формировании рентгеновских снимков.

Полученные с трехкратным увеличением изображения микроструктуры Duplex IQI продемонстрировали высокое разрешение его края за счет эффекта краевого фазового контраста. Наблюдаемый впервые для гамма-области спектра эффект фазового контраста в увеличенных изображениях краев пластин с толщинами в широкой области от 25 мкм до 15 мм свидетельствует о высоком качестве пучка излучения, генерируемого микрофокусным источником на основе 13 мкм Та мишени бетатрона.

Сравнивая результаты контроля, полученные с использованием микромишени и стандартной мишени – с большим сечением, можно утверждать, что разработанный модифицированный источник способен выявлять дефекты микронного диапазона в толстостенных изделиях, в отличие от других высокоэнергетических источников излучения.

Высокие технические показатели разработанного микрофокусного источника на основе компактного бетатрона, могут обеспечить высокий уровень лабораторных физических экспериментов, например, как в материаловедении для исследования внутренних границ раздела сред или дефектов в исследуемых композитных материалах, так и для рентгеноскопии более плотных и толстых объектов. Бетатрон генерирует, как микрофокусное тормозное рентгеновское, так и микрофокусное гамма-излучение со спектром вплоть до 18 МэВ, в то время как используемые для неразрушающего контроля микрофокусные трубки пока достигли энергии фотонов тормозного излучения 750 кэВ.

## **ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОФОКУСНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ЦИФРОВЫМ ДЕТЕКТОРОМ**

В промышленном применении для достижения высокого качества изображения использование стандартных плоскопанельных детекторов ограничено из-за доминирующего эффекта поглощения комптоновского рассеяния при высоких энергиях, что приведет к серьезным перекрестным помехам между пикселями. Поэтому в большинстве высокоэнергетических рентгенографических системах и КТ применяют линейные детекторы с щелевым коллиматором для защиты от рассеянного излучения и повышения качества изображения [9, 19, 102-110]. Коммерческие линейные детекторы обычно имеют высокоэффективный сцинтиллятор 10 мм вольфрамат кадмия ( $CdWO_4$ ), который обеспечивает эффективность поглощения 25% при 1–10 МэВ и при этом сохраняет пространственное разрешение до 200 мкм [111].

В этой главе рассмотрено применение микрофокусного источника с цифровым линейным детектором.

### **4.1 Экспериментальная установка**

Опытный образец цифровой рентгенографической системы для контроля крупногабаритных и толстостенных изделий промышленного назначения с высокой чувствительностью контроля и скоростью сканирования состоит из разработанного микрофокусного источника излучения, детектора рентгеновского излучения и системы линейного перемещения (рисунок 57).

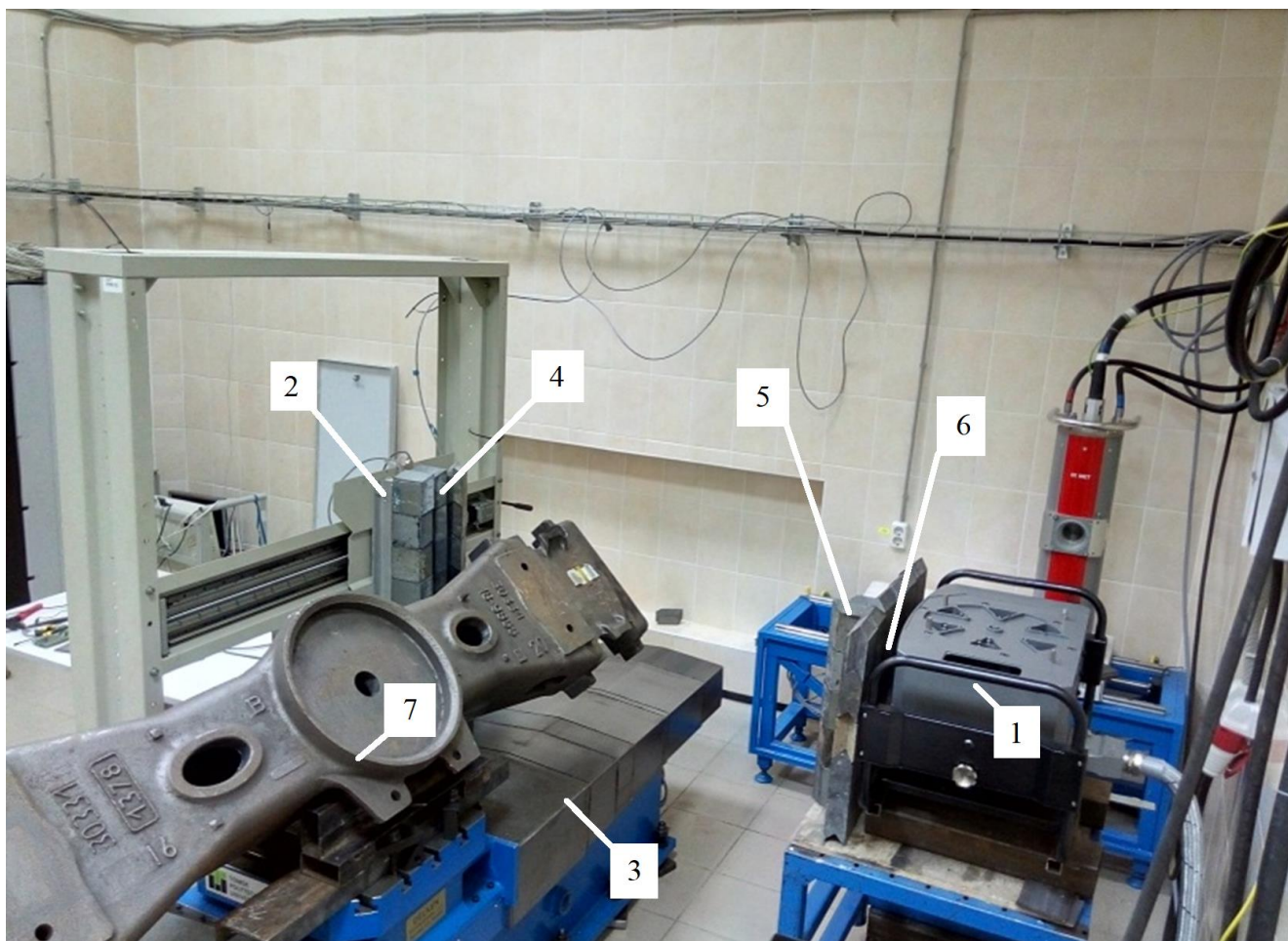


Рисунок 57 - Общий вид рентгеновского комплекса: 1- микрофокусный источник – бетатрон, 2 – линейный детектор излучения, 3 – прецизионный стол, 4 – коллиматор детектора, 5- коллиматор источника излучения, 6- датчик опорного канала, 7 – объект исследования

Результаты, полученные во 2-ой главе, были перенесены на серийно производимые малогабаритные бетатроны. Однако, на данном этапе не удалось реализовать микрофокус менее 50 мкм, из-за сложности производства отпаянной камеры и точного позиционирования микромишени внутри нее. Но решение этой проблемы возможно с течением времени. В качестве высокоэнергетического источника излучения использовался модифицированный бетатрон с энергией электронов 7 МэВ (SEA7). С размером пятна, почти в 6 раз меньшим, чем у других источников гамма-излучения, модифицированный бетатрон способен обеспечить прорыв в разрешении для высокоэнергетической рентгенографии и КТ. Технические характеристики бетатрона SEA7 представлены в таблице 6.



Таблица 6 - Технические характеристики модифицированного бетатрона SEA7.

Тип источника	SEA-7
Энергия ускоренных электронов	2,5-7,0 МэВ
Мощность дозы тормозного излучения	10 Р/мин-м
Рабочий цикл	импульсный
Частота импульсов излучения	400 Гц
Размер фокусного пятна	0,05x1,5 мм
Мин. расстояние от фокусного пятна до объекта	190 мм
Габаритные размеры излучателя (ДxШxВ)	760x450x400
Максимальная просвечиваемая толщина	Не менее 300 мм стали

В качестве детекторов использовался высокоэнергетический линейный детектор X-Scan 0.4iNE2-410 (Detection Technology, Финляндия) [112]. Детектор имеет относительно малый размер сцинтиллятора со значительно улучшенной радиационной стойкостью и динамическим диапазоном для высокоэнергетических промышленных неразрушающих испытаний в диапазоне энергий от 450 кВ до 9 МэВ.

Таблица 7 - Технические характеристики линейного детектора X-Scan 0.4iNE2-410.

Диапазон энергий источника излучения	450 кВ – 9 МэВ
Материал сцинтиллятора	$CdWO_4$
Размер кристалла сцинтиллятора	$0,32 \times 0,6 \times 10 \text{ мм}^3$
Размер детектирующего элемента	0,4 мм
Число детектирующих элементов	1024
Активная длина	410 мм
Время накопления сигнала	0,2 – 128 см
Динамический диапазон	16000

Для вращения и перемещения объекта контроля при сканировании использовался прецизионный стол с поворотным и прямолинейным движением DCNI 50 ST (DELKEN Automazioni, Италия) [113]. С помощью данного стола с

числовым программным управлением возможно перемещать и вращать крупногабаритные изделия с массой до 1,5 тонн.

Таблица 8 - Технические характеристики стола с поворотным и прямолинейным движением DCNI 50 ST.

Скорость вращения	6 об./мин
Угловая точность	$\pm 5$ угл. сек
Скорость прямолинейного движения	12 м/1'
Точность линейного перемещения	$\pm 0,01$ мм
Ход прямолинейного движения	2000 мм
Допустимая нагрузка	1500 кг

Детектор и источник оборудованы коллиматором шириной несколько миллиметров из свинцовых блоков для минимизации рассеянного рентгеновского излучения, поскольку оно является основным источником шума при рентгеновском контроле с использованием источников высокой энергии, а также для уменьшения дозовой нагрузки как на объект контроля, так и на электронные компоненты детекторной системы. Ширина коллиматора, расположенного перед детектором рентгеновского излучения, регулируется для компромисса между пространственным разрешением и временем, необходимым для получения изображения. Более узкая толщина среза повышает пространственное разрешение, однако увеличивает время, необходимое для захвата изображения, так как доза рентгеновского излучения, регистрируемая детекторов, уменьшается.

Помимо коллимации реализован датчик опорного канала для повышения качества изображения. Из-за нестабильности импульсного источника излучения неоднородность фона устраняется математической обработкой относительно опорного канала выносного детектора. Дополнительно реализована синхронизация детектора и бетатрона благодаря чему уменьшается время сканирования объекта приблизительно в 7 раз. Захват строк в импульсном режиме происходит по внешнему сигналу синхронизации с бетатрона. Частота импульсов излучения источника 400 Гц, а минимальное время интеграции детектора 20 мкс. Следовательно, при импульсном режиме можно захватывать импульс излучения,

который длится 3-5 мкс, в конце времени интегрирования детектора, тем самым повысить полезный сигнал. При непрерывном режиме детектирования полезный сигнал уменьшается за счет интегрирования темнового сигнала между импульсами излучения, который длится 2,5 мс.

## 4.2 Схема эксперимента

Для исследования радиографических возможностей микрофокусного источника излучения взят объект реальной промышленности предприятия АО «ТВСЗ» - литая деталь грузовых вагонов - балка надрессорная. Габаритные размеры объекта контроля представлены на рисунке 58.

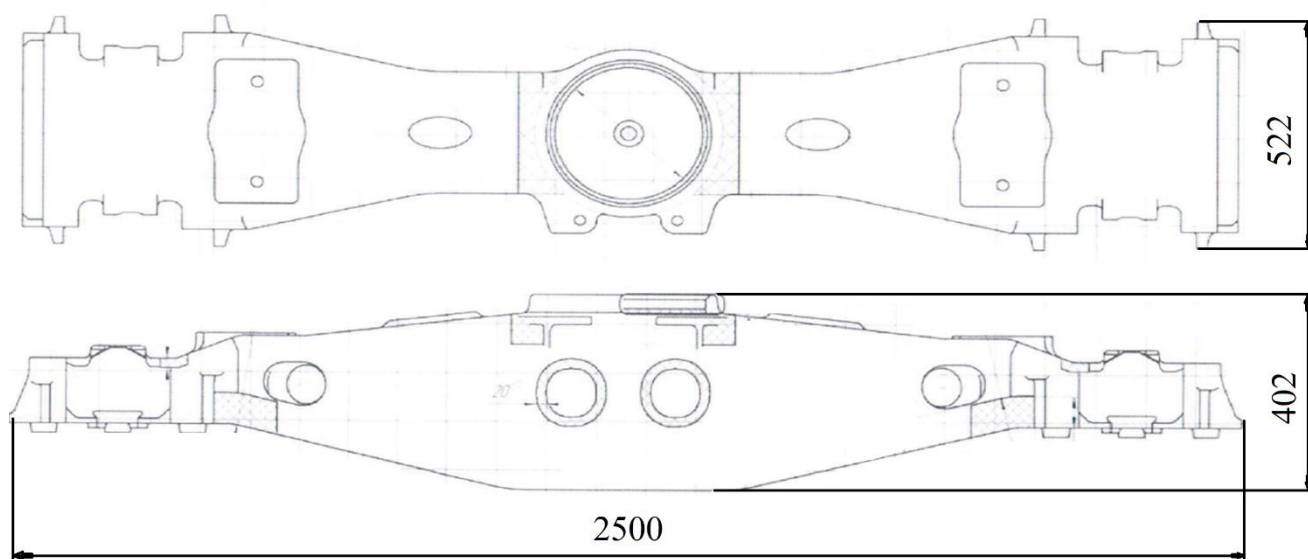
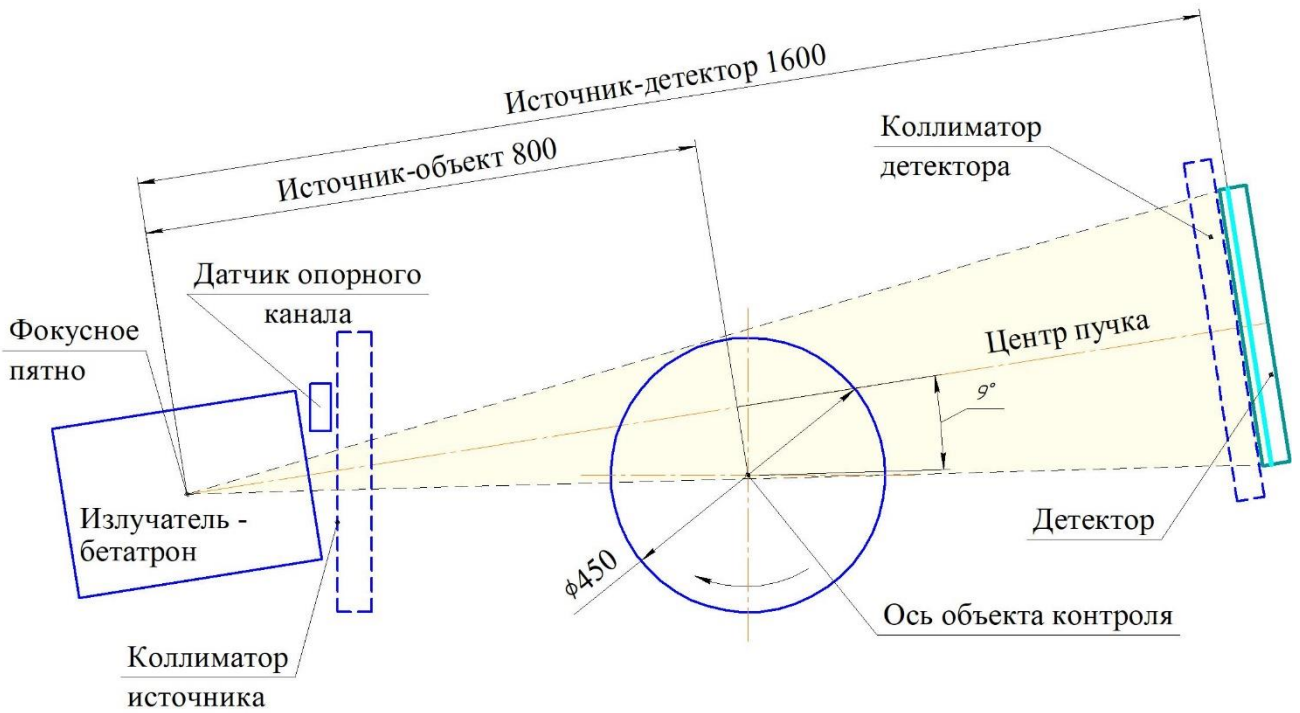


Рисунок – 58 Чертеж балки надрессорной с габаритными размерами

При определении параметров схемы сканирования область интереса была в несколько раз больше размера линейного детектора, в связи с этим просвечивалась часть объекта, входившая в область контроля, при увеличении в 2.0 раза (рисунок 59).

Вид сбоку



Вид сверху

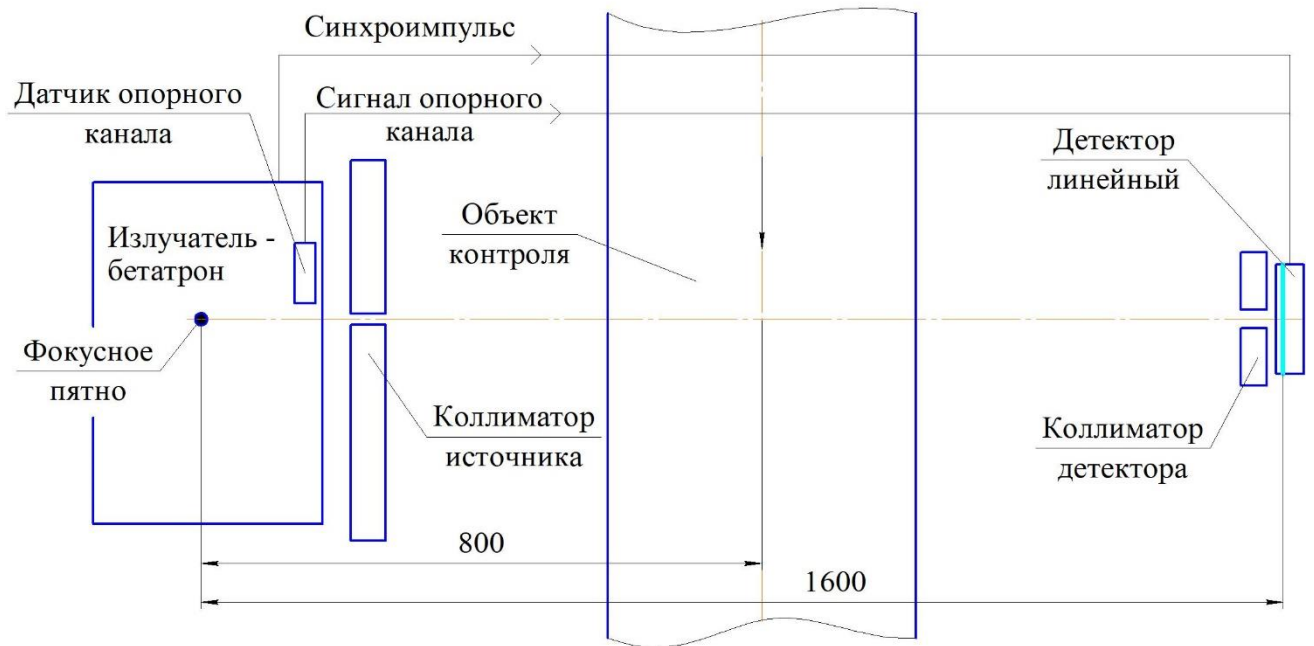


Рисунок 59 – Схема системы для радиографического контроля

Коллимированный веерный пучок шириной 1 мм и угловой расходимостью около  $\pm 15^\circ$  проходил через объект контроля и в определенный момент по синхроимпульсу построчно формировал рентгеновское изображение. После сбора первичных проекций неоднородность фона изображения устранялась математической обработкой относительно опорного канала выносного детектора. Для лучшей визуализации изображения на мониторе применялся фильтр дополнительного контрастирования.

Надрессорная железнодорожная балка сканировалась при разной скорости, вследствие чего получалось разное качество полученного изображения. С увеличением скорости сканирования качество изображения ухудшается, снижается контрастная чувствительность, в первую очередь, за счет увеличения шумов вследствие накопления меньшего числа импульсов. При уменьшении скорости контроля, наблюдается обратная картина.

### 4.3 Результаты радиографии

При цифровой радиографии основными параметрами, определяющим качество изображения, являются чувствительность контроля ( $K$ ) и нормализованное отношение сигнал/шум ( $SNR_{norm}$ ) – аналог оптической плотности рентгеновской пленки, которое нормируется отношением сигнал/шум ( $SNR$ ) на базовое пространственное разрешение ( $SR_b$ ).

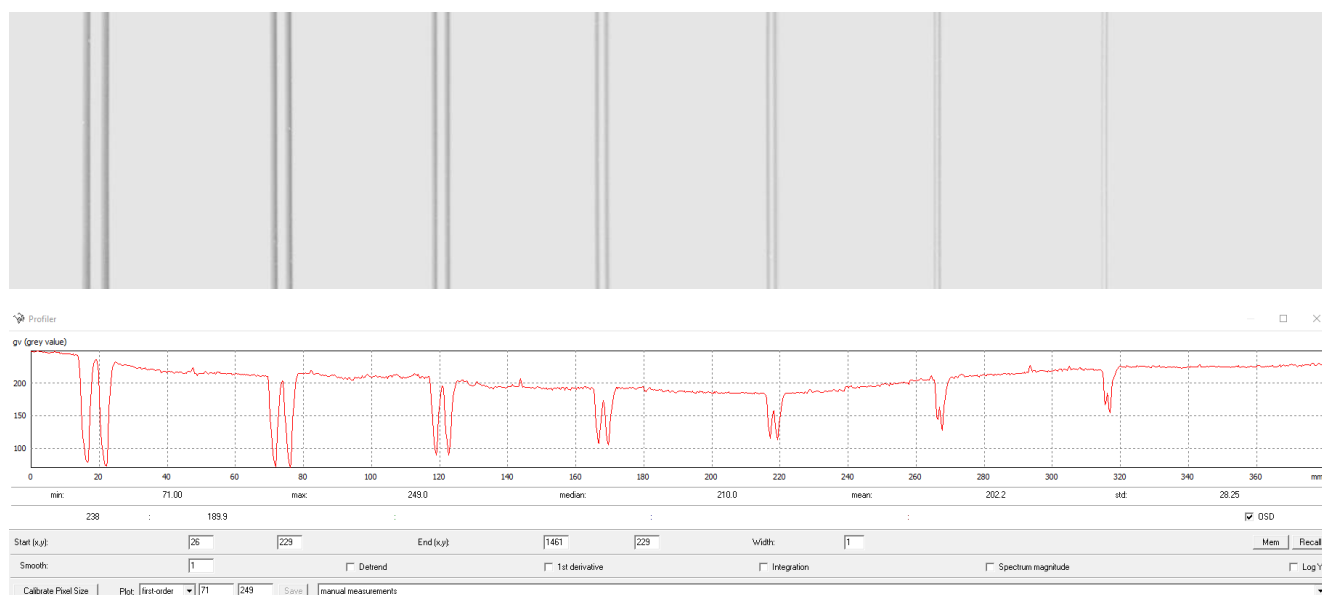


Рисунок 60 – Базовое пространственное разрешение системы

Максимальное пространственное разрешение системы по двухпроводочному эталону Duplex IQI для данной геометрии и минимальной скорости сканирования составило около 50 мкм (рисунок 60).

Статистика зарегистрированных квантов, которая оценивается по отношению сигнал/шум ( $SNR$ ) представляет собой отношение среднего значения сигнала к его стандартному отклонению [114].  $SNR$  измеряется «по белому», то есть при облучении детектора без объекта исследования. Размер области для измерения  $SNR$  должен составлять не менее 1000 пикселей [84]. Пример измерения приведен на рисунке 61.

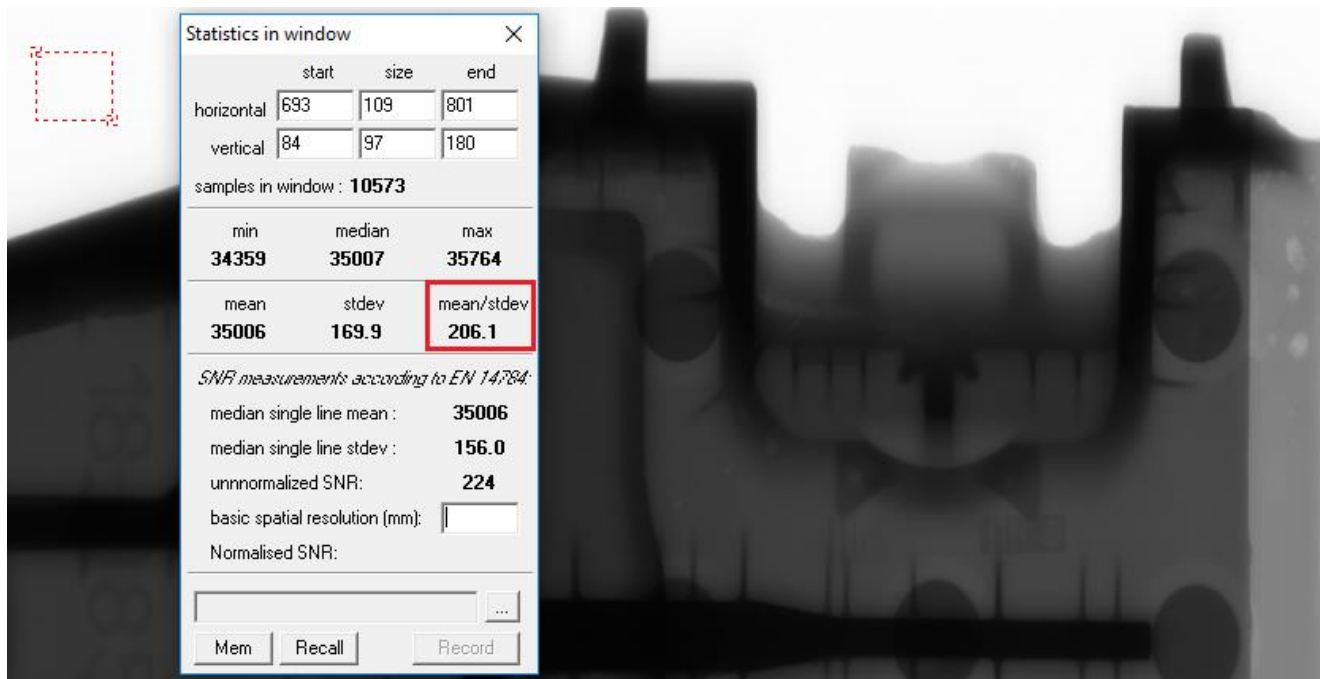


Рисунок 61 - Измерение  $SNR$  по выделенной области

Более высокое значение отношения сигнала к шуму соответствует лучшей квантовой статистике и говорит о более низком уровне шума относительно полезного сигнала. В качестве ориентировочного значения  $SNR$  можно использовать рекомендации стандартов на цифровую радиографию [84]. Согласно этому документу, для целей цифровой радиографии детекторы должны обеспечить  $SNR$  не менее 70. Нормализованное отношение сигнал/шум составило 397 (рисунок 62).



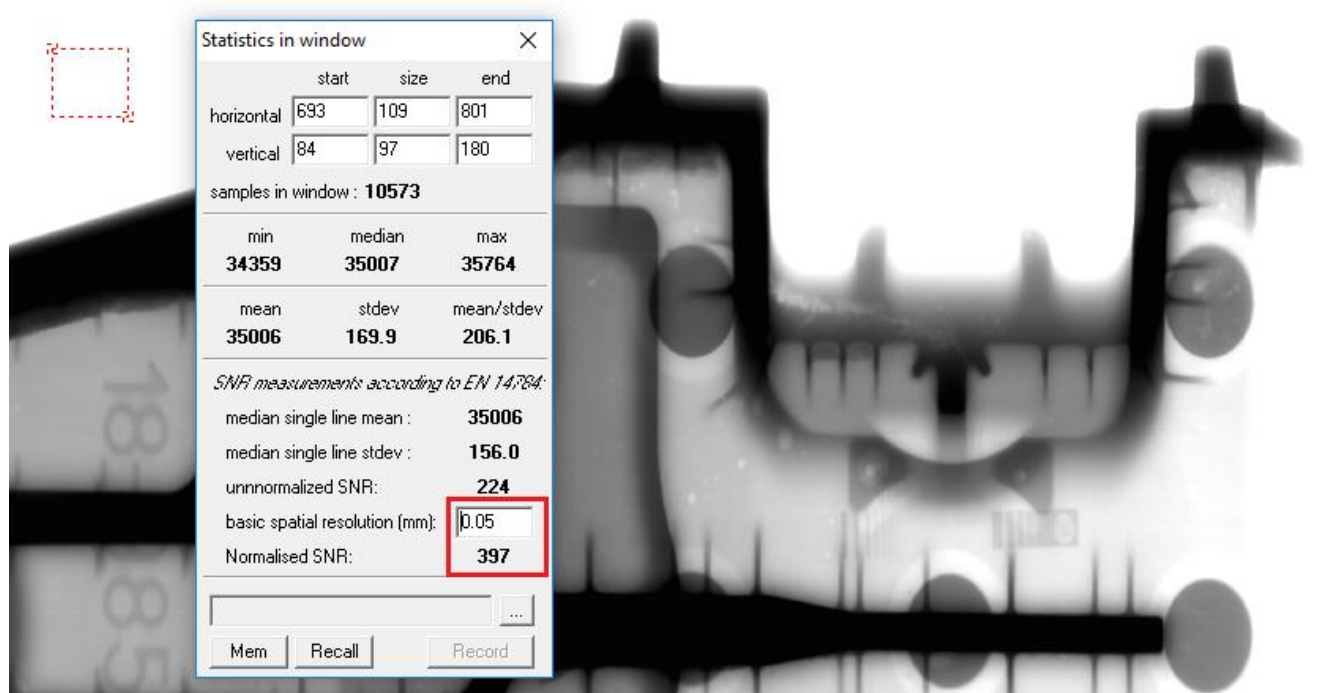


Рисунок 62 - Нормировка измеренного отношения сигнал/шум на базовое пространственное разрешение системы

Все измерения проводились с калибровкой детектора, благодаря которой улучшается контрастная чувствительность и высокое отношение сигнала к шуму из-за компенсации разницы между различными пикселями с помощью программного обеспечения. Правильная многократная калибровка позволяет получить высокие значения  $SNR$ , тем самым увеличивая  $SNR_{norm}$ , и уменьшить время экспозиции, зависящее от мощности дозы.

Уровень сигнала на максимальной толщине 500 мм (ребра жесткости) можно отнести к неинформативному, паразитному (рисунок 63). Для большей информативности достаточно повернуть объект на определенный угол, для уменьшения суммарной толщины объекта контроля (рисунок 64).

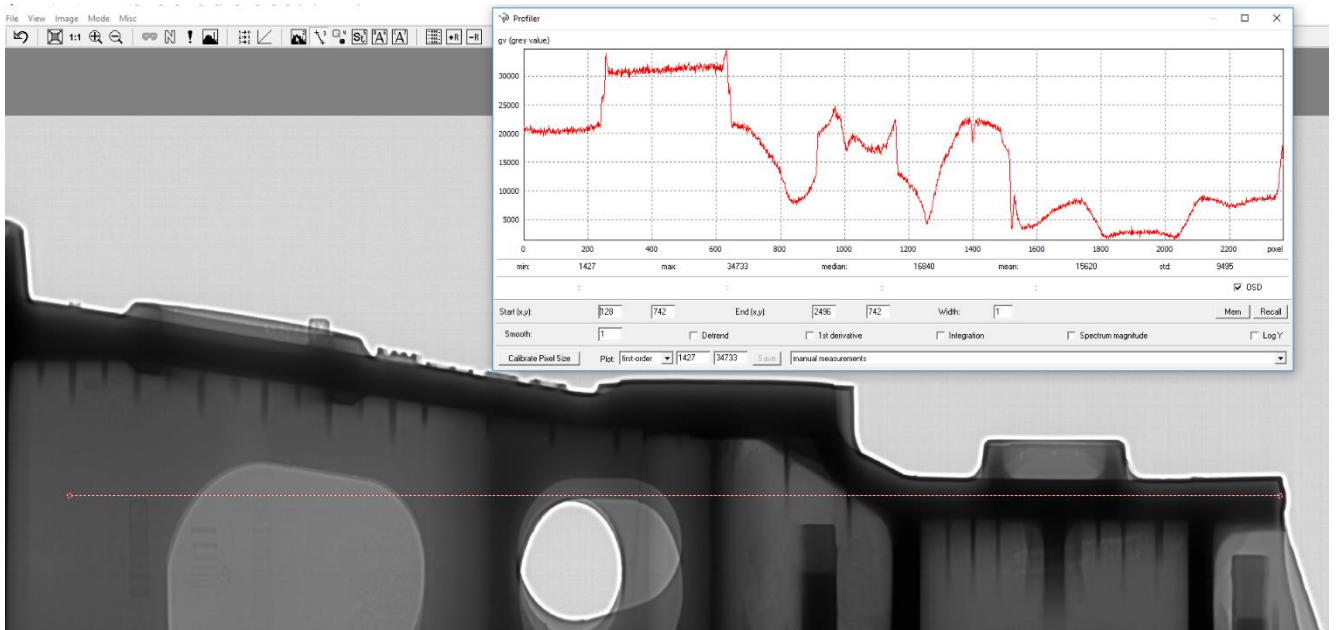


Рисунок 63 - Радиограмма контролируемого изделия од углом 90°;  
максимальная толщина фрагмента стальной отливки – 520 мм

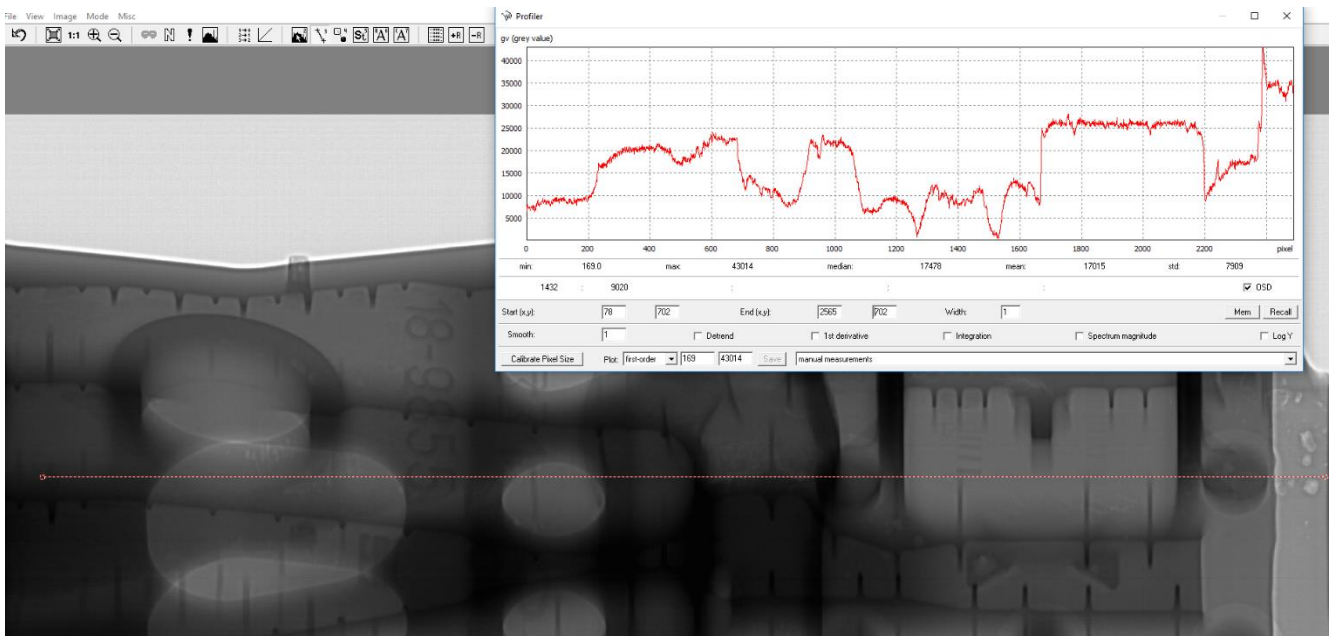


Рисунок 64 - Радиограмма контролируемого изделия од углом 45°;  
максимальная толщина фрагмента стальной отливки – 250 мм

На практике при рентгеновском контроле при одних и тех же параметрах и схеме контроля выявляемость дефектов зависит от конкретного изделия с определенной толщиной и материалом. Для определения наименьшего дефекта пользуются параметром «чувствительность контроля».

Для определения чувствительности следует применять канавочные или проволочные эталоны в соответствии [84,114,115]. Чувствительность контроля по канавочному эталону (наименьшая глубина выявляемой на снимке канавки) определяется в процентах:

$$K = \frac{h_{min}}{S} \cdot 100\% \quad (7)$$

где:

$h_{min}$  - глубина минимальной видимой на рентгеновском снимке канавки канавочного эталона, мм;

$S$  – толщина просвечиваемого металла, мм.

Канавочный эталон на рентгеновском снимке установлен на стенку объекта с сумарной толщиной просвечиваемого материала - 70 мм - средняя толщина просвечиваемого объекта при определенном угле поворота (рисунок 65). При измерении канавки определили значение контроля чувствительности данного объекта равное 1,6% рассчитанное по формуле (7) при заданной толщине детали.

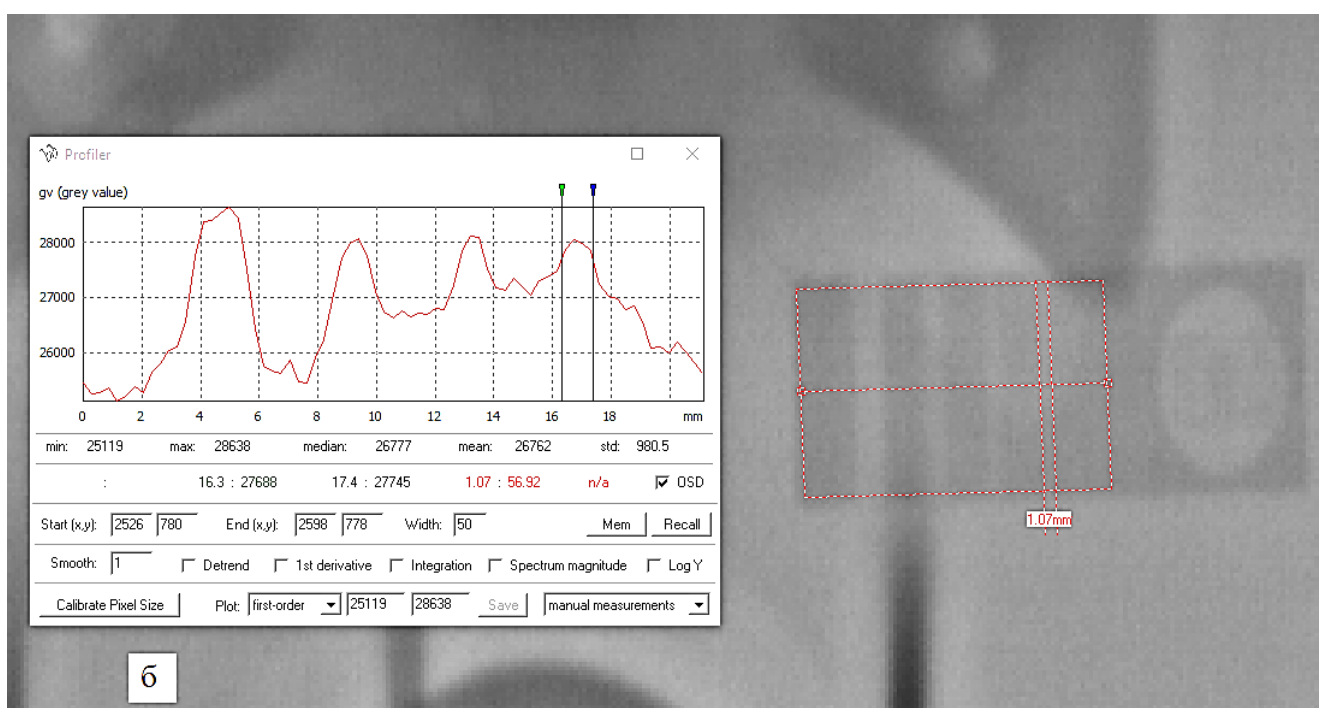
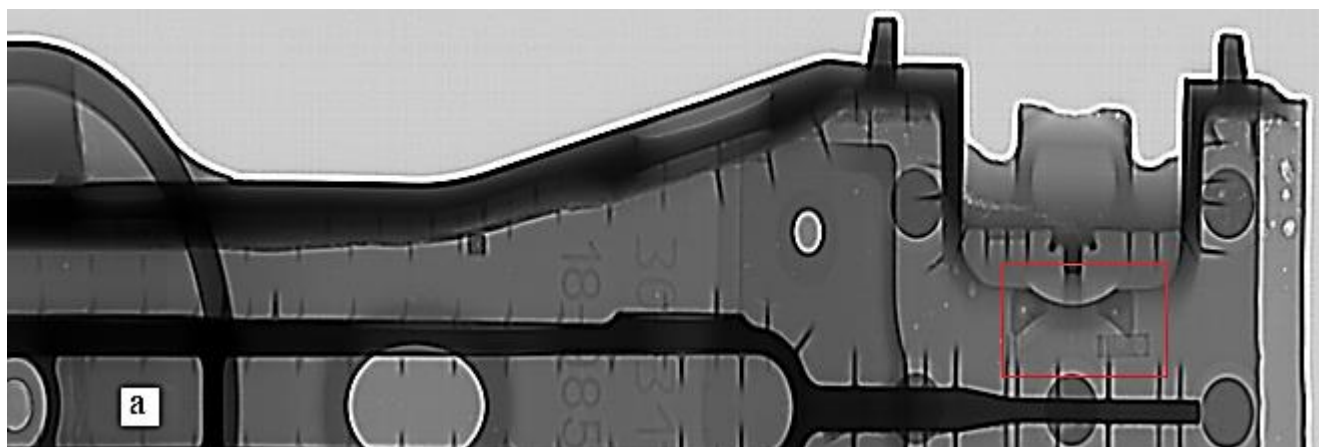


Рисунок 65 – а) - Радиограмма контролируемого изделия с применением канавочного эталона чувствительности, (максимальная толщина фрагмента стальной отливки где расположен эталон – 70 мм); б) – увеличенное изображение канавочного эталона

В результате контроля надрессорной балки было выявлено большое количество дефектов диаметром до 1 мм и меньше.

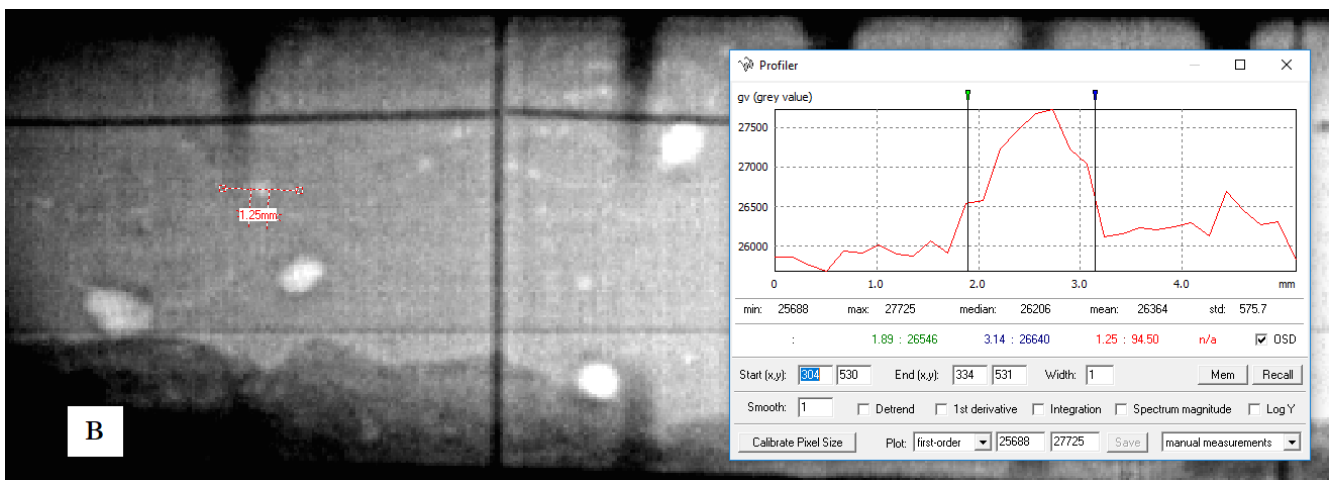
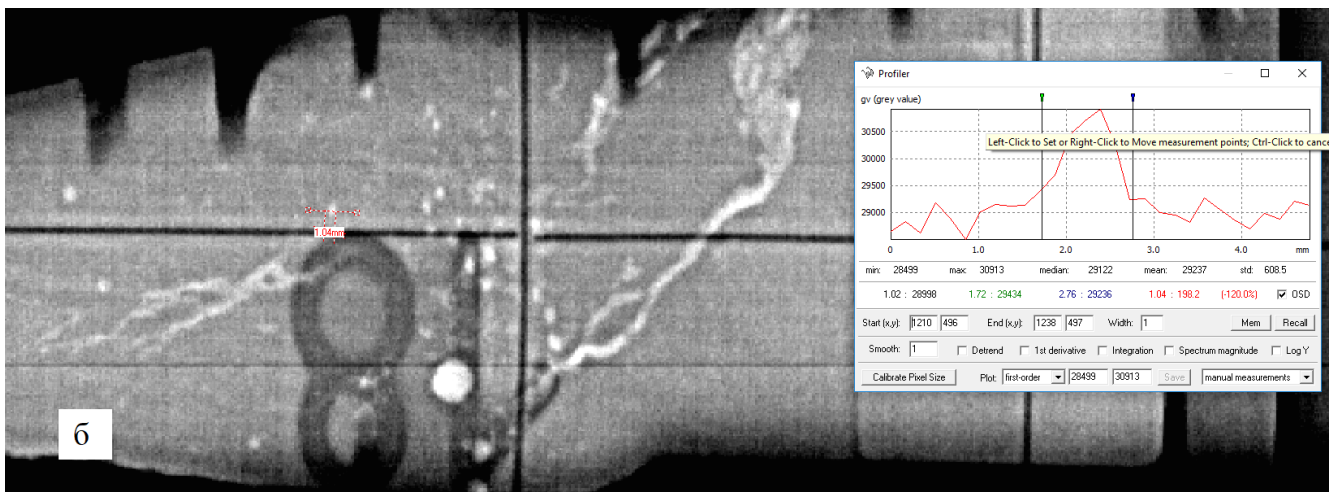
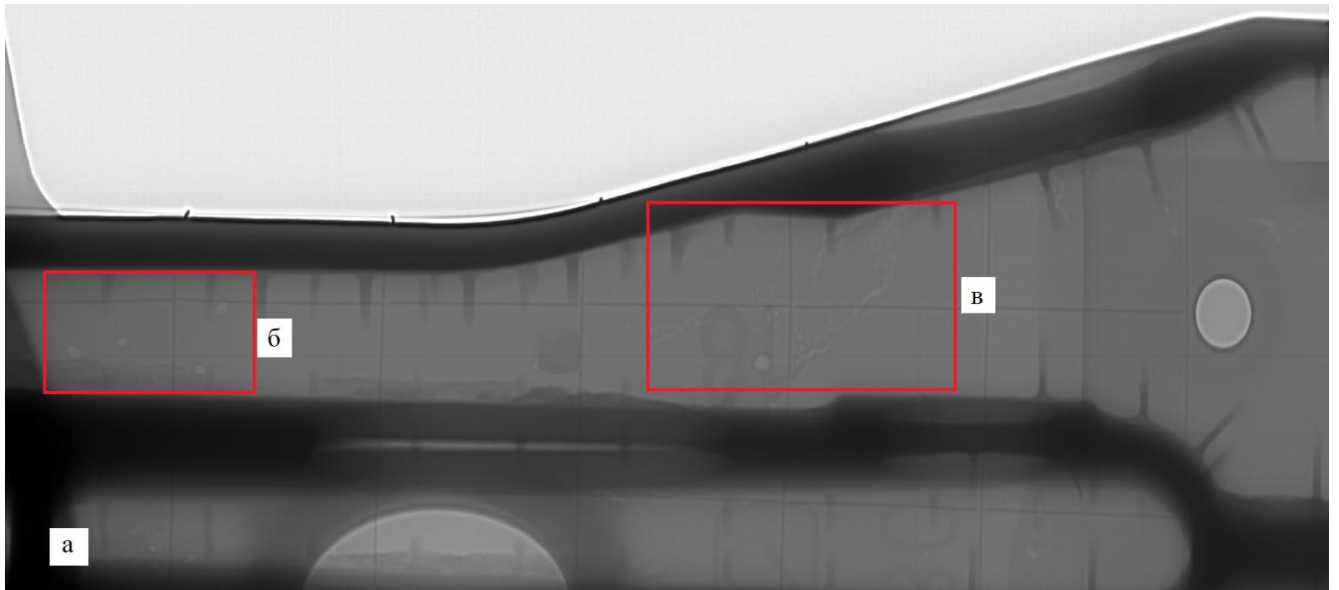


Рисунок бб – а) - измерение и локализация дефектов надрессорной балки; б) и в) - увеличенные для демонстрации изображения дефектов

На опытном образце рентгенографической системы с применением микрофокусного источника получены технические характеристики, представленные в таблице 9.

Таблица 9 - Технические характеристики рентгеновской цифровой системы

Параметры	Величина
Разрешающая способность, мм	0,05
Чувствительность, %	1,6
Скорость сканирования, мм/с	10,0
Мощность дозы на расстоянии 1 м, Р/мин	10
Размеры фокусного пятна, мм	0,05 · 1,5
Частота импульсов формирования рентгеновского излучения, Гц	400
Ширина рабочего пучка, °	15
Число каналов линейки детекторов, шт	1024
Размеры детектора, мм	0,32 × 0,6 × 10

#### 4.4 Выводы к главе 4

Сочетание характеристик источника излучения и цифрового детектора дает ожидаемую производительность всего оборудования с точки зрения отношения сигнал-шум (*SNR*), пространственного разрешения и времени сбора данных.

Решающими параметрами для рентгенографического и томографического процесса на качество изображения являются размер пикселя детектора, размер источника и геометрический коэффициент увеличения. Также необходимо

учитывать интенсивность излучения, угол распространения пучка и рассеянное излучение.

Использование модифицированного источника излучения – бетатрона является хорошей перспективой для создания высокоэнергетических рентгеновских и КТ систем высокого разрешения и снижения общедозовой нагрузки как на объект, так и на электронику детектора. Однако, параллельно усовершенствованию источника излучения, должно идти усовершенствование детектирующей системы высокоэнергетического излучения для повышения пространственного разрешения системы в целом.

При увеличении базового пространственного разрешения детектора излучения возможно достичь высокого пространственного разрешения всей системы с использованием разработанного микрофокусного источника излучения, не используя повышенного времени экспозиции, влияющего на время контроля.

Помимо усовершенствования детектора, повышение пространственного разрешения и скорости сканирования изготовленного макета дефектоскопической системы можно получить за счет уменьшения рассеянного излучения используя свинцовый контейнер для бетатрона и апертурные коллиматоры как для источника, так и для детектора.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлены исследования по разработке компактного, недорогого, эффективного, удобного в использовании, экологически чистого и высокоэнергетического микрофокусного источника жесткого тормозного излучения. Проведен сравнительный анализ, важных для дефектоскопии и рентгеновской томографии, характеристик микрофокусного и классического бетатронов. В результате применения модифицированного источника в микрофокусной рентгенографии получены снимки тест-объектов с высокой контрастностью и пространственным разрешением. Создан опытный образец высокоэнергетической дефектоскопической системы для контроля крупногабаритных, толстостенных объектов с высокой чувствительностью и скоростью контроля.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Реализован макет микрофокусного источника излучения на основе ускорителя заряженных частиц - бетатрона с горизонтальным размером фокусного пятна в пределах 13 и 50 мкм и диапазоне энергий фотонов от нескольких КэВ до 18 МэВ за счет изготовления мишеней микронных размеров и экспериментальных камер с внутренними гониометрами.

2. Повышена в 11 раз яркость источника тормозного излучения за счет уменьшения размеров фокусного пятна, вследствие чего увеличен контраст и пространственное разрешение рентгеновских изображений.

3. Получены результаты рентгеновского контроля экспериментальных образцов из композитных и плотных материалов (до 50 мм стали) обеспечивающие высокую выявляемость продолговатых дефектов шириной до 10 мкм с применением микрофокусных источников излучения.

4. Экспериментально исследовано формирование рентгеновского изображения методом фазового контраста в неисследованной до сих пор области жесткого гамма-излучения с энергиями свыше 1 МэВ.

5. Создан опытный образец высокоэнергетической рентгенографической системы на базе микрофокусного малогабаритного бетатрона для контроля крупногабаритных, толстостенных объектов с высокой чувствительностью (1,6%) и скоростью (10 мм/с) контроля.

Данные исследования помогут реализовать серийное производство микрофокусных источников жесткого тормозного излучения и томографических комплексов, на основе производимых в Томском политехническом университете компактных и недорогих бетатронов на энергию электронов 4-18 МэВ.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Jiang, H.** Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances / H. Jiang. – SPIE Press, Bellingham, 2003. – P. 387.
2. **Kruth, J. P.** Computed tomography for dimensional metrology / J. -P. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. De Chiffre, A. Weckenmann // CIRP Annals. – 2011. – V. 60 (2). – P. 821-842.
3. **De Chiffre, L.** Industrial applications of computed tomography / L. De Chiffre, S. Carmignato, J. -P. Kruth, R. Schmitt, A. Weckenmann // CIRP Annals. – 2014. – V. 63 (2). – P. 655-677.
4. **Reimers, P.** New possibilities of non-destructive evaluation by X-ray computed tomography / P. Reimers, L. Gobbels // Materials Evaluation. – 1983. – V. 41. – P. 732-737.
5. **Schuhmann, N.** Industrial application of computerized tomography / N. Schuhmann, H. Okruch. – Computerized tomography for industrial applications and image processing in radiology, Berlin, Germany. – DGZfP Proceedings BB 67-CD. – 1999
6. **Smolyanskiy, V. A.** X-ray tomography of the aerospace products / V. A. Smolyanskiy, M. M. Rychkov, V. N. Borikov // MATEC Web of conferences. – 2017. – V. 102. – P. 01033.
7. **Bonaccorsi, L.** Applications in metallurgy of X-ray computed tomography with variable focal spot-size and infrared thermography / L. Bonaccorsi, F. Garescì, F. Giacobbe, F. Freni, F. Mantineo, R. Montanini, A. Sili // Metallurgia Italiana. – 2013. – V. 105. – P. 33-40.
8. **Du Plessis, A.** Comparison of medical and industrial X-ray computed tomography for non-destructive testing / A. du Plessis, S.G. le Roux, A. Guelpa // Case studies in nondestructive testing and evaluation. – 2016. – V. 6. – P. 17-25.
9. **Reims, N.** Strategies for efficient scanning and reconstruction methods on very large objects with high energy X-ray computed tomography / N. Reims, T. Schoen,

M. Boehnel, F. Sukowski, M. Firsching // Proceedings of SPIE - the international society for optical engineering. – 2014. – V. 9212. – P. 921209.

10. URL:<https://www.shimadzu.com/an/ndi/ct/xdimensus.html>
11. URL:<https://www.nikonmetrology.com/en-gb/product/mct225>
12. URL:<https://www.werth.de/de/unser-angebot/produkte-nach-kategorie/koordinatenmessgeraete-fuer/ct-anwendungen.html?menuitems=28,29,71,107>
13. URL:<https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/computed-tomography/metrotom.html>
14. URL:<https://www.yxlon.com/products/x-ray-and-ct-inspection-systems>
15. **Izumi, S.** High energy X-ray computed tomography for industrial applications / S. Izumi, S. Kamata, K. Satoh, H. Miyai // IEEE transactions on nuclear science. – 1993. – V. 40 (2). – P. 158-161.
16. URL:[http://www.hitachi.co.jp/products/healthcare/products-support/industrial\\_ct/index.html](http://www.hitachi.co.jp/products/healthcare/products-support/industrial_ct/index.html)
17. **Sato, K.** Development of high-energy and high-resolution X-ray CT / K. Sato, M. Abeb, T. Takatsuji // Precision engineering. – 2018. – V. 54. – P. 276-283.
18. **Hirai, T.** Refraction contrast 11-magnified X-ray imaging of large objects by MIRRORCLE-type table-top synchrotron / T. Hirai, H. Yamada, M. Sasaki, D. Hasegawa, M. Morita, Y. Oda, J. Takaku, T. Hanashima, N. Nitta, M. Takahashid, K. Muratad // Journal of synchrotron radiayion. – 2006. – V. 13. – P. 397-402.
19. **Salamon, M.** Applications and methods with high energy CT systems / M. Salamon, M. Boehnel, N. Reims, G. Ermann, V. Volland, M. Schmitt, N. Uhlmann, R. Hanke. – 5th International Symposium on NDT in Aerospace, Singapore, 2013.
20. **Nicolas, E.** 15 MeV CT for very large objects / E. Nicolas , E. Daniel , K. Marc , P. Emmanuel , R. Christophe , T. Léonie , T. David. International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, 2019
21. URL:<http://www.granpect.com.cn/english/products/p1/27.html>
22. **Zhang, P.** Data collect system design and realize for CD-300BG type industry computerized tomography/ P. Zhang, W. Xu // CT Theory and Applications. – 2000. – V. 9. – P. 17-21.

23. **Xia, Y.** The key technique for high X-ray ICT / Y. Xia, G. Chen, L. Wang // CT Theory and Applications. – 1997. – V. 6 (1). – P. 37-39.
24. **Tang, C.** Present status of the accelerator industry in Asia / C. Tang. – Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, May, 2010. – P. 2447-2451.
25. **Tang, C.** The development of accelerator applications in China / C. Tang. – Proceedings of APAC, Gyeongju, Korea, 2004. – P. 528-532.
26. **Tang, C.** Electron linacs for cargo inspection and other industrial applications / C. Tang, H. B. Chen, Y. H. Liu. – Proceedings of International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators, 4-8 May, Vienna, 2009. – P. 1-8.
27. **Chen, Z.** New Development of High Energy Industrial Computed Tomography (ICT) / Z. Chen, L. Li, J. Feng // Computerized Tomography Theory and Applications. – 2005. – V. 14 (4). – P. 1-4.
28. **Xiao, Y.** Development and applications of high energy industrial computed tomography in china / Y. Xiao, Z. Chen, Y. Li, L. Ye. – 19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016. – P. 1-8.
29. **Abe, M.** Evaluation of resolution performance of high energy x-ray CT / M. Abe, H. Fujimoto, O. Sato, K. Sato, T. Takatsuji // Proceedings of SPIE, International Conference on Optical and Photonic Engineering. – 2015. – V. 9524. – P. 95241M.
30. URL:[https://www.varian.com/sites/default/files/resource\\_attachments/Lina tronM3.pdf](https://www.varian.com/sites/default/files/resource_attachments/Lina tronM3.pdf)
31. **Yamada, H.** Tabletop synchrotron light source / H. Yamada, D. Hasegawa, T. Yamada, A. I. Kleev, D. Minkov, N. Miura, A. Moon, T. Hirai, M. Haque // Comprehensive Biomedical Physics. – 2014. – V. 8. – P. 43-65.
32. **Herman, G. T.** Fundamentals of computerized tomography. Image reconstruction from projections. Second edition / G. T. Herman. – Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2010. – P. 297
33. **Holub, W.** XXL X-ray Computed tomography for wind turbines in the lab and on-site / W. Holub, U. Hassler. – NDT in Canada 2013 Conference in conjunction

with the International Workshop on Smart Materials and Structures, SHM and NDT for the Energy Industry, 2013, Calgary, Alberta, Canada

34. **Gordon, G.** Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography / G. Gordon, R. Bender, G. T. Herman // *Journal of Theoretical Biology*. – 1970. – V. 29 (3). – P. 471-481.

35. **Vaynberg, E.I.** Experience of using small-size betatron MIB-5 in the structure of industrial computed tomograph BT-500XA / E. I. Vaynberg, V. A. Kasyanov, V. L. Chakhlov, M. M. Stein. – 16th World Conference of Nondestructive Testing, 2004

36. **Вайнберг, Э. И.** Повышение пространственного разрешения промышленных компьютерных томографов / Э. И. Вайнберг, С. Г. Цыганов // *В мире НК*. – 2006. – Т. 3 (33). – С. 40-42.

37. **Вайнберг, И. А.** Неразрушающий контроль внутренней структуры ответственных промышленных изделий с использованием универсальных высокоэнергетических томографов «ПРОМИНТРО» / И. А. Вайнберг, Э. И. Вайнберг, С. Г. Цыганов, В. Б. Сидорин // *Megatech*. – 2014. – Т. 4. – С. 40-51.

38. **Вайнберг, И. А.** Измерение размеров внутри сложных неразборных изделий с помощью компьютерных томографов / И. А. Вайнберг, Э. И. Вайнберг // *В мире НК*. – 2005. – Т. 3. – С. 38-41.

39. **Вайнберг, И. А.** Критерии выбора универсального компьютерного томографа для отработки технологии и сертификации ответственных промышленных изделий / И. А. Вайнберг, Э. И. Вайнберг // *В мире НК*. – 2011. – Т. 2. – С. 20-25.

40. **Вайнберг, И. А.** Высокоэнергетическая компьютерная томография в аддитивных технологиях ответственных металлических изделий / И. А. Вайнберг, Э. И. Вайнберг, С. Г. Цыганов, В. Б. Сидорин // *В мире НК*. – 2015. – Т. 3. – С. 54-59.

41. URL:<https://www.iis.fraunhofer.de/en/ff/zfp/tech/hochenergie-computertomographie.html>

42. **Gapinski, B.** Application of computed tomography to control parts made on additive manufacturing process / B. Gapinski, P. Janickia, L. Marciniak-Podsadnaa, M. Jakubowicza // *Procedia Engineering*. – 2016. – V. 149. – P. 105-212.
43. **Barnatt, C.** 3D printing: The next industrial revolution / C. Barnatt. – CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. – P.276
44. URL: <http://3d.globatek.ru/production/prox400>
45. **Maire, E.** Quantitative X-ray tomography / E. Maire, P. J. Withers // *International Materials Reviews*. – 2014. – V. 59. – P. 1-43.
46. **Kalender, W. A.** Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications (3rd edition) / W. A. Kalender. – Publicis Publishing, Erlangen, 2011. – P. 372
47. **Ritman, E. L.** Current status of developments and applications of micro-CT / E. L. Ritman // *Annual Review of Biomedical Engineering*. – 2011. – V. 13. – P. 531-552.
48. **Zhang, J.** A nanotube-based field emission x-ray source for microcomputed tomography / J. Zhang, Y. Cheng, Y. Z. Lee, B. Gao, Q. Qiu, W. L. Lin, D. Lalush, J. P. Lu, O. Zhou // *Review of scientific instruments*. – 2005. – V. 76 (9). – P. 094301.
49. **Katsuyama, K.** High energy X-ray CT study on the central void formations and the fuel pin deformations of FBR fuel assemblies / K. Katsuyama, T. Nagamine, S. I. Matsumoto, S. Sato // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 2007. – V. 255. – P. 365–372.
50. **Estre, N.** High-energy X-ray imaging applied to nondestructive characterization of large nuclear waste drums / N. Estre, D. Eck, J.-L. Pettier, E. Payan, C. Roure, E. Simon. // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2015. – V. 62 (6). – P. 3104-3109.
51. **Tajima, T.** Laser electron accelerator / T. Tajima, J. M. Dawson // *Physical Review Letters*. – 1979. – V. 43. – P. 267-270.
52. **Zhang, C.Z.** Industrial CT technology and principle / C.Z. Zhang, Z.P. Guo, P. Zhang, X.G. Wang. – Science Press, Beijing, 2009. – P. 35-64.



53. **Kistler, M.** Simulated Performances of a Very High Energy Tomograph for Non-Destructive Characterization of large objects / M. Kistler, N. Estre, E. Merle // EPJ Web of Conference. – 2018. – V. 170. – P. 05002.
54. URL:[https://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Slides/439\\_Ramsey.pdf](https://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Slides/439_Ramsey.pdf)
55. URL:<https://www.nikonmetrology.com/en-gb/>
56. URL:<https://www.vareximaging.com/products/security-industrial/linear-accelerators/linatron-mi>
57. URL:<https://www.iis.fraunhofer.de/en/ff/zfp.html>
58. **Giersch, J.** Rosi an object-oriented and parallel-computing monte carlo simulation for x-ray imaging / J. Giersch, A. Weidemann, G. Anton // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2003. – V. 509. – P. 151-156.
59. URL: [https://www.photon-production.co.jp/en/mirrorcle\\_e/mirrorcle\\_e.htm](https://www.photon-production.co.jp/en/mirrorcle_e/mirrorcle_e.htm)
60. **Fritzler, S.** Emittance Measurements of a Laser-Wakefeld-Accelerated Electron / S. Fritzler, E. Lefebvre, V. Malka, F. Burgy, A. E. Dangor, K. Krushelnick, S. P. D. Mangles, Z. Najmudin, J.-P. Rousseau, B. Walton // Physical Review Letters. – 2004. – V. 92. – P. 165006.
61. **Malka, V.** Laser plasma accelerator / V. Malka // Physics of Plasmas. – 2012. – V. 19. – P. 055501.
62. **Hooker, S. M.** Developments in laser-driven plasma accelerators / S. M. Hooker // Nature Photonics. – 2013. – V. 7. – P. 775-782.
63. **Faure, J.** Controlled injection and acceleration of electrons in plasma wakefelds by colliding laser pulses / J. Faure, C. Rechatin, A. Norlin, A. Lifschitz, Y. Glinec, V. Malka // Nature. – 2006. – V. 444. – P. 737-739.
64. **Hafz, N. A. M.** Stable generation of GeV-class electron beams from self-guided laser-plasma channels / N. A. M. Hafz, T. M. Jeong, I. W. Choi, S. K. Lee, K. H. Pae, V. V. Kulagin, J. H. Sung, T. J. Yu, K. -H. Hong, T. Hosokai, J. R. Cary, D. -K. Ko, J. Lee // Nature Photonics. – 2008. – V. 2. – P. 571-577.
65. **Kneip, S.** Near-GeV acceleration of electrons by a nonlinear plasma wave driven by a self-guided laser pulse / S. Kneip, S. R. Nagel, S. F. Martins, S. P. D.

Mangles, C. Bellei, O. Chekhlov, R. J. Clarke, N. Delerue, E. J. Divall, G. Doucas, K. Ertel, F. Fiuza, R. Fonseca, P. Foster, S. J. Hawkes, C. J. Hooker, K. Krushelnick, W. B. Mori, C. A. J. Palmer, K. Ta Phuoc, P. P. Rajeev, J. Schreiber, M. J. V. Streeter, D. Urner, J. Vieira, L. O. Silva, Z. Najmudin // *Physical Review Letters*. – 2009. – V. 103. – P. 035002.

66. **Banerjee, S.** Stable, tunable, quasimonoenergetic electron beams produced in a laser wakefield near the threshold for selfinjection / S. Banerjee, S. Y. Kalmykov, N. D. Powers, G. Golovin, V. Ramanathan, N. J. Cunningham, K. J. Brown, S. Chen, I. Ghebregziabher, B. A. Shadwick, D. P. Umstadter // *Physical Review Special Topic - Accelerators and Beams*. – 2013. – V. 16. – P. 031302.

67. **Leemans, W. P.** Multi-GeV Electron Beams from Capillary-Discharge-Guided Subpetawatt Laser Pulses in the Self-Trapping Regime / W. P. Leemans, A. J. Gonsalves, H.-S. Mao, K. Nakamura, C. Benedetti, C. B. Schroeder, Cs. Tóth, J. Daniels, D. E. Mittelberger, S. S. Bulanov, J.-L. Vay, C. G. R. Geddes, E. Esarey // *Physical Review Letters*. – 2014. – V. 113. – P. 245002.

68. **Corde, S.** Femtosecond x rays from laser-plasma accelerators / S. Corde, K. Ta Phuoc, G. Lambert, R. Fitour, V. Malka, and A. Rousse // *Review of Modern Physics*. – 2013. – V. 85 (1).

69. **Yang, Y.** Design and characterization of high energy micro-CT with a laser-based X-ray source / Y. Yang, Y.-C. Wu, L. Li, S.-Y. Zhang, K.-G. Dong, T.-K. Zhang, M.-H. Yu, X.-H. Zhang, B. Zhu, F. Tan, Y.-H. Yan, G. Li, W. Fan, F. Lu, Z.-Q. Zhao, W.-M. Zhou, L.-F. Cao, Y.-Q. Gu // *Results in Physics*. – 2019. – V. 14. – P. 102382.

70. **Wu, Y.C.** Towards high-energy, high-resolution computed tomography via a laser driven micro-spot gamma-ray source / Y. C. Wu, B. Zhu, G. Li, X. H. Zhang, M. H. Yu, K. G. Dong, T. K. Zhang, Y. Yang, B. Bi, J. Yang, Y. H. Yan, F. Tan, W. Fan, F. Lu, S. Y. Wang, Z. Q. Zhao, W. M. Zhou, L. F. Cao, Y. Q. Gu // *Scientific Reports*. – 2018. – V. 8. – P. 15888.

71. **Вайнберг, Э. И.** Опыт применения бетатронов НИИ интроскопии при ТПУ в составе компьютерных томографов "ПРОМИНТРО" / Э. И.Вайнберг, И. А.

Вайнберг, В. А. Касьянов, В. Л. Чахлов, М. М. Штейн // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – Р. 32-35.

72. URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/101/pics/pg12.pdf>

73. URL: <https://docplayer.ru/36247330-Vysokoenergeticheskie-tomografy.html>

74. URL: <http://frpc.secna.ru/>

75. **Карих, В.П.** Бетатронный томограф для неразрушающего контроля изделий из высокоэнергетических материалов диаметром до 1000 мм / В.П. Карих, А.В. Кодолов, А.А. Охотников, А.А. Скоков // Дефектоскопия. – 2019. – Т. 4. – Р. 56-60.

76. URL: <https://tpu.ru/university/structure/department/view?id=7983>

77. Бетатрон МИБ-6. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Томск: НИИ интроскопии, 1990.

78. **Быстров, Ю. А.** Ускорители и рентгеновские приборы / Ю. А. Быстров, С.А. Иванов. – М. Высшая школа, 1976. – 207 с.

79. Научно-технический отчет № 1157. Разработка бетатронной ускорительной камеры на энергию 10 МэВ. Л. ЛОЭП "Светлана", 1990. – 10 с.

80. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Luminosity>

81. **Rychkov, M. M.** Microfocus bremsstrahlung source based on a narrow internal target of a betatron / M. M. Rychkov, V. V. Kaplin, E. L. Malikov, V. A. Smolyanskii, V. Gentsel'man, I. K. Vas'kovskii // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2018. – V. 37 (1). – P. 13.

82. **Москалев, В. А.** Бетатроны: монография / В. А. Москалев, В. Л. Чахлов. – Томский политехнический университет. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 267 С.

83. URL: [http://cmarques.com.br/dbimg/pdf/67\\_113.pdf](http://cmarques.com.br/dbimg/pdf/67_113.pdf)

84. ISO 17636-2: 2017(E) Non-destructive testing of welds — Radiographic test-ing — Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors.

85. BS EN 462-5:1996 Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Image quality indicators (duplex wire type), determination of image unsharpness value.

86. BS EN 13068-3:2001 Non-destructive testing. Radioscopic testing. General principles of radioscopic testing of metallic materials by X- and gamma rays.
87. BS EN 14784-2:2005 Non-destructive testing. Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates. General principles for testing of metallic materials using X-rays and gamma rays.
88. ASTM E2002 - 98(2009) Standard Practice for Determining Total Image Unsharpness in Radiology.
89. ASTM E2597 / E2597M - 14 Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays.
90. ISO 19232-5:2018 Non-destructive testing – Image quality of radiographs – Part 5: Determination of the image unsharpness value using duplex wire-type image quality indicators.
91. ASTM E2698 – 18 Standard Practice for Radiographic Examination Using Digital Detector Arrays.
92. **Bavendiek, K.** New measurement methods of focal spot size and shape of X-ray tubes in digital radiological applications in comparison to current standards / K. Bavendiek, U. Ewert, A. Riedo, U. Heike, U. Zscherpel. –18-th world conference on nondestructive testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa.
93. Патент PCT/AU96/00178, 1995. Wilkins S.W. Simplified conditions and configurations for phase-contrast imaging with hard X-rays.
94. **Wilkins, S. W.** Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays / S. W. Wilkins, T. E. Gureyev, D. Gao, A. Pogany, A. W. Stevenson // Nature. – 1996. – V. 384. – P. 335-338.
95. **Cloetens, P.** Phase objects in synchrotron radiation hard X-ray imaging / P. Cloetens, R. Barrett, J. Baruchel, J. P. Guigay, M. Schlenker // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1996. – V. 29. – P. 133-146.
96. URL: <https://imagej.nih.gov/ij/developer/index.html>
97. URL: <http://www.uzscherpel.de/BAM/ic/index.html>
98. **Laperle, C. M.** Propagation based differential phase contrast imaging and tomography of murine tissue with a laser plasma x-ray source / C. M. Laperle, Ph.

Wintermeyer, J. R. Wands, D. Shi, M. A. Anastasio, X. Li, B. Ahr, G. J. Diebold, C. Rose-Petruck // *Applied Physics Letters*. – 2007. – V. 91. – P. 173901.

99. **Snegirev, A.** On the possibilities of X-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation / A. Snegirev, I. Snegireva, V. Kohn, S. Kuznesov, I. Schelokov // *Review of Scientific Instruments*. – 1995. – V. 66. – P. 5486-5492.

100. **Gureyev, T. F.** Phase-and-amplitude computer tomography / T. F. Gureyev, D. M. Paganin, G. R. Mayers, Y. I. Nesterets, S. W. Wilkins // *Applied Physics Letters*. – 2006. – V. 89 (3). – P. 034102.

101. **Gasilov, S.V.** Phase-contrast imaging of nanostructures by soft x rays from a femtosecond-laser plasma / S. V. Gasilov, A. Ya. Fayanov, T. A. Pikuz, I. Skobelev, F. Kalegary, K. Votstse, M. Nicolý, D. Sansone, D. Valentiny, S. De Sil'etry, S. Statzira. // *JETP Letters*. – 2008. – V. 87 (5). – P. 238-242.

102. **Xiao, Y.** Application of large industrial computed tomography in nondestructive testing of key components of railway vehicles/ Y. Xiao, H. Hu, Z. Chen // *CT Theory and Applications*. – 2009. – V. 18. – P. 72-78.

103. **Jiang, B.** High energy X-ray industrial CT technology and its application in automotive industry / B. Jiang, J. Tang, P. Li // *Proceeding of the 10th Annual Meeting of Chinese Society for Non-destructive Testing, Nanchang, China, 2013*. – P. 913-917.

104. **Xiao, Y.** The application of high energy industrial CT system in large casting NDT / Y. Xiao, Y. Li, Q. Ye // *Proceeding of the 10th Annual Meeting of Chinese Society for Non-destructive Testing, Nanchang, China, 2013*. – P. 840-847.

105. **Ding, G.** Application of high energy industrial computed tomography in testing solid rocket engine / G. Ding // *CT Theory and Applications*. – 2005. – V. 14 (3). – P. 35-39.

106. **Xiao, Y.** The applications of industrial CT NDT technology in geological research / Y. Xiao, Z. Chen, Y. Li, L. Ye. – *19th World Conference on Non-Destructive Testing, 2016*. – P. 1-7.

107. **Salamon, M.** High Energy X-ray Imaging for application in aerospace industry / M. Salamon, G. Errmann, N. Reims, N. Uhlmann. – 4th International Symposium on NDT in Aerospace, Augsburg, 2012. – P. 1-8.
108. **Uhlmann, N.** Metrology, applications and methods with high energy CT systems / N. Uhlmann, V. Volanda, M. Salamona, S. Hebelea, M. Boehnela, N. Reimsa, M. Schmitta, S. Kasperla, R. Hanke // AIP Conference Proceedings. – 2014. – V. 158133. – P. 1778-1785.
109. **Lechuga, L.** Cone beam CT vs. fan beam CT: a comparison of image quality and dose delivered between two differing CT imaging modalities / L. Lechuga, G. A. Weidlich // Cureus. – 2016. – V. 8 (9). – P. e778.
110. **Gelinck, G. H.** X-Ray Detector-on-Plastic with high sensitivity using low cost, solution-processed organic photodiodes / G. H. Gelinck, A. Kumar, D. Moet, J.-L.P.J. Van Der Steen, A.J.J.M. Van Breemen, S. Shanmugam, A. Langen, J. Gilot, P. Groen, R. Andriessen, M. Simon, W. Ruetten, A.U. Douglas, R. Raaijmakers, P.E. Malinowski, K. Myny // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2016. – V. 63. – P. 197-204.
111. **Hayashi, H.** Response functions of multi-pixel-type CdTe detector: toward development of precise material identification on diagnostic x-ray images by means of photon counting / H. Hayashi, T. Asaharaa, N. Kimotoa, Y. Kanazawaa, T. Yamakawab, S. Yamamotob, M. Yamasakib, M. Okadab // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2017. – V. 10327. – P. 116.
112. URL:<http://www.delken.it/contenuti/prodotti/tavole-girevoli-e-assi-lineari/roto-traslanti/deni-50-st.html>
113. URL:<https://www.deetee.com/x-scan-h-series>
114. URL:[https://www.industrial.ai/sites/g/files/cozyhq596/files/acquiadam\\_assets/industrial\\_radiography\\_image\\_forming\\_techniques\\_english\\_4.pdf](https://www.industrial.ai/sites/g/files/cozyhq596/files/acquiadam_assets/industrial_radiography_image_forming_techniques_english_4.pdf).
115. E 1441-00 - Standard guide for computed tomography (CT) Imaging / An American National Standard, Designation, 2005.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ В НАУЧНЫЕ РАБОТЫ, ПРОВОДИМЫЕ В РАМКАХ ГРАНТА РФФИ



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и инновациям ФГАОУ ВО НИ ТПУ  
И. Б. Степанов  
» \_\_\_\_\_ 2019г.

### АКТ

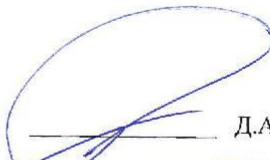


**о внедрении результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Смолянского Владимира Александровича на тему «Разработка, исследование и применение микрофокусного источника тормозного излучения на основе малогабаритного бетатрона в рентгенографии и томографии высокого разрешения» в научные работы, проводимые в рамках гранта РФФИ**

Комиссия в составе: председателя - директора ИШНКБ, к.т.н. Д.А. Седнева, заместителя председателя – руководителя ОКД ИШНКБ, д.ф.-м.н., А.П. Суржикова, профессора ОКД ИШНКБ, д.т.н. А.Е. Гольдштейна, составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Смолянского В.А.:

- разработанный макет источника излучения с фокусным пятном микропных размеров в диапазоне энергий фотонов от нескольких КэВ до десятка МэВ за счет изготовления мишеней микронных размеров и экспериментальных камер с внутренними гониометрами;
  - повышенная в десятки раз яркость источника тормозного излучения за счет уменьшения фокусного пятна, в следствие чего увеличены контраст и пространственное разрешение рентгеновских изображений;
  - полученные результаты рентгеновского контроля экспериментальных образцов из композитных и плотных материалов обеспечивающие высокую выявляемость дефектов с применением микрофокусного источников излучения;
  - экспериментальное исследование формирования рентгеновского изображения методом фазового контраста в неисследованной до сих пор области жесткого гамма-излучения с энергиями свыше МэВ;
  - созданный опытный образец высокоэнергетической рентгенографической системы на базе микрофокусного малогабаритного бетатрона для контроля крупногабаритных, толстостенных объектов с высокой чувствительностью и скоростью контроля;
- использованы при выполнении работ по гранту РФФИ 17-19-01217 в 2017-2019гг. «Новый микрофокусный источник тормозного гамма-излучения на основе компактного бетатрона с внутренней микромишенью для томографии высокого разрешения».

Председатель комиссии

Члены комиссии

  
 \_\_\_\_\_ Д.А. Седнев  
  
 \_\_\_\_\_ А.П. Суржиков  
  
 \_\_\_\_\_ А.Е. Гольдштейн

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ТПУ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**УТВЕРЖДАЮ**  
Проректор по образовательной  
деятельности

  
«05» 10 2019г.

**АКТ**

о внедрении результатов кандидатской диссертации  
Смолянского Владимира Александровича  
в учебный процесс НИ ТПУ

Настоящим подтверждается, что результаты диссертации Смолянского Владимира Александровича «Разработка, исследование и применение микрофокусного источника тормозного излучения на основе малогабаритного бетатрона в рентгенографии и томографии высокого разрешения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» используются в отделении «Контроль и диагностика» инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности при изучении дисциплин «Радиационные методы контроля» для бакалавров по направлению 12.03.01 «Приборостроение» и «Радиационный контроль и диагностика» для магистров по направлению 12.04.01 «Приборостроение».

Директор инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности  
к.т.н., доцент

Д.А. Седнев

Руководитель отделения «Контроль и диагностика»  
д.ф.-м.н., профессор

  
А.П. Суржигов



**ПРИЛОЖЕНИЕ В. «АЛГОРИТМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ  
ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ФОНА,  
ОБУСЛОВЛЕННОГО НЕСТАБИЛЬНОСТЬЮ ИСТОЧНИКА  
ИЗЛУЧЕНИЯ»**



Утверждаю

Ректор ТПУ

П.С. Чубик

2017г.

**ПРОТОКОЛ № 10/17-НХ  
от « 27 » ноября 2017 г.**

Экспертная комиссия ИШНКБ ТПУ рассмотрела предложение сотрудника ТПУ Смолянского Владимира Александровича, инженера научно-производственной лаборатории «Бетатронная томография крупногабаритных объектов» и Рычкова Максима Михайлович, заведующего научно-производственной лаборатории «Бетатронная томография крупногабаритных объектов» о включении в состав коммерческой тайны ТПУ сведений о разработке «Алгоритм цифровой обработки изображения для выравнивания неоднородности фона, обусловленного нестабильностью источника излучения» и о распространении на указанную работу режима «Коммерческая тайна» в связи с наличием в ней научно-технических новшеств, представляющих интеллектуальную собственность, и связанных с экономическими интересами ТПУ.

По результатам рассмотрения экспертная комиссия РЕШИЛА:

1. Определить в качестве объекта ценности страницы описания результата интеллектуальной деятельности (ноу-хау).

2. В соответствии с Положением о коммерческой тайне и конфиденциальной информации ТПУ:

2.1. Установить для данного объекта следующие защитные меры: проставление грифа «коммерческая тайна» на материальных носителях ноу-хау, ограничение допуска сотрудников ТПУ и третьих лиц к материальному носителю ноу-хау, обеспечить сохранность документов, содержащих описание ноу-хау.

2.2. Определить защищаемую документальную среду в следующем составе:

Описание объекта ноу-хау.

2.3. Установить для рассматриваемого объекта порядок документального оформления и контроля в соответствии с требованиями сохранения коммерческой тайны.

3. Допуск к защищаемой среде разрешить следующим лицам:

1) Смолянский В.А., инженер НПЛ БТКО ЦПТ ИШНКБ ТПУ.

2) Рычков М.М., канд. тех. наук, зав. лаб. НПЛ БТКО ЦПТ ИШНКБ ТПУ.

4. Срок окончания действия режима «Коммерческая тайна» «31» декабря 2022 г.

**Председатель экспертной комиссии**

Директор ИШНКБ ТПУ

/Бориков В.Н./

**Члены комиссии**

/Ахмеджанов О.А./

/Силушкин С.В./

/Беспалько А.А./