

Краткое изложение содержания работы.

В 2021 году запущена первая очередь не имеющего мировых аналогов рентгенографического комплекса, предназначенного для получения трехмерных экспериментальных рентгенографических изображений с целью изучения быстропротекающих процессов, проходящих в тяжелых объектах с высоким атомным номером. Источником гамма-квантов является линейный индукционный ускоритель ЛИУ-20, который по совокупным параметрам и качеству электронного пучка превосходит аналогичные ускорители зарубежных ядерных центров США, Франции, Китая. На момент разработки комплекса в мире не существовало систем регистрации рентгенографических изображений, позволяющих в полной мере использовать возможности ускорителя ЛИУ-20. Поэтому была поставлена задача разработать и создать многоканальный высокоэффективный детектор, параметры которого оптимизированы для работы в составе комплекса. Для обоснования технических требований к детектору были проведены расчетно-теоретические исследования планируемых к решению задач. Предложенная уникальная концепция построения детектора полностью выполняет поставленные требования. Общий вид ЛИУ-20 и детектора представлен на Рисунке 1.



ЛИУ-20



Детектор

Рисунок 1 - Общий вид ЛИУ-20 и детектора

Детектор состоит из многоэлементного экрана на основе 16384 тяжелых сцинтилляционных кристаллов ортогерманата висмута (ОГВ), волоконной оптики, линеек кремниевых фотодиодов, электроники, комплекса компьютерного оборудования и программного обеспечения для сбора, хранения и архивации

данных. Разработанные уникальные методики обработки данных и калибровки элементов детектирующей станции кардинально улучшили качество получаемых рентгенографических изображений. Рекордные параметры детектора подтверждены успешными статическими и динамическими экспериментами.

Основная научно-техническая идея.

При рентгенографии объектов с высоким атомным номером и большой толщиной в качестве детектора гамма-квантов широко используются тяжелые сцинтилляционные кристаллы так как необходимо обеспечить регистрацию жестких гамма-квантов с энергией 2 – 6 МэВ с высокой эффективностью. Из более 10 типов сцинтилляционных кристаллов требованиям поставленной задачи удовлетворяют только кристаллы ортогерманата висмута со структурой эвлетина ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) (ОГВ, международное обозначение BGO) и кристаллы со структурой ортосиликатов на основе лютеция. Последние кристаллы имеют в 3 раза больший световыход и в 7 раз более короткий сигнал, чем ОГВ. Однако они не производятся в России и имеют в несколько раз большую стоимость. В конце XX века по инициативе ИЯФ СО РАН в результате выполнения совместной программы Академии Наук и Министерства Цветной Металлургии была разработана инновационная отечественная технология выращивания кристаллов ОГВ и организовано их массовое производство. Поэтому было принято решение использовать кристаллы ОГВ несмотря на многократно увеличивающиеся технические трудности при решении поставленной задачи.

Ключевым техническим решением является предложенный и реализованный впервые в мире метод косвенного сбора света с тяжелых сцинтилляционных кристаллов при помощи спектросмещающих волокон. Он позволил вывести фотоприемники и электронику из-под воздействия ионизирующего излучения, что резко снизило негативное влияние шумов из-за взаимодействия излучения в веществе фотоприемников и увеличило срок службы электроники. Важным результатом применения данного метода является уменьшение размера разрешающего элемента (РЭ) для обеспечения требуемого координатного разрешения. Также он упростил создание эффективной и надежной системы термостабилизации матрицы кристаллов.

Принципиальная схема РЭ приведена на Рисунке 2. При взаимодействии гамма-квантов в сцинтилляторе выделяется свет, количество которого пропорционально поглощенной в кристалле энергии. Спектрсмещающее волокно (ССВ) поглощает проходящий через него выделившийся в сцинтилляторе свет, и изотропно переизлучает его на большей длине волны. Из-за малой длины собственного поглощения ССВ, для передачи света на фотоприемники используется переход на прозрачное оптическое волокно.

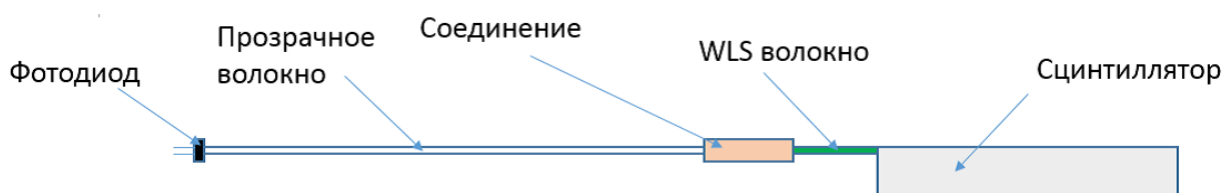


Рисунок 2 - Принципиальная схема РЭ

Такой метод съема сигналов широко используется в физике элементарных частиц для детекторов на основе органических сцинтилляторов. Однако, органические сцинтилляторы близки по оптическим и механическим свойствам к ССВ в то время как неорганические значительно отличаются. Коэффициент преломления ОГВ составляет 2,15, а ССВ имеют показатель преломления около 1,6. Коэффициент температурного расширения ОГВ составляет $7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ при $7,8 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ у ССВ. Также они значительно различаются по адгезии клеев, технологиям механической обработки и другим свойствам. Тщательная проработка технологий позволила решить эти проблемы. Задача совместного использования тяжелых сцинтилляционных кристаллов и ССВ решена впервые в мире. В качестве ССВ было выбрано волокно O2 производства японской фирмы Kuragau. Однако в связи нарастающими проблемами с закупкой в Японии в ходе выполнения работы была разработана и внедрена в промышленности инновационная отечественная технология производства ССВ. Разработанная конструкция модулей кристаллов обеспечила пренебрежимо малое количество пассивного вещества между модулями, равномерное расположение РЭ в двух координатах и требуемую точность их позиционирования лучше 0,2 мм. Составные части многоэлементного экрана представлены на Рисунке 3.

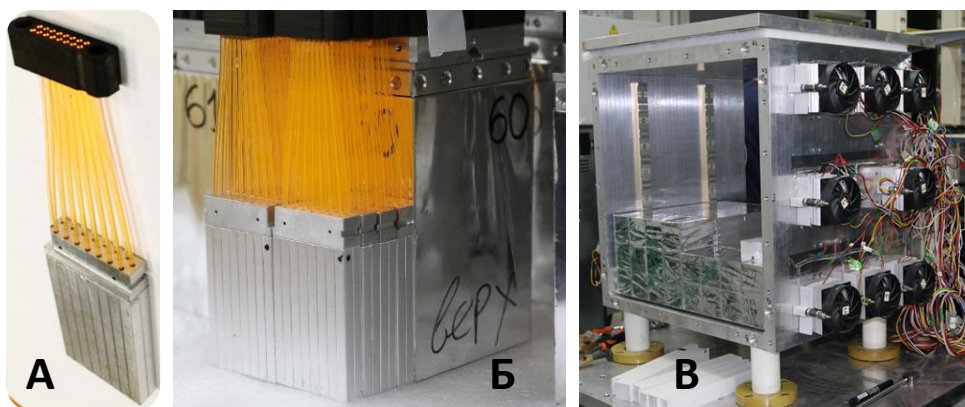


Рисунок 3 – Составные части многоэлементного экрана. А: блок из 16 кристаллов, Б: модуль из 16 блоков, В: модули, составляющие экран.

В связи с отсутствием в мире фотоприемников с требуемыми параметрами, была разработана инновационная технология производства специализированных отечественных фотоприемников. Изготовленные по ней линейки из 16 фотодиодов оптимизированы для данного применения. Для увеличения эффективности передачи света из оптического волокна в чувствительную область фотоприемников было принято решение отказаться от традиционно используемого защитного покрытия из компаунда толщиной несколько десятых долей миллиметра. В результате над кремнием осталось только технологическое покрытие из оксида кремния толщиной десятые доли микрона. Так как толщина покрытия близка к длине волны света, то оно было использовано в качестве просветляющего. Был выполнен расчет оптимальной толщины покрытия с учетом углового распределения выходящего из оптического волокна света. В результате было достигнуто увеличение эффективности регистрации светового сигнала на 15 % по сравнению с толстым покрытием компаундом. Стандартные оптические соединения также не могли быть использованы для решения поставленных задач, поэтому разработаны многоканальные малогабаритные оптические разъемы.

При создании электроники использовались уникальные разработки ИЯФ СО РАН. Для решения противоречивой задачи обеспечения одновременно и малых шумов, и высокого быстродействия была использована структура усилителя с интегрированием заряда и последующим восстановлением формы сигналов. Выполнение требования на величину динамического диапазона основывается на техническом решении с использованием нескольких диапазонов

усиления. Используемый передовой метод непрерывной оцифровки сигналов позволил обеспечить регистрацию 3 кадров и использовать математическую обработку сигналов. При проведении динамических экспериментов распределение плотности исследуемого объекта изменяется во времени. Это приводит к резкому изменению величин сигналов на последовательных кадрах. Поэтому в электронику заложена возможность загружать в усилители индивидуальные для каждого кадра значения коэффициентов усиления. Загрузка происходит между импульсами рентгеновского излучения. Как видно из Рисунка 4, связанный с изменением коэффициентов усиления переходной процесс длится менее 1 мкс и не влияет на качество регистрации изображений, так как минимальный интервал между кадрами составляет 2 мкс.

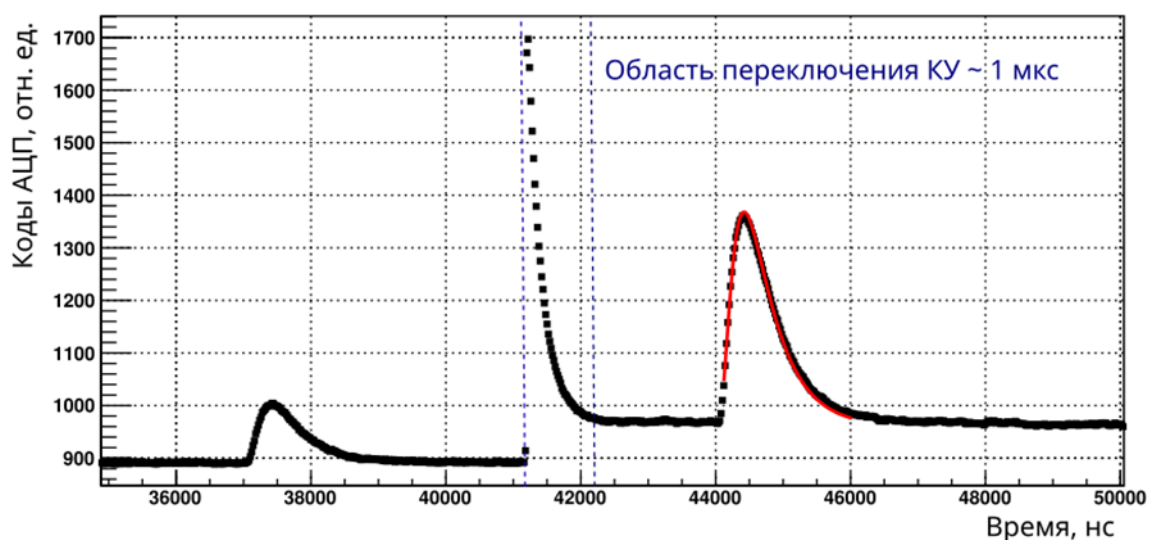


Рисунок 4 – Пример регистрации 2 импульсов гамма-излучения с переключением величин коэффициентов усиления между ними

Созданные оригинальные алгоритмы обработки данных улучшили соотношение сигнал/шум в 2 раза и увеличили эффективный динамический диапазон регистрации в 3 раза. При подготовке и проведении эксперимента создаётся порядка миллиона осциллограмм. Поэтому были оптимизированы алгоритмы и организована фоновая обработка данных, обеспечившие режим работы, близкий к режиму реального времени. Результат обработки данных иллюстрируется на Рисунке 5.

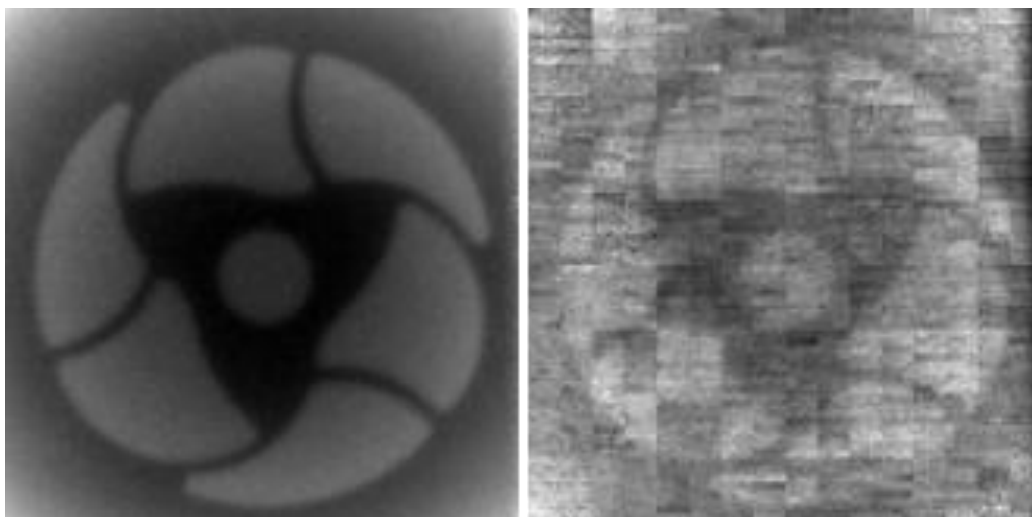


Рисунок 5.1 – Рентгенографическое изображение объекта «Росатом» после обработки (слева) и до (справа)



Рисунок 5.2 – фотография объекта «Росатом»

Тщательная оптимизация всех компонентов детектирующей станции обеспечила низкий уровень собственных шумов, при котором энергетическое разрешение определяется статистикой гамма-квантов и флуктуациями энергосвечения в кристаллах, что было доказано экспериментально при просвечивании поглотителей с большой оптической толщиной, как показано на Рисунке 6. Таким образом, с использованием отечественных сцинтилляционных кристаллов и фотоприемников, а также уникальной электроники собственной разработки, создан многоканальный детектор с предельно достижимой эффективностью. Основные технические решения запатентованы.

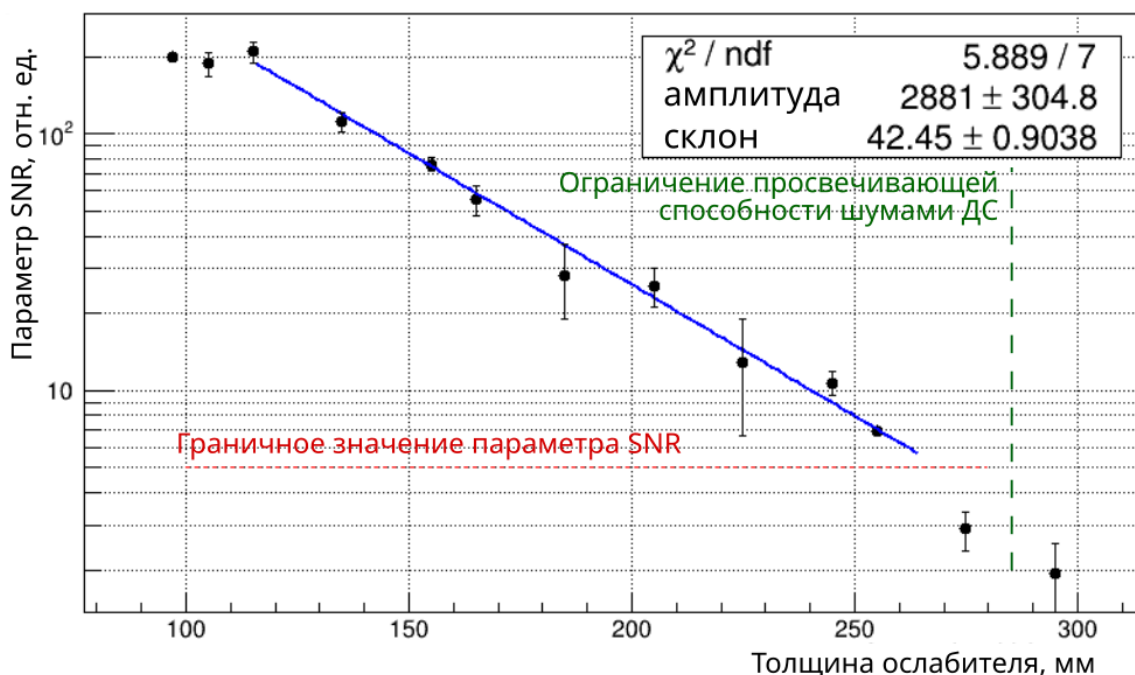


Рисунок 6 – Зависимость параметра SNR от толщины ослабления пучка, аппроксимированная экспоненциальной функцией. Красной прерывистой линией показано граничное значение параметра SNR, равное 5, при котором возможна регистрация сигнала. Показанное зеленым пунктиром влияние собственных шумов ДС не влияет на просвечивающую способность

Описание результатов и их значение для практики.

В ходе эксплуатации детектора продемонстрированы высочайшие технические характеристики. Достигнутые величины динамического диапазона и предельного разрешения соответствуют параметрам лучшего в физике высоких энергий кристаллического калориметра детектора CMS, работающего на большом адронном коллайдере (ЦЕРН), и являются рекордными для кристаллических детекторов гамма-квантов. Измеренная просвечивающая способность составляет не менее 260 мм свинца. Таким образом, детектор по эффективности на несколько порядков превышает все существующие в мире системы регистрации рентгенографических изображений и позволяет изучать тяжелые объекты, недоступные для исследования при использовании традиционных детекторов, что уверенно подтвердили проведенные газодинамические опыты. Как видно на Рисунке 7, даже при большем ослаблении полученное с детектора изображение

существенно контрастней и значительно меньше зашумлено по сравнению с полученным при помощи стандартного детектора ФЭЗ изображением.

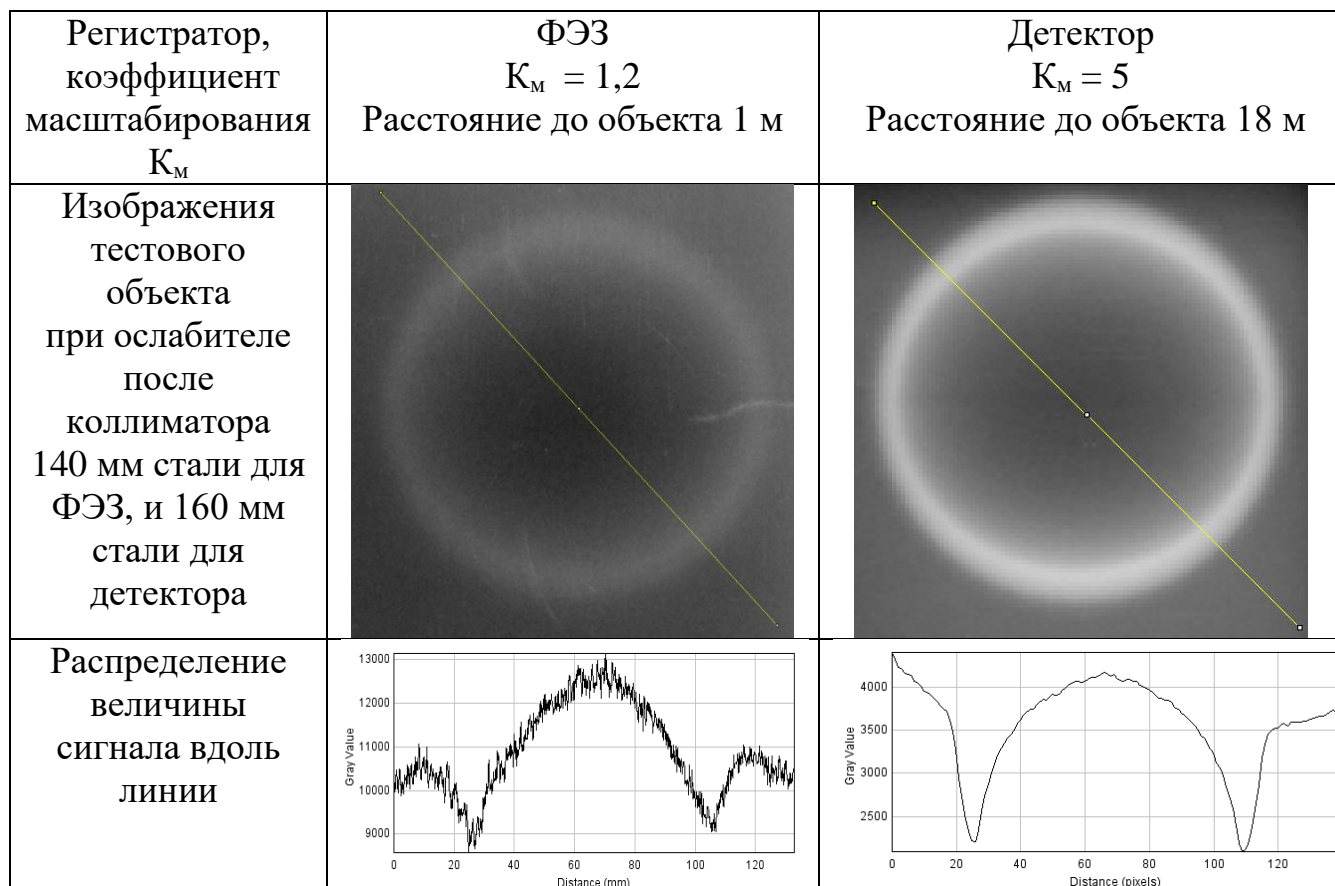


Рисунок 7 – Рентгенограммы объекта с ФЭЗ и детектора

Объемы внедрения.

Детектор введен в эксплуатацию, что подтверждается актом приемочных испытаний. В течении нескольких лет с ним проводятся газодинамические опыты.

Достигнутый экономический и (или) социальный эффект от внедрения.

Создан не имеющий мировых аналогов уникальный инструмент для проведения рентгенографических экспериментов на высокотехнологичных научных установках. Он позволяет выйти на новый уровень понимания физики быстропротекающих процессов, изучения развития ударных и детонационных волн, сложных газодинамических течений и разрабатывать новые физико-математические модели, в том числе и в интересах национальной безопасности. Изготовленные по разработанным инновационным отечественным технологиям фотоприемники используются при производстве досмотровой техники для

контроля таможенных грузов и багажа, промышленных компьютерных томографов и аппаратуры контроля окружающей среды, а спектросмещающее волокно успешно применяется при создании новых рентгенографических детекторов и систем диагностики пучков заряженных частиц.

Другим важнейшим социальным эффектом является подготовка высококвалифицированных научно-технических кадров. Выполнение данной работы является результатом синергии созданных школ в ИЯФ СО РАН по регистрации жестких гамма-квантов при помощи тяжелых сцинтилляторов и в РФЯЦ-ВНИИТФ по исследованию быстропротекающих процессов в высокоплотных объектах при помощи импульсной рентгенографии. В рамках разработки детектора была сформирована команда, объединившая ученых и инженеров, как опытных, так и начинающих свой творческий путь. При выполнении представленной работы большое количество молодых специалистов прошло обучение самым передовым методикам. В результате было защищено более 20 студенческих выпускных работ и 1 диссертация на соискание ученой степени кандидата физики-математических наук. Также данная работа была темой исследований 5 аспирантов.