

На правах рукописи



СМОЛЯНСКИЙ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в научно-производственной лаборатории «Бетатронная томография крупногабаритных объектов» инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук
Рычков Максим Михайлович

Официальные оппоненты: **Клопотов Анатолий Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры прикладной механики и материаловедения.

Потрахов Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», заведующий кафедрой электронных приборов и устройств.

Защита диссертации состоится 25 декабря 2019 года в 15:00 часов на заседании диссертационного Совета ДС.ТПУ.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 502.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2019 года

Ученый секретарь
диссертационного Совета ДС.ТПУ.13
к.т.н., доцент

Шевелева Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 МИБ-6 до диаметра 0,1 мм, что спровоцировало падение МЭД, значение которой влияет на скорость проведения неразрушающего контроля.

В зарубежных работах исследователями 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. и 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 исследователи Katsutoshi S. Makoto A. Toshiyuki T. 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 микрофокусных 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 РФФИ 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту и описана структура работы.

В первой главе представлен обзор существующих высокоэнергетичных источников излучения с малым фокусным пятном для применения в высокоэнергетической рентгенографии и компьютерной томографии высокого разрешения.

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 $2 \times 2 \text{ мм}^2$ и $0,2 \times 0,5 \text{ мм}^2 = 40$, то проигрыш в числе используемых квантов составляет всего 2,5 раза или 1,58 раза по отношению сигнал/шум (ОСШ). 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.

Вторая глава посвящена разработке микрофокусного источника излучения на основе бетатрона и сравнению его характеристик с прототипом.

Для уменьшения размеров фокусного пятна источника излучения модифицировались, производимые в Томском политехническом университете, бетатроны с энергиями 4 и 18 МэВ. Отличительными от классического прототипа признаками являются выбор сечения мишени с размерами, меньшими размеров сечения пучка (около 2-3 мм) ускоренных электронов, что обеспечивает горизонтальный размер фокусного пятна сопоставимый с размером сечения мишени. Дополнительно реализовано смещение ускоренных частиц на мишень с достаточно долгой циркуляцией электронов по орбите с радиусом расположения микромишени, что обеспечивает получение максимальной мощности дозы тормозного излучения.

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. В качестве материала для изготовления целесообразно выбирать кремний (Si) с низкой плотностью и тантал (Ta) с высокой плотностью материала, тогда мишени обладают достаточной жесткостью и стойкостью к воздействию пучков электронов, а также технологичны при изготовлении. В результате исследований изготовлены микромишени в виде ультратонких пластинок трапециевидальной формы из кремния толщиной 50 мкм и тантала – 13 мкм.

Изготовлены новые экспериментальные ускорительные камеры для 4 и 18 МэВ бетатронов с внутрикамерными гониометрами с ультратонкими

держателями для позиционирования микромишеней по высоте (до 2 мм), расстоянию (до 20 мм) относительно равновесных орбит ускоряемых электронов и углов ориентации (до $1,5^\circ$) относительно взаимодействующих с ними пучков электронов при внешнем и внутреннем расположениях мишеней.

Общий вид созданных экспериментальных камер и макеты микрофокусных источников излучения на основе бетатрона Б-18 и МИБ-4 показаны на рисунке 1.

При сбросе электронов на Si мишень, генерация излучения происходит преимущественно в рентгеновской области спектра (условно, энергия фотонов < 1 МэВ), при сбросе на Ta мишень – излучение преимущественно в гамма-области спектра (энергия фотонов > 1 МэВ), так как излучение рентгеновской части спектра поглощается материале мишени высокой плотности.

Представлены результаты угловых распределений излучения, генерированного 18 МэВ

электронами в Si пластине с вертикальным и горизонтальным (вдоль пучка электронов) размерами 5 и 4 мм, соответственно, ориентация которой относительно пучка электронов изменялась в области углов от $1,9^\circ$ до $-1,8^\circ$. Фотографии продемонстрировали резкое изменение вида углового распределения с изменением ориентации в области скользящих углов (рисунок 2).

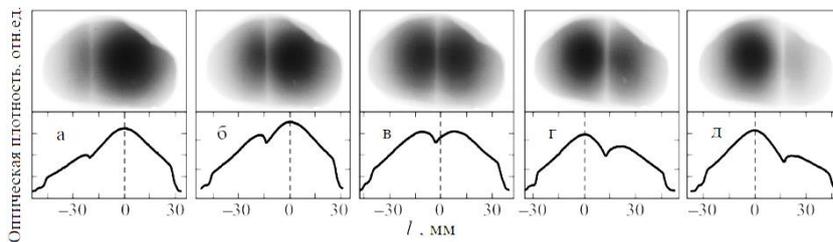


Рисунок 2 - Фотографии пучков излучения, генерированного 18 МэВ электронами при углах ориентации Si пластины $\theta_0 = 1,9^\circ$ (а); $1,25^\circ$ (б); $0,05^\circ$ (в); $-1,25^\circ$ (г) и $-1,8^\circ$ (д). Ниже приведены профили плотностей почернения вдоль горизонтальных линий, проходящих через центры пятен почернения. Интервал в 1 мм на фотографиях соответствует $0,05^\circ$ в угловом распределении

излучения, которое выходит через боковые поверхности пластины.

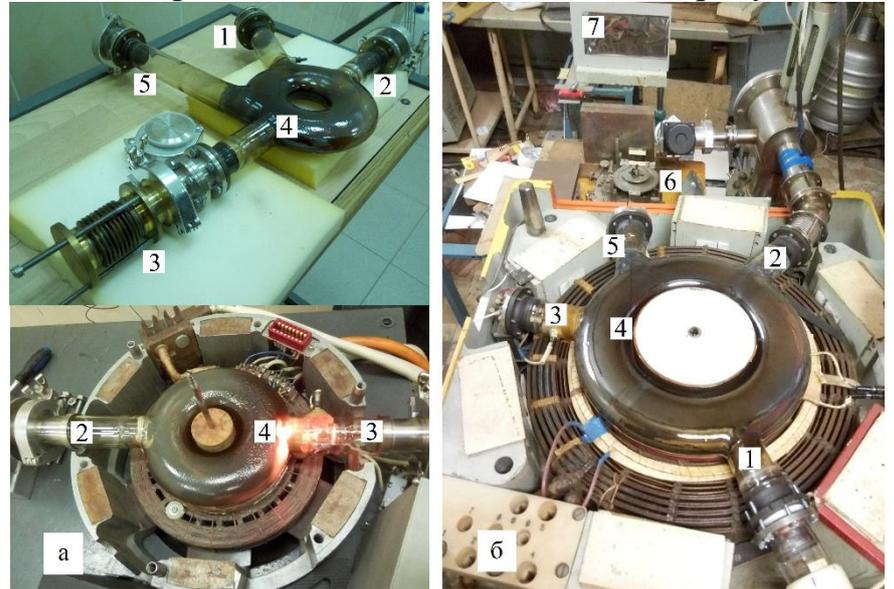


Рисунок 1 - Экспериментальные камеры и макеты микрофокусных источников излучения на основе бетатрона МИБ-4 (а) и Б-18 (б):

- 1 - патрубок с инжектором; 2 - патрубок к вакуумному насосу;
- 3 - патрубок с внутренним гониометром для ориентации микромишени; 4 - место мишени внутри камеры; 5 - патрубок для выхода излучения, с окном, закрытым тонкой фольгой; 6 - внешний гониометр для образца с микродефектами; 7 – рентгеновская пленка

При ориентации кристалла вдоль пучка электронов распределение излучения симметрично и состоит из широких пятен интенсивности, которые расположены по обе стороны от светлой полосы в направлении проекции пластины, образованной поглощением излучения в пластине и дополнительным преломлением

Две компоненты общего распределения излучения генерируются двумя пучками электронов – «отраженным» и «прямо прошедшим», на которые делится первоначальный пучок электронов при взаимодействии с мишенью, расположенной вдоль пучка электронов.

При малых скользящих углах ориентации мишени относительно пучка электронов (несколько десятых градуса) угловые распределения излучения асимметричны. Компоненты распределения расположены по разные стороны от светлой полосы и интенсивность в «отраженной» компоненте излучения меньше, чем в компоненте, направленной в направлении пучка электронов. При этом степень асимметричности распределения увеличивается с увеличением угла ориентации мишени.

При больших углах ориентации (> 2 градусов) мишени вид углового распределения практически не зависит от угла ориентации, как это имеет место при перпендикулярном падении электронов на тонкую пластину. При этом угловая ширина распределения примерно в 1,5 раза уже, чем при мишени, ориентированной вдоль пучка электронов.

Представлены результаты распределения тормозного излучения, генерируемого электронами с энергией 18 МэВ в обычной мишени W толщиной 1,5 мм, и в мишени Ta 13 под углами ориентации. $\theta_0 = -1^\circ$ и 0° относительно направления электронного пучка. Для сравнения (рисунок 3) приведена фотография углового распределения излучения, генерируемого электронами с энергией 18 МэВ в мишени 50 мкм Si, ориентированного вдоль электронного пучка, полученные ранее.

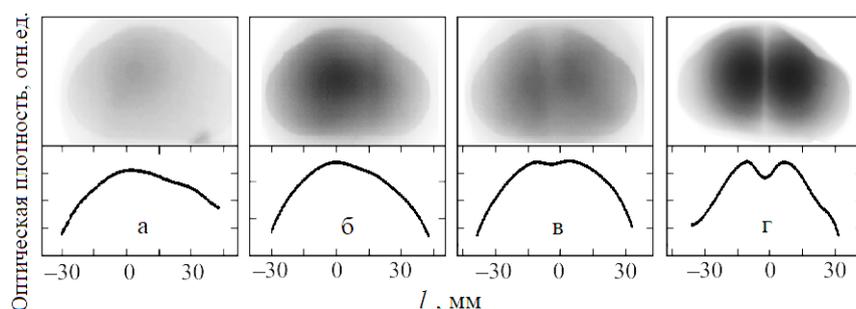


Рисунок 3 – Фотографии распределения интенсивности излучения, генерируемого в мишени W 1,5 мм(а), мишени Ta 13 мкм, ориентированной при $\theta_0 = -1^\circ$ (б) и $\theta_0 = 0^\circ$ (в); и кристалл Si 50 мкм, ориентированный при $\theta_0 = 0^\circ$ (г)

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.

Исследование зависимости угловых распределений излучения от ориентации мишеней относительно пучка электронов впервые показало сложную динамику изменения вида угловых распределений излучения при изменении скользящего угла между поверхностью мишени и пучком электронов. Вид углового распределения резко изменяется при изменении ориентации мишени в области скользящих углов, что не имеет место при перпендикулярном (нормальном) падении быстрых электронов на обычную мишень, как в классическом бетатроне.

Приведено сравнение мощности дозы 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), следовательно размеры фокусов излучения составляли – $1,5 \times 0,3 \text{ мм}^2$ и $1,5 \times 0,013 \text{ мм}^2$, соответственно. Отношение площадей фокусов равно 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 см^2 . Спектральная область регистрируемых фотонов $>30 \text{ кэВ}$. Показания дозиметра составляли для W и Та мишеней примерно 20 и 9 Р/мин, соответственно. При отношении мощности дозы излучения, генерированного в широкой и узкой мишени, около 2.2, отношение яркостей 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. 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.

Необходимо отметить, что простым коллимированием пучка излучения, например, щелевым коллиматором (рисунок 4) возможно только уменьшить размер фокуса излучения, но не получить увеличение яркости излучения. В этом случае, этот параметр будет уменьшаться за счет уменьшения мощности дозы



Рисунок 4 – Уменьшение фокусного пятна коллимированием

излучения пропорционально отношению размеров источника и коллиматора.

Экспериментальным путем измерена зависимость угловой плотности излучения, генерированного в 13 мкм Та мишени при различных режимах сброса в бетатроне Б-18 (рисунок 5). 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 $> 14 \text{ Ом}$ излучение не генерировалось, потому что минимальный радиус орбиты пучка больше радиуса расположения мишени. При изменении сопротивления от 14 до 13 Ом наблюдается резкий рост угловой плотности излучения, то есть пучок начинал попадать на мишень. Далее плотность излучения росла до максимума при сопротивлении в 9 Ом, а затем падала примерно на 20 % при дальнейшем уменьшении величины сопротивления.

Экспериментально исследован еще один способ уменьшения размеров фокусного пятна в бетатроне МИБ-4 – за счет уменьшения скорости смещения электронов на стандартную мишень из тантала с высотой 12мм, шириной 1,6 мм, толщиной 0,6 мм, которая в данном случае больше размеров пучка электронов. Согласно формуляру, на бетатрон МИБ-4, максимальный вертикальный размер фокусного пятна – 3мм который повторяет размер сечения электронного пучка, горизонтальный – 0,3мм – определяется радиальной скоростью расширения орбиты. Для проверки данного предположения были проведены относительные измерения размеров фокусного пятна бетатрона МИБ-4 при энергиях ускоренных электронов 1МэВ, 2МэВ, 3,5МэВ. Для оценки изменения размеров фокусного пятна использовался метод с применением свинцового объектива (камеры-обскуры).

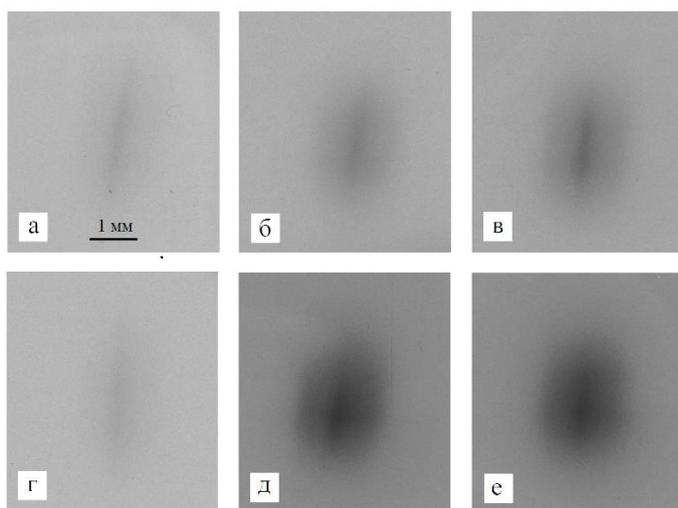


Рисунок 6 – Негативные изображения фокусных пятен при энергии (а, г) - 1 МэВ; (б, д) – 2,5 МэВ; (в, е) – 3,5 МэВ и радиальной скорости расширения орбиты (а, б, в) $v_R = 1.3 \cdot 10^4$ м/с и (г, д, е) $v_R = 6.3 \cdot 10^3$ м/с

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.

В третьей главе представлены результаты контроля микроструктур экспериментальных объектов с высокой и низкой плотностью материала, при использовании классического и модифицированного источников излучения. Экспериментально исследовано формирование рентгеновского изображения методом фазового контраста в неисследованной до сих пор области жесткого гамма-излучения с энергиями свыше 1 МэВ.

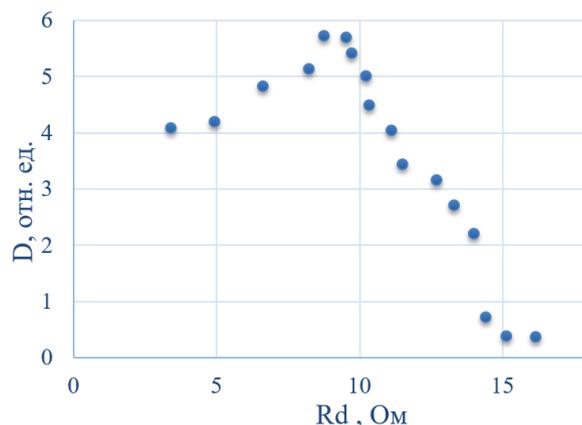


Рисунок 5 - Зависимость мощности дозы излучения, генерированного в 13 мкм танталовой мишени, от величины добавочного сопротивления в цепи обмотки сброса

Построив и сравнив графики зависимости плотности почернения фотопленки от горизонтальной и вертикальной координат по рисунку б определено уменьшение размеров фокусного пятна с уменьшением радиальной скорости расширения орбиты, до 0,75-0,8. Таким образом, изменение скорости расширения орбиты, изменяет не только горизонтальный размер фокусного пятна, но и вертикальный. Если не учитывать изменение углового распределение фотонов, которое при снижении скорости смещения, будет повышать яркость источника,

С помощью двухпроводочного эталона нерезкости Duplex IQI определено пространственное разрешение (SR_b^{image}) рентгеновских снимков, полученных с применением микрофокусных источников с 50 мкм Si и 13 мкм Ta мишенями и классического источника с 1,5 мм W мишенью. SR_b^{image} с применением микромишеней в 4 раза лучше, чем со стандартной мишенью (рисунок 7).

Нерезкость в данном случае лучше и зависит от размера фокусного пятна источника, который приблизительно равен размеру сечения микромишени, ориентированной вдоль электронного пучка.

Контрастность и нерезкость тонких проволок ухудшается при энергии МэВ-ного диапазона, 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 (рисунок 8).

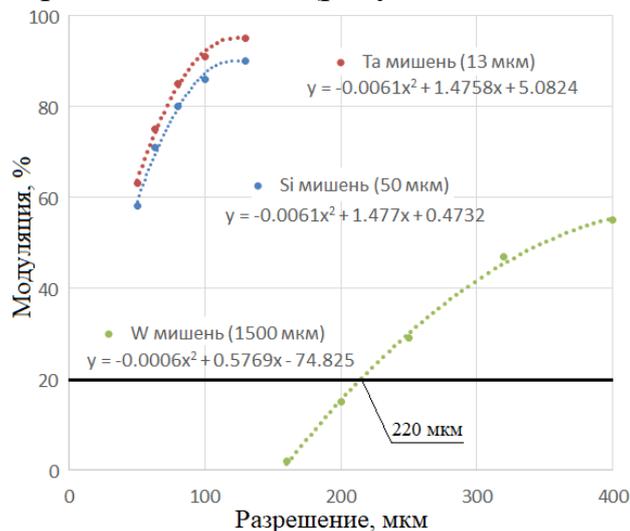


Рисунок 7 – Сравнение пространственного разрешения рентгеновских снимков, полученных с применением классического и микрофокусных источников излучения

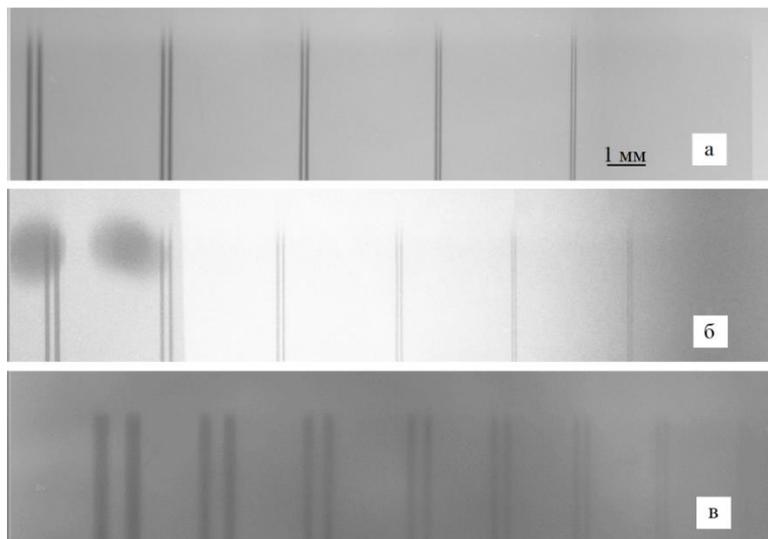


Рисунок 8 - Изображение 9-ой -13-ой пар проволок эталона нерезкости Duplex IQI при использовании источника: с 50 мкм Si- мишенью (а); с 13 мкм Ta мишенью (б); изображение 1-ой - 8-ой пар проволок – при использовании обычной W мишени (в)

Генерированное

тормозное излучение в узкой Ta-мишени, способствует получению высококонтрастных изображений деталей исследуемых объектов из более плотных материалов, чем при использовании излучения, генерированного в кремниевой мишени.

Для измерения фокусного пятна косвенным методом получены рентгенограммы 13-ой пары проволок устройства IQI при угловых положениях в конусе излучения Si микромишени от $-1,45^\circ$ до $1,25^\circ$ (рисунок 9). Согласно методике

определения фокусного пятна по двухпроводочному эталону, эффективный горизонтальный размер источника излучения, соответствующий вышеприведенным угловым положениям θ этой пары в конусе излучения, составляет 147, 108, 57, 110 и 140 мкм, что согласуется с угловым положением и размерами эталона Duplex IQI. Эффективный вертикальный размер источника

равный 1,48 мм слабо зависит от вертикального углового положения точки наблюдения в конусе излучения, так как раствор конуса излучения составляет около 3° .

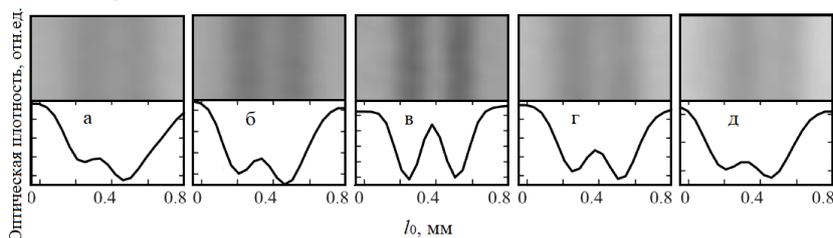


Рисунок 9 - Изображения 13-й пары проволочек прибора IQI и профили плотностей почернения, полученные при обработке рентгенограмм, измеренных при увеличении $\times 3$, $\theta_0 = 0.05^\circ$ и угловых положениях этой пары $\theta = -1.45^\circ$ (а); -0.89° (б); -0.15° (в); 0.82° (г) и 1.25° (д) относительно пучка электронов

диапазоне МэВ результаты не совсем удовлетворительные из-за «прозрачности» проволочек. Поэтому, для исследования качества изображения, полученного с применением жесткого тормозного излучения ($E_\gamma > 1$ МэВ), использовался объект, состоящий из стальных стержней, с размерами $9 \times 9 \times 35$ мм³ с зазорами шириной 10 мкм между их полированными поверхностями. Пробелы рассматривались как модель неточности сборки, которая должна быть обнаружена с помощью радиографии с использованием созданного источника. Результаты показали достаточно хорошее разрешение пробелов (рисунок 10).



Рисунок 10 - Изображения образца с 10 мкм зазорами между блоками

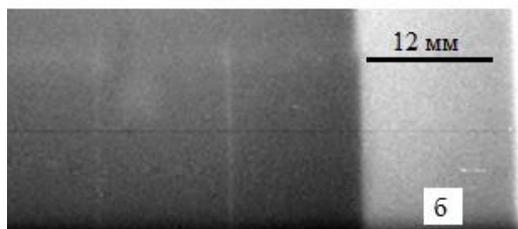
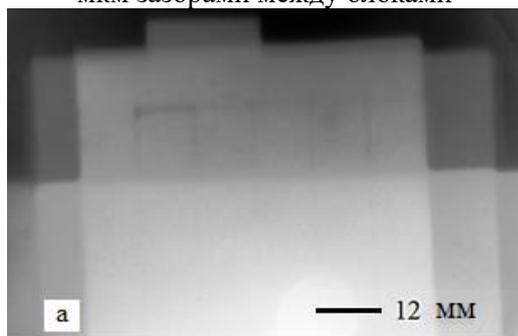


Рисунок 11 – а) - изображения образца с 20 мкм зазорами между блоками, б) - увеличенный фрагмент негативного изображения правого верхнего угла

Приведены экспериментальные данные рентгеновских изображений при использовании микрофокусного источника с 13 мкм Та мишенью. Дуплексный IQI можно эффективно использовать с радиационными энергиями до 400 кэВ. Для энергий в

диапазоне МэВ результаты не совсем удовлетворительные из-за «прозрачности» проволочек. Поэтому, для исследования качества изображения, полученного с применением жесткого тормозного излучения ($E_\gamma > 1$ МэВ), использовался объект, состоящий из стальных стержней, с размерами $9 \times 9 \times 35$ мм³ с зазорами шириной 10 мкм между их полированными поверхностями. Пробелы рассматривались как модель неточности сборки, которая должна быть обнаружена с помощью радиографии с использованием созданного источника. Результаты показали достаточно хорошее разрешение пробелов (рисунок 10).

Ширина зазора увеличивается справа налево, это обусловлено различной ориентацией поверхностей стержней, образующих зазоры относительно оси конуса излучения $\theta_z = 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$.

Дополнительно исследовался образец, состоящий из шести вертикально расположенных блоков, с зазорами шириной 20 мкм за прямоугольными пластинами толщиной 10, 15 и 15 мм, и различной высоты, которые расположены одна за другой, так что излучение проходило разные толщины стали в разных участках сборки. Пластины служили поглотителями излучения, которые увеличивали долю тормозного излучения в жесткой области спектра. Наиболее светлый участок изображения (рисунок 11а) соответствует участку сборки с наибольшей суммарной толщиной стали 55 мм. Увеличенное негативное изображение левого верхнего угла (рисунок 11б) также показывает хорошее разрешение пробелов за толщиной стали 40 мм.

Для сравнения результатов контроля, выполненных с применением бетатрона с обычной мишенью, получены рентгенограммы того же составного объекта исследования при тех же параметрах контроля (рисунок 12 б).

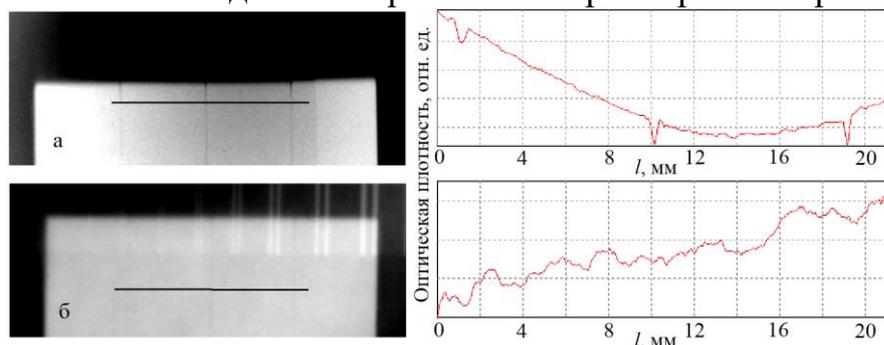


Рисунок 12 - Негативные изображения объекта и денситограммы, полученные с применением микрофокусного (а) и классического (б) источников тормозного излучения

На рисунке 12а прослеживается высокая чувствительность контроля 10 мкм зазора, чего не скажешь о результате, полученном при классическом источнике излучения с большей мишенью. Дополнительно исследовался образец - пластиковый держатель, состоящий из двух блоков между которыми находилась танталовая фольга 13 мкм. Такой подход также использовался для моделирования дефекта в виде щели определенной длины в толще стали. Длина фольги вдоль пучка излучения составляет 4 мм, что обеспечивает достаточно сильное поглощение жесткого излучения и формирует ясное изображение фольги. За образцом помещались стальные пластины с суммарной толщиной до 55 мм на расстоянии 5 см от образца.

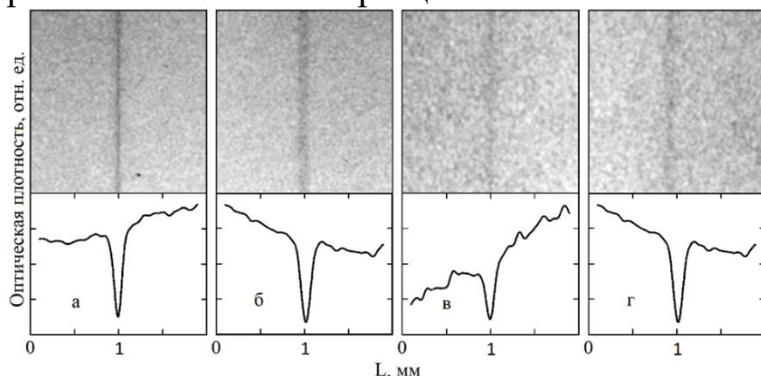


Рисунок 13 - Увеличенные в 2,4 раза позитивные изображения и денситограммы изображений фольги Та 13 мкм ориентированной при $\theta = 0$ (а, в) и $\theta = 0.6^\circ$ (б, г) относительно пучка излучения: без (а, б) и с (в, г) дополнительными стальными пластинчатыми поглотителями толщиной 55 мм

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 (рисунок 13), чего не наблюдается при использовании бетатрона с толстой мишенью.

Приведены результаты контроля методом абсорбционного и фазоконтрастного формирования рентгеновских изображений не только в области энергий кэВ, который применяется при использовании острофокусных монохроматических источников, но и при применении полихроматического МЭВ излучения за счет эффекта преломления излучения на резкой границе раздела двух сред с различными коэффициентами преломления.

Полученные с увеличением в 3 раза изображения держателя микроструктуры прибора Duplex IQI (рисунок 14) продемонстрировали высокое разрешение его края за счет эффекта фазового контраста. При этом результаты

демонстрируют тонкую структуру фазового контраста в рентгенограммах при 50 мкм Si мишени тормозного излучения, из-за малого размера микрофокуса источника.

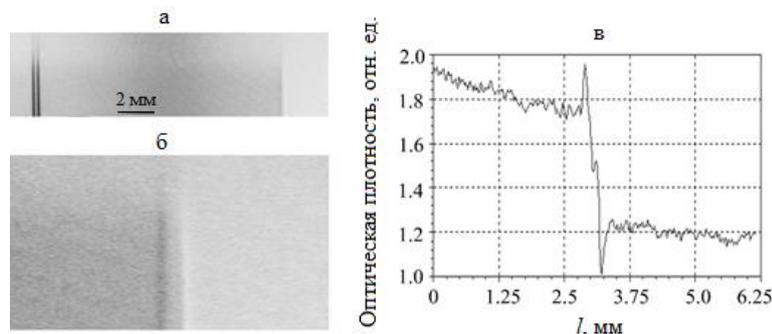


Рисунок 14 - а) – увеличенное ($\times 3$) изображение 13-й пары Pt проволочек и края эталона IQI при 50 мкм Si мишени; б) – дополнительно увеличенное изображение края эталона IQI; в) – денситограмма изображения (б)

наблюдение краевого фазового контраста при пластинах с толщиной менее 10 мм. Также, как и в предыдущих экспериментах, стальная пластина служила поглотителем излучения, увеличивая долю тормозного излучения в гамма-области. Боковая поверхность правого края пластины была ориентирована вдоль направления тормозных гамма-лучей.

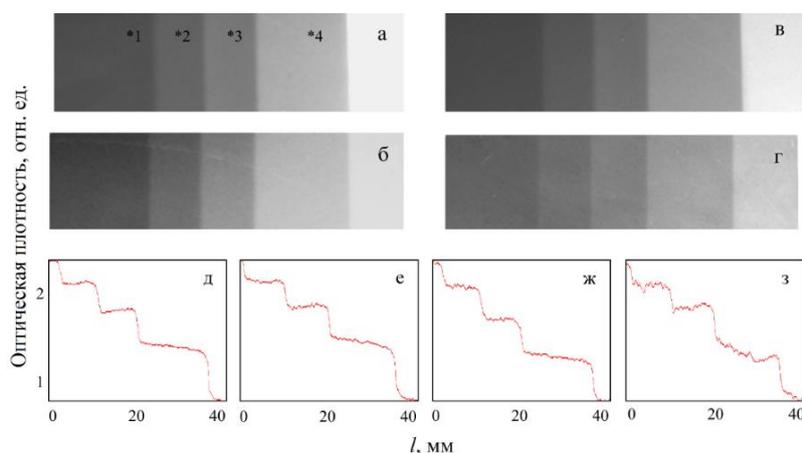


Рисунок 15 - Увеличенные в 2,5 раза изображения сборки из четырех стальных пластин: а) – без дополнительной стальной пластины-поглотителя; б – г) - при толщинах дополнительной стальной пластины-поглотителя 15, 35 и 55 мм, соответственно, и денситограммы изображений, представленных на рисунке д – з, соответственно

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- поглотителя, 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.

На рисунке 15 показаны увеличенные в 2,5 раза изображения сборки, состоящей из стальной пластины толщиной 10 мм и трех стальных пластин толщиной 5 мм каждая. Изображения получены без дополнительной стальной пластины-поглотителя и при пластине-поглотителе толщиной 15, 35 или 55 мм. Целью эксперимента было

Результаты исследований демонстрируют 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 составляет около $F_H = 13, 24$ и 35 мкм, соответственно. Гамма-лучи проходили в областях вблизи

Краевой фазовый контраст наблюдался и при гораздо меньших толщинах пластин. На рисунке 16 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.

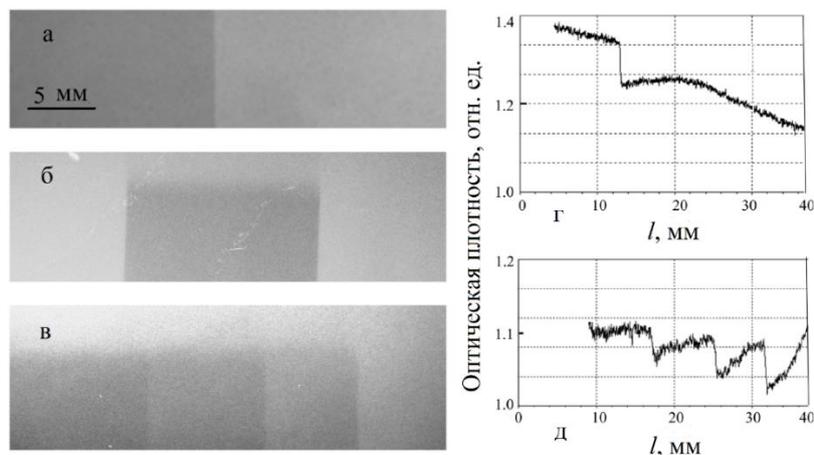


Рисунок 16 - Изображения краев 0,9 и 0,3 мм стальных пластин, (а) и (б), и сборки из трех 25 мкм свинцовых фольг (в). Денситограммы изображений края 0,9 мм стальной пластины (г) и краев свинцовых фольг (д)

Как и в случае толстых пластин, изображения на рисунке 16 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.

Наблюдаемый впервые для гамма-области спектра эффект фазового контраста в увеличенных в 2,5 раза изображениях краев пластин с толщинами в широкой области от 15 мм до 25 мкм свидетельствует о высоком качестве пучка излучения, генерируемого микрофокусным источником на основе 13 мкм Та мишени компактного бетатрона.

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.

В четвертой главе представлен опытный образец высокоэнергетической рентгенографической цифровой системы на базе разработанного микрофокусного источника излучения для контроля крупногабаритных, толстостенных объектов с высокой чувствительностью и скоростью контроля.

В качестве источника высокоэнергетического тормозного излучения использовался модифицированный бетатрон с энергией 7 МэВ (SEA-7). Мощность дозы составляла 10 Р/мин на расстоянии 1 метр от фокусного пятна, горизонтальный размер которого равен 50 мкм, а вертикальный – не превышал 1,5 мм. В качестве детектора использовался высокоэнергетический линейный детектор X-Scan 0.4iNE2-410 (Detection Technology, Финляндия) с высокоэффективным сцинтиллятором вольфрамат кадмия ($CdWO_4$). Детектор имеет относительно малый размер сцинтиллятора ($0,32 \times 0,6 \times 10 \text{ мм}^3$) с шагом пикселя 400 мкм и со значительно улучшенной радиационной стойкостью и

динамическим диапазоном для высокоэнергетических промышленных неразрушающих испытаний в диапазоне энергий от 450 кВ до 9 МэВ.

Детектор и источник оборудованы коллиматором шириной 1 мм из свинцовых блоков для минимизации рассеянного рентгеновского излучения, а также для уменьшения дозовой нагрузки как на объект контроля, так и на электронные компоненты детекторной системы.

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

Общий вид высокоэнергетической рентгенографической системы показан на рисунке 17.

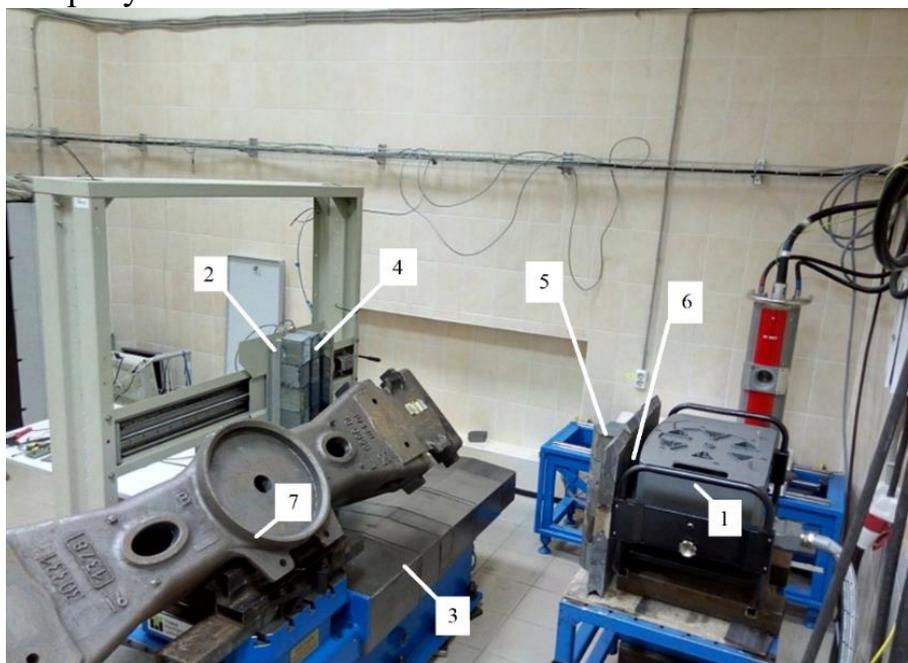


Рисунок 17 - Общий вид рентгеновского комплекса:
1- микрофокусный источник – бетатрон, 2 – линейный детектор излучения, 3 – прецизионный стол, 4 – коллиматор детектора, 5- коллиматор источника излучения, 6- датчик опорного канала, 7 – объект контроля

Для исследования радиографических возможностей цифровой рентгенографической системы взят объект реальной промышленности предприятия АО «ТВСЗ» - литая деталь грузовых вагонов - балка надрессорная длиной 2,5 м и максимальной толщиной 520 мм.

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 раза. Максимальное пространственное разрешение системы по двухпроводочному эталону Duplex IQI

для данной геометрии и минимальной скорости сканирования составило около 50 мкм (рисунок 18).

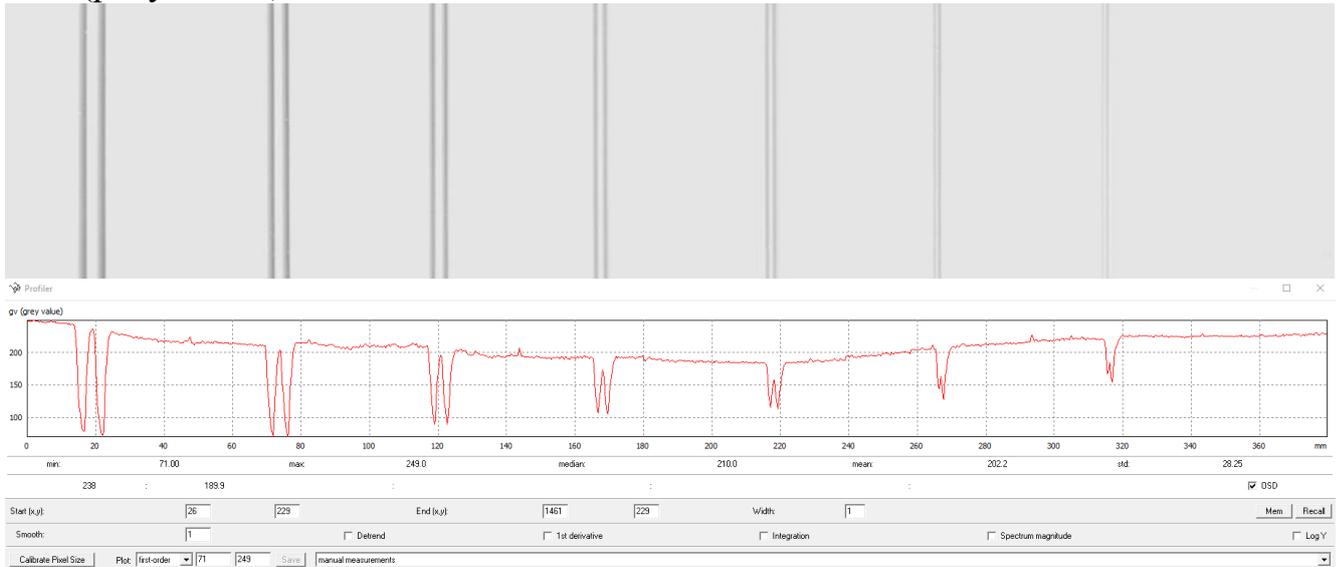


Рисунок 18 – Базовое пространственное разрешение системы

Уровень сигнала на максимальной толщине 520 мм (ребра жесткости) оказался неинформативным, паразитным. Для большей информативности объект контроля (ОК) поворачивался на определенный угол, для уменьшения суммарной толщины стенок ОК в местах просвечивания.

Чувствительность контроля по канавочному эталону составила 1,6% при средней суммарной толщине просвечиваемого материала 70 мм (рисунок 19).

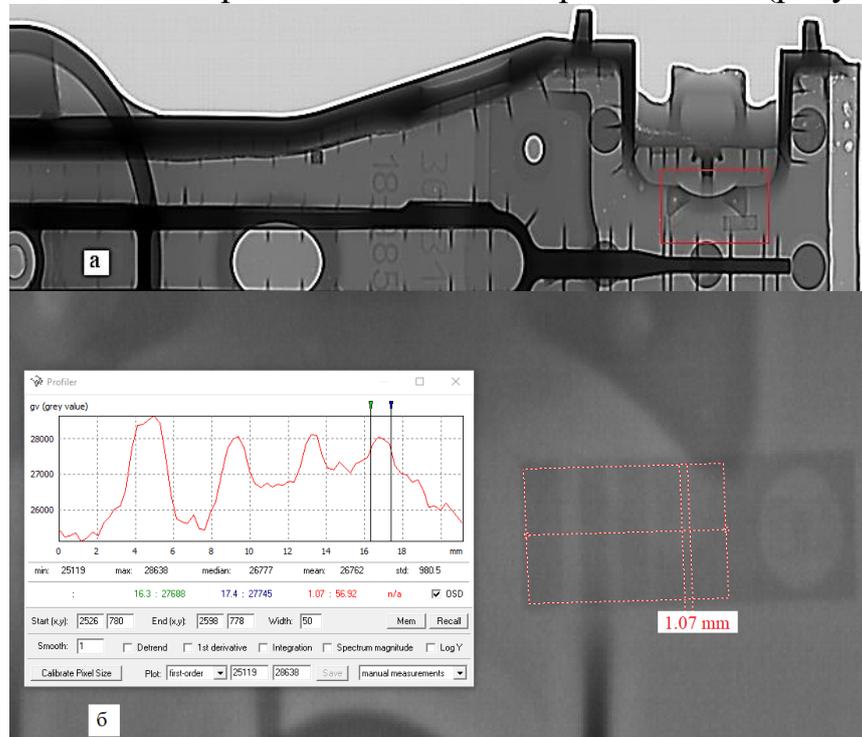


Рисунок 19 – а) - Радиограмма контролируемого изделия с применением канавочного эталона чувствительности, (максимальная толщина фрагмента стальной отливки где расположен эталон – 70 мм); б) – увеличенное изображение канавочного эталона

В результате контроля надрессорной балки было выявлено большое количество дефектов диаметром до 1 мм и меньше (рисунок 20).

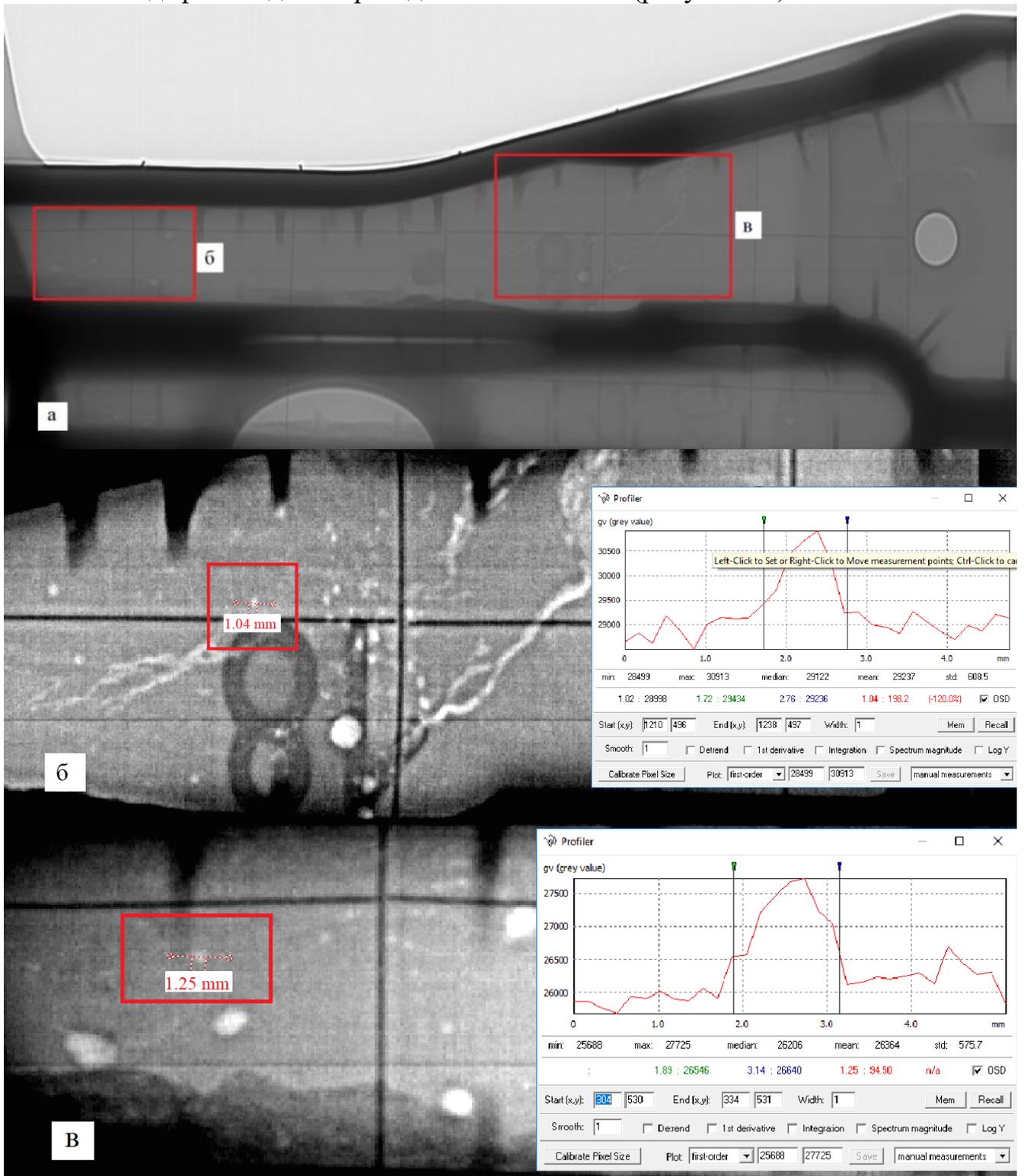


Рисунок 20 – а) - измерение и локализация дефектов надрессорной балки;
б) и в) - увеличенные для демонстрации изображения дефектов

Применение разработанного микрофокусного источника способствовало значительному повышению пространственного разрешения цифровой рентгеновской системы, тем самым позволило выявлять дефекты микронных

размеров в крупногабаритных изделиях с произведением плотности на толщину до 260 г/см² и увеличить производительность контроля в 7 раза.

Технические характеристики опытного образца высокоэнергетической цифровой рентгенографической системы на базе микрофокусного малогабаритного бетатрона, представлены в таблице 1.

Таблица 1 - 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

В заключении излагаются основные результаты диссертации.

В приложениях 1-3 представлены копии полученных при выполнении работы актов о внедрении результатов научных исследований.

Работа выполнена в рамках Соглашения №17-19-01217 при поддержке Российского научного фонда.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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. Разработан 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 из материалов низкой и

высокой плотности микронных размеров и экспериментальных камер с внутренними гониометрами.

2. Повышена в 11 раз яркость модифицированного источника тормозного излучения, не за счет увеличения ускоряемого тока, а за счет уменьшения размеров фокусного пятна при сохранении ускоряемого тока, 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 микрофокусного 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Смолянский, В. А.** Генерация жесткого тормозного излучения при скользящем падении электронов пучка бетатрона с энергией 18 МэВ на поверхность Та фольги толщиной 13 мкм / М. М. Рычков, В. В. Каплин, С. И. Кузнецов, В. А. Смолянский, И. К. Васьковский // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – №.7. – 42–51;

2. **Смолянский, В. А.** Контроль плоских включений с использованием микрофокусного тормозного гамма-излучения 18 МэВ бетатрона / М. М. Рычков, В. В. Каплин, В. А. Смолянский, И. Б. Степанов // Контроль. Диагностика. – 2018. – №. 12. – С. 58–62;

3. **Смолянский, В. А.** Контроль сопряжений поверхностей деталей с использованием микрофокусного излучения 18 МэВ бетатрона / М. М. Рычков, В. В. Каплин, Е. Л. Маликов, В. А. Смолянский, И. Б. Степанов, В. Г. Генцельман, И. К. Васьковский // Контроль. Диагностика. – 2017. – №. 12. – С. 36–40;

Публикации в изданиях из базы данных Scopus и Web of Science:

4. **Smolyanskiy, V. A.** Generation of hard bremsstrahlung at the grazing incidence of 18-MeV electrons of a betatron beam on the surface of Ta foil 13 μm thick / M. M. Rychkov, V. V. Kaplin, S. I. Kuznetsov, V. A. Smolyanskiy and I. K. Vaskovskiy // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2019. – Vol. 13. – №. 4. – Pp. 609–613;

5. **Smolyanskiy, V. A.** Microfocus Bremsstrahlung Source Based on a Narrow Internal Target of a Betatron / Rychkov, M. M., Kaplin, V. V., Malikov, E. L.,

Gentsel'man, V., Vas'kovskii, I. K. // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2018. – Vol. 37. Is. 1. – Article number 13 – Pp. 1–8;

6. **Smolyanskiy, V. A.** Simulation of the Betatron Magnetic Field at the Electron Beam Displacement in Comsol Multiphysics / Kolomeytsev, A., Smolyanskiy, V., Stepanov, I // MATEC Web of Conferences. 2018. – Vol. 155. – Article number 01039 – Pp. 1–7;

7. **Smolyanskiy, V. A.** New microfocus bremsstrahlung source based on betatron B-18 for high-resolution radiography and tomography / Rychkov, M. M., Kaplin, V. V., Malikov, E. L., Smolyanskiy, V. A., Stepanov, I. B., Lutsenko, A. S., Gentsel'Man, V., Vas'Kovskiy, I. K. //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 289. Is. 1. – Article number 012044 – Pp. 1–5;

8. **Smolyanskiy, V. A.** Linear microfocus bremsstrahlung generated in light and heavy narrow targets in B-18 betatron / Rychkov, M. M., Kaplin, V. V., Malikov, E. L., Smolyanskiy, V. A., Stepanov, I. B., Lutsenko, A. S., Gentsel'Man, V., Vas'Kovskiy, I. K. // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 881. Is. 1. – Article number 012007 – Pp. 1–7;

9. **Smolyanskiy, V. A.** Reducing the size of the bremsstrahlung focal spot in a small-size betatron / Stepanov, I. B., Rychkov, M. M., Kaplin, V. V., Smolyanskiy, V. A., Malikov, E. L., Shestak, A. P. // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12. Is. 23. – Pp. 13137–13141;

10. **Smolyanskiy, V. A.** X-ray tomography of the aerospace products / Smolyanskiy, V., Rychkov, M., Borikov, V. // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 102. – Article number 01033 – Pp. 1–4;

Материалы конференций:

11. **Smolyanskiy, V. A.** Linear microfocus bremsstrahlung generated in light and heavy narrow targets in B-18 betatron / IV международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле «SibTest 2017», г. Новосибирск, 27-30 июня 2017;

12. **Smolyanskiy, V. A.** Microfocus Bremsstrahlung Source Based on Betatron High-Resolution Radiography and Tomography / 3th International Conference on High Energy Physics», Rome, Italy, December 11-12, 2017;

13. **Smolyanskiy, V. A.** Investigation of betatron radiation generated in interaction of 18 mev electron beam with internal microtarget / 18th International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter (EFRE-2018), Tomsk, Russia, 16-22 September 2018;

14. **Smolyanskiy, V. A.** New Linear Microfocus Bremsstrahlung Source Based on Compact Betatron With Light and Heavy Narrow Targets inside / 8th International Conference Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena (Channeling 2018), Ischia (NA), Italy, September 23-28, 2018;

15. **Smolyanskiy, V. A.** «Generation of bremsstrahlung through interaction of 18 MeV electrons with the internal microtarget in a betatron / 31th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC 2019), Deauville, France, July 23-30, 2019.