

МНОГОКАДРОВАЯ ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ТЕНЕВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ МНОГОРАКУРСНОЙ ТОМОГРАФИИ НА БАЗЕ БЕЗЖЕЛЕЗНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ БЕТАТРОНОВ

К.И. Алмазова, А.Н. Белоногов, В.В. Боровков, Е.В. Горелов, И.В. Морозов, В.Д. Селемир, О.А. Шадро

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, просп. Мира, 37
mailbox@ntc.vniief.ru

Введение

Одним из важнейших направлений современного естествознания является исследование внутренней структуры быстропротекающих процессов. Импульсная рентгенография – старейший и в то же время перспективный метод неразрушающей диагностики динамических процессов в непрозрачных средах.

Для исследования в указанной области в ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ уже несколько десятилетий разрабатываются мощные источники ионизирующего излучения, позволяющие проводить радиографирование динамических объектов с большими оптическими толщинами. Источниками такого излучения являются линейные, либо циклические ускорители электронов, в частности, бетатроны [1].

Рентгенограмма представляет собой плоское изображение трехмерного объекта. Поэтому, даже для исследования статического объекта, целесообразно получение снимков не менее чем в двух проекциях. Очевидно, что если речь идет об исследовании динамических процессов, то увеличение плоскостей регистрации существенно повышает объем получаемой информации в каждом эксперименте, что особенно важно при изучении несимметричных объектов.

В связи с этим, специалистами ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ была предложена новая концепция современных многоракурсных рентгенографических комплексов на базе безжелезных импульсных бетатронов [2]. На рисунке 1 представлен один из вариантов 3-х лучевого мобильного рентгенографического комплекса. Каждый бетатрон способен обеспечить до 3 импульсов с интервалом от 0,5 до 20 мкс, что позволяет получить до 9 кадров в одном эксперименте.

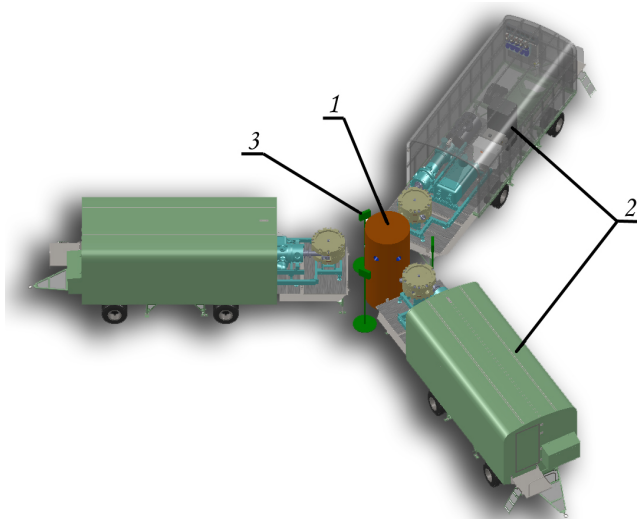


Рисунок 1 – Макет 3-х лучевого мобильного рентгенографического комплекса.

1– взрывозащитная камера, 2– мобильные циклические ускорители, 3– система регистрации теневых изображений.

Неотъемлемой частью любого радиографического комплекса является система регистрации теневых изображений исследуемого объекта. Уже более шестидесяти лет в качестве регистратора применяется рентгеночувствительная пленка. Наряду с ней в настоящее время широко используются запоминающие люминесцентные экраны. Такие регистраторы имеют высокое разрешение, и, в принципе, позволяют обеспечить многокадровую съемку

динамического процесса. Однако сложная внутренняя структура и размеры исследуемого объекта зачастую не позволяют делать несколько кадров на одну и ту же рентгеновскую пленку. Современные электронно-оптические приборы в комбинации с эффективными сцинтилляционными конверторами способны решить вопросы многокадровой регистрации.

Система регистрации тневых изображений для оснащения радиографического комплекса.

В рамках поставленной задачи авторами доклада был изготовлен один канал многокадровой системы регистрации, фотография которого представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Канал многокадровой системы регистрации радиографического комплекса.

1 – цифровая камера, 2 – модуль дистанционного управления диафрагмой и фокусом, 3 – светосильный объектив.

Конструктивно, канал регистрации состоит из стробирующей цифровой камеры (1), модуля дистанционного управления диафрагмой и фокусом (2) и светосильного объектива (3) [3].

Цифровая камера состоит из электронно-оптического преобразователя (ЭОП) и телевизионной ПЗС-камеры отечественного производства. Компоненты соединены между собой посредством оптоволоконной шайбы. ЭОП выполняет функции электронно-оптического затвора и усилителя яркости. В качестве усилителя используется микроканальная пластина (МКП) с возможностью усиления сигнала до 10^3 раз. ПЗС-камера служит для считывания изображения. Размер матрицы ПЗС-камеры – 16.6×18.6 мм, размер пикселя – 16×16 мкм. Цифровая камера полностью управляется ПК посредством оптоволоконного интерфейса и может работать как в триггерном режиме, так и в режиме внутренней синхронизации.

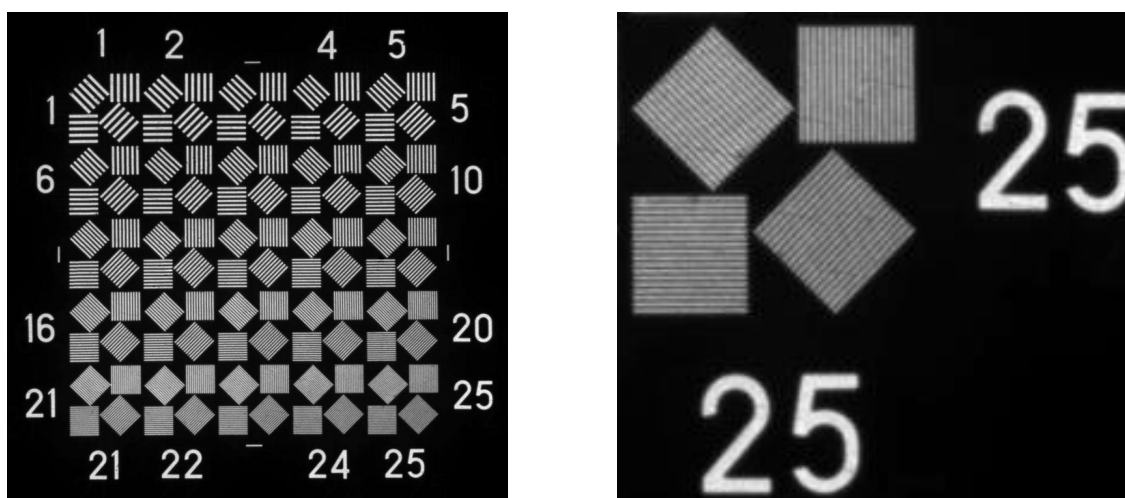
Время экспозиции регистрируемого изображения задается от 100 нс до 5 мкс путем плавной регулировки. Это обеспечивается импульсным помехоустойчивым генератором, разработанным авторами в рамках данной работы. При проектировании генератора из электрической схемы были максимально исключены индуктивные элементы, а также цифровые и аналоговые микросхемы. Была использована схема на дискретных полупроводниковых элементах отечественных и иностранных производителей. Выполнена оптимальная конструктивная компоновка и экранирование электрической схемы. Генератор обеспечивает регулировку усиления МКП и формирования затворного импульса. Управление генератором осуществляется от удаленного пульта по волоконно-оптическим линиям связи с точностью синхронизации до 1 нс, что также обеспечивает бесперебойную работу системы регистрации при измерениях в условиях повышенного уровня электромагнитных наводок.

Основными характеристиками канала регистрации являются:

1. Квантовая эффективность ЭОП – не менее 20%.
2. Спектральная чувствительность от 350 до 650 нм. Максимум чувствительности соответствует спектру излучения используемого сцинтиллятора.
3. Пространственное разрешение по фотокатоду – не менее 25 п.л./мм.

4. Количество пикселей ПЗС-матрицы – $> 10^6$.
5. Динамический диапазон ПЗС-камеры – 14 бит.
6. Диапазон усиления – $\leq 10^3$ раз.
7. Время экспозиции – ≥ 100 нс.
8. Точность срабатывания – ≤ 5 нс.
9. Встроенный высокоскоростной последовательный волоконно-оптический интерфейс для обеспечения синхронизации и управления системой, а также передачи данных в компьютер.

В лабораторных условиях была проведена сборка и настройка электронно-оптического канала регистратора. Исследованы пространственно-временные характеристики системы. С помощью оптической миры № 4 ГОИ, имеющей предельную пространственную частоту 25 пл./мм, было определено, что 25 поле разрешается с контрастом не менее 16 %. Регистрация миры проходила в масштабе 1:1. Изображение миры (а) и, для наглядности, ее увеличенное 25 поле (б) представлены на рисунке 3.



а) Изображение миры № 4 ГОИ.

б) 25 поле миры № 4 ГОИ.

Рисунок 3 – Исследование пространственных характеристик канала регистрации.

Для проверки временных характеристик канала регистрации была применена оптическая система диагностики на базе импульсного лазера. В отличие от методик, основанных на контроле электрического сигнала на фотокатоде ЭОП, данная диагностика позволяет получать корректную визуальную информацию. Длительность импульса зондирующего излучения составляет менее 10 нс. На рисунке 4 представлена характерная динамика работы канала регистрации.

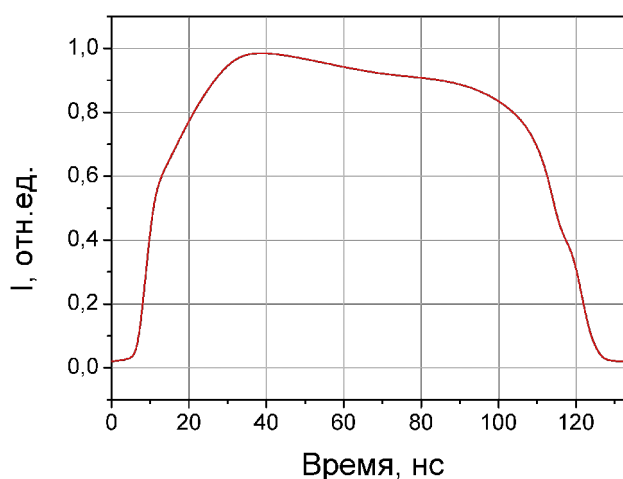
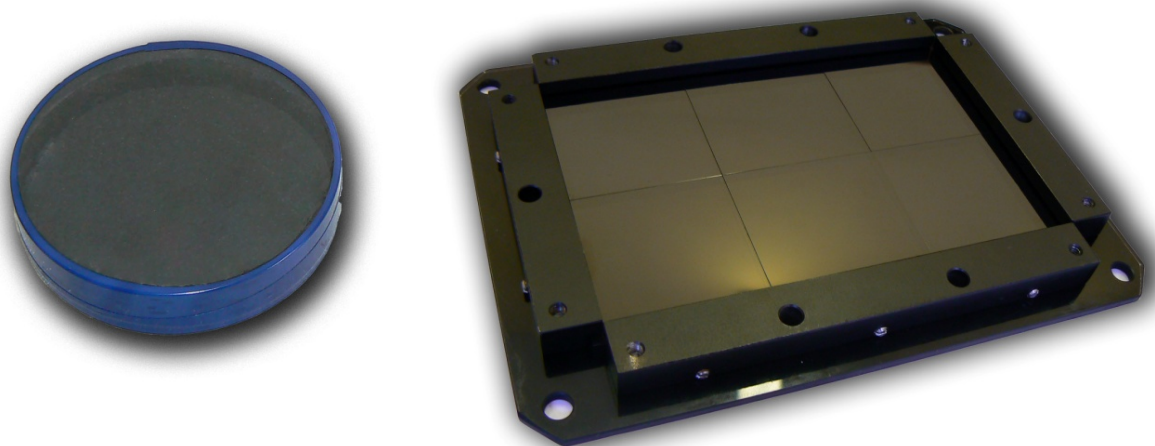


Рисунок 4 – Динамика работы канала регистрации.

Неотъемлемой составляющей любой системы регистрации радиографического комплекса является наличие рентгеночувствительного элемента – детектора. В представленной системе регистрации в качестве детектора выбран сцинтилляционный кристалл LYSO (лютеция–иттрия ортосиликат). Рассматриваемый кристалл имеет высокие эффективный атомный номер ($Z_{эф} > 60$) и плотность ($\rho \sim 7 \text{ г/см}^3$), что позволяет обеспечивать требуемую регистрацию частиц высоких энергий. Световой выход находится в пределах от 27 000 фот./МэВ до 32 000 фот./МэВ, постоянная времени высвечивания не превышает 47 нс. В тоже время кристалл не гигроскопичен, легко обрабатывается по известным технологиям вплоть до толщин 0,3 мм и менее. Отмеченные свойства делают его особенно привлекательным в задачах импульсной радиографии, поскольку с таким кристаллом можно реализовать достаточно высокое временное разрешение, требуемую чувствительность и высокое пространственное разрешение 2-D изображений.

Следует отметить, что максимальный размер заготовок (булей) сцинтиллятора, открыто поставляемых на рынок, составляет в диаметре не более ~ 80 мм. На этапе отработки системы регистрации применялись сцинтилляционные кристаллы диаметром 78 мм и толщиной 10 и 15 мм (рисунок 5а). Для широкоформатной регистрации авторами был разработан и изготовлен матричный конвертор из 6 идентичных сцинтилляционных пластин размерами 50x50x5 мм (рисунок 5б). Фотографии сцинтилляторов представлены на рисунке 5.



а) Монокристалл LYSO $\varnothing 78$ мм.

б) Матричный LYSO конвертор 150×100×5 мм.

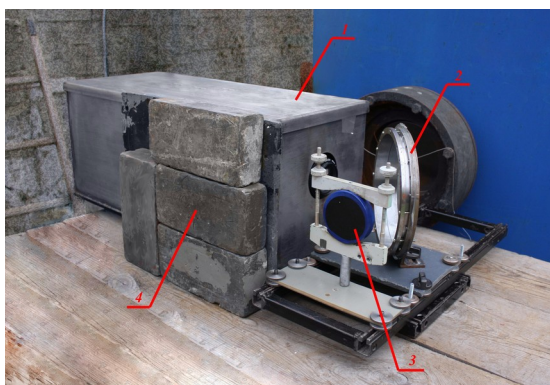
Рисунок 5 – Сцинтилляционные конверторы.

Предварительно, с каналом регистрации была проведена серия лабораторных исследований на экспериментальном стенде. Целью этих опытов являлось сравнение качества изображений, получаемых при использовании разных объективов и сцинтилляционных конверторов, а также решение вопросов повышения помехоустойчивости электронных схем в условиях мощных электромагнитных наводок. Полученные результаты показали, что в условиях низких световых потоков использование более светосильного объектива позволяет повысить коэффициент сбора оптической системы и, тем самым повысить отношение сигнал/шум системы регистрации.

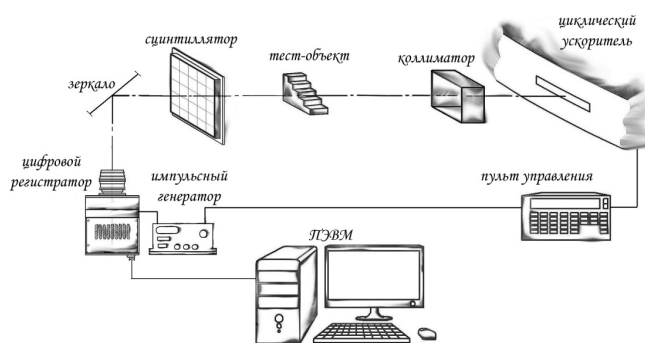
Отработка системы регистрации. Результаты экспериментов.

Осенью 2016 года во время тестовых включений мобильного циклического ускорителя (МЦУ) и настройки импульсных электромагнитных систем быстрого сброса электронного пучка на мишень были проведены первые натурные испытания разработанной системы регистрации на внутреннем полигоне ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ.

Фотография канала регистрации, и структурная схема проведения исследований представлены на рисунке 6.



а) Фотография канала регистрации.

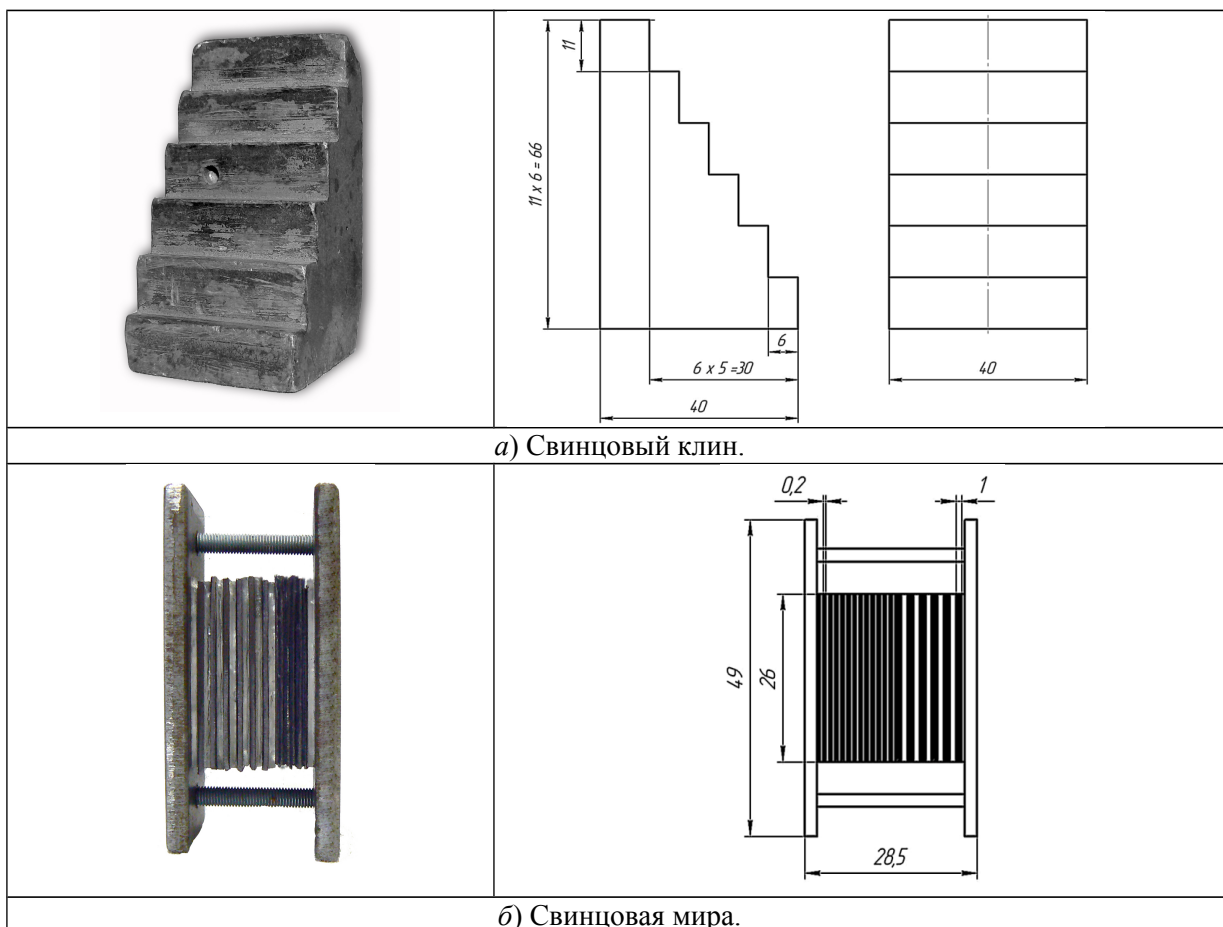


б) Структурная схема проведения исследований.

Рисунок 6 – Концепция проведения исследований.

1 – канал регистрации в экранирующем корпусе, 2 – поворотное зеркало, 3 – сцинтиллятор, 4 – защита от ионизирующего излучения

При проведении исследований граничная энергия электронного пучка, определяемая величиной емкостного накопителя системы импульсного питания электромагнита, составляла $E_{гр} \sim 13$ МэВ. В качестве тестовых объектов использовались ступенчатый свинцовый клин и свинцовая мира. Фотографии и эскизы данных объектов представлены на рисунке 7. Выбранные тест-объекты позволяют получить предельное пространственное разрешение, определить просвечивающую способность, контрастную чувствительность, а также общую работоспособность системы в целом.



а) Свинцовый клин.

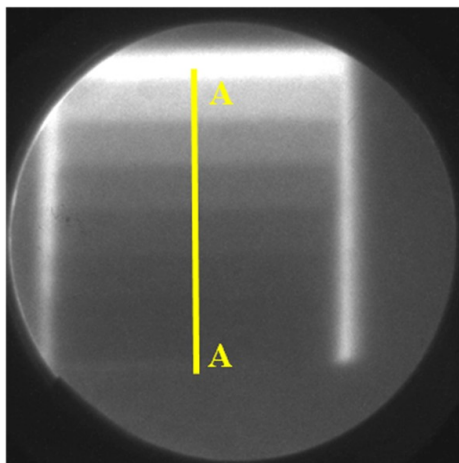
б) Свинцовая мира.

Рисунок 7 – Фотографии и эскизы тест-объектов.

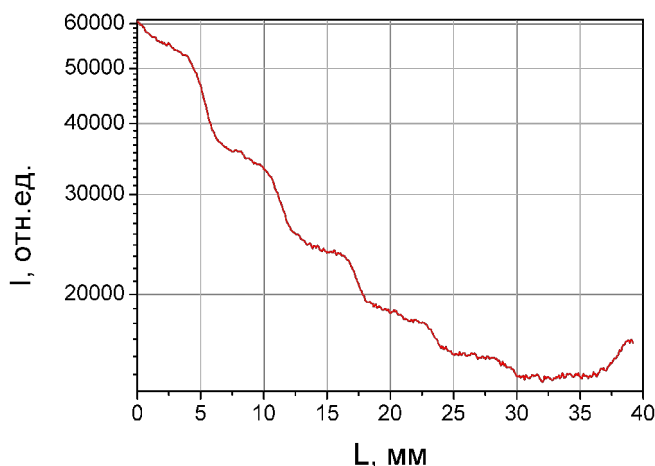
Расстояние от мишени бетатрона до исследуемого тест-объекта – $L_1 \approx 390$ см, от объекта до сцинтиллятора – $L_2 \approx 55$ см. Геометрический фактор $K = 1,14$. Оптический масштаб равен М

= 0,2 (либо 5). При таком геометрическом факторе и масштабе съемки размер пикселя по объекту – 70 мкм.

Для определения предельной просвечивающей способности использовался свинцовый клин, показанный на рисунке 7(а). Для увеличения оптической толщины тест-объекта, перед ним была установлена свинцовая пластина толщиной 20мм. Клин окружен коллиматором из свинцовых кирпичей. На рисунке 8 приведены рентгенограмма и профиль интенсивности сигнала по сечению клина. Использовался сцинтилляционный конвертор LYSO Ø78 мм.



а) Рентгенограмма свинцового клина.

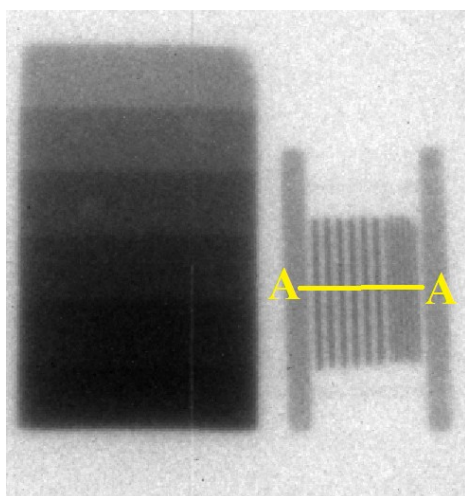


б) Профиль интенсивности сигнала по его сечению А-А.

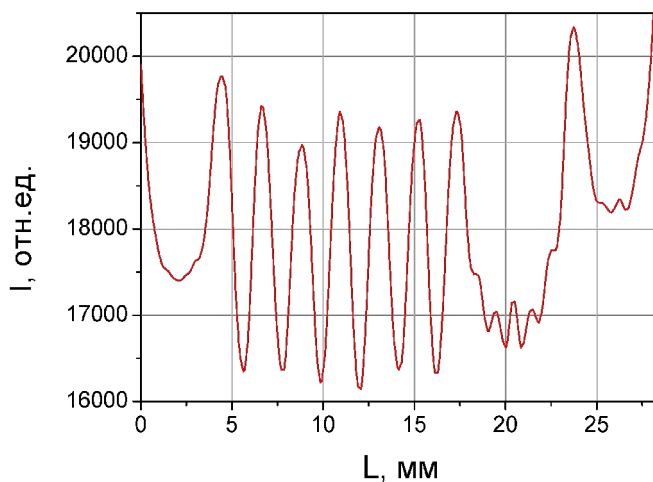
Рисунок 8 – Результаты обработки рентгенограммы свинцового клина.

При построении профиля интенсивности А-А выделялись ступеньки с 1-ой по 6-ую. Пятая ступенька относительно шестой разрешается с контрастом 4 %. Толщина (вдоль пучка) 5-ой ступеньки составляла 55 мм, 6-ой – 66 мм. Таким образом, с данными параметрами мобильного комплекса при использовании предложенного цифрового регистратора, просвечено – 75мм. свинца с контрастом 4 %.

Для проведения оценки разрешающей способности радиографического комплекса совместно с каналом регистрации было проведено исследование свинцовой миры, фотография которой представлена на рисунке 7(б). Регистрация проводилась при использовании матричного сцинтилляционного LYSO конвертора 150×100×5 мм. Рентгенограмма свинцовой миры и профиль интенсивности сигнала приведены на рисунке 9.



а) Рентгенограмма свинцовой миры.



б) Профиль интенсивности сигнала по сечению А-А.

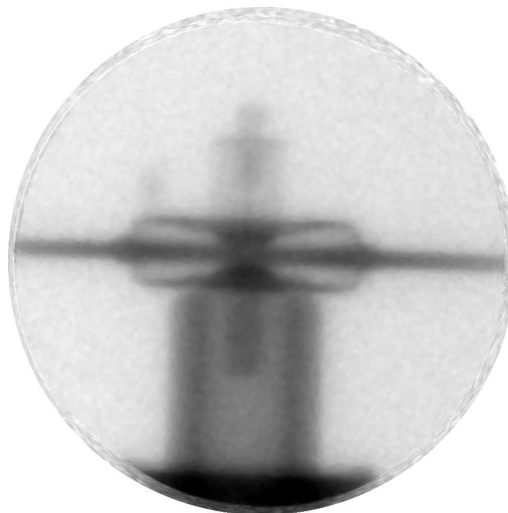
Рисунок 9 – Результаты обработки рентгенограммы свинцовой миры.

Анализируя профиль сечения А-А видно, что область миры с пространственной частотой 0,5 пл./мм. разрешается с контрастом 8,5 %, а область с более мелкой пространственной частотой (2,5 пл./мм.) практически не видна.

Наряду с регистрацией изображений эталонных тест-объектов, позволяющих оценить возможности комплекса и канала регистрации, получены изображения демонстрационного объекта, в качестве которого был выбран разрядник РУ-62. На рисунке 10 приведена его фотография и рентгенограмма.



а) Фотография разрядника РУ 62.



б) Рентгенограмма разрядника РУ 62.

Рисунок 10 – Регистрация разрядника РУ 62.

Из приведенных рентгенограмм и графиков видно, что границы перехода толщин имеют размытие. Наиболее простое объяснение этому – не точная юстировка объектов по пучку. Еще одной вероятной причиной может быть влияние рассеянного излучения. В дополнение к этому стоит упомянуть, что установленная в бетатроне мишень была не оптимальных геометрических размеров (6×6 мм) и тем самым способствовала дополнительному размытию полученных рентгенограмм.

В целом результаты тестовых экспериментов следует считать положительными. Разработанный канал регистрации показал свою работоспособность и может послужить основой при создании многокадровой системы регистрации для многоракурсной рентгенографии. Предложенный канал регистрации многокадровой системы регистрации позволяет проводить съемку в многоракурсном и многокадровом режиме динамических объектов. При использовании предложенного цифрового регистратора просвечено 75 мм свинца с контрастом 4 % на расстоянии 3,9 м. Результаты опытов показали неплохое соответствие с полученными ранее изображениями на рентгенографической пленке.

Заключение

Многоракурсная рентгенография предполагает использование многокадровой системы регистрации. В рамках этой задачи авторами разработан канал регистрации на базе цифровой камеры и сцинтилляционного детектора. Данный канал прошел предварительную отработку на экспериментальном стенде и использовался при исследовании принципиальных возможностей мобильного рентгенографического комплекса на внутреннем полигоне ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. Для оценки предельного пространственного разрешения, просвечиваемой способности, контрастной чувствительности использовались статические свинцовые тест-объекты.

При использовании предложенного цифрового канала регистрации просвечено – 75 мм свинца с контрастом 4 %. Объект располагался на расстоянии 3,9 м, граничная энергия электронного пучка составляла $E_{гр}$ – 13 МэВ. Результаты опытов показали неплохое соответствие с полученными ранее изображениями на рентгенографической пленке.

В целом, результаты тестовых экспериментов по исследованию оптически-плотных объектов следует считать положительными. Предложенный цифровой канал регистрации

показал свою работоспособность и может послужить основой при создании многокадровой системы регистрации для многоакурсной рентгенографии.

Список литературы.

1. А.Л. Михайлов «Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов» г. Саров 2015, стр.113-114.
2. К.В. Савченко, Ю.П. Куропаткин, О.А Шамро. «Перспективные рентгенографические комплексы на базе безжелезных импульсных бетатронов». Сборник научных трудов восьмой международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» [Электронный ресурс] г. Томск 2016 стр. 54.
3. Алмазова К.И., Белоногов А.Н., Боровков В.В., Волков А.А. Патент на полезную модель РФ 106819 // БИ. 2011. №20.