

МИШЕНЬ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ ЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЛУ-8-2

BREMSSTRAHLUNG TARGET FOR A TOMOGRAPHIC COMPLEX BASED ON THE LINEAR RESONANCE ELECTRON ACCELERATOR LU-8-2

*Н. Н. Куратов, О. В. Забелин, Е. Н. Логинова, С. А. Путевской, И. С. Селин,
А. В. Тельнов, Э. А. Шаравин, И. В. Шориков*

*N. N. Kuratov, O. V. Zabelin, E. N. Loginova, S. A. Putevskoj, I. S. Selin,
A. V. Telnov, Eh. A. Sharavin, I. V. Shorikov*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Наиболее универсальным и информативным методом неразрушающего контроля сложных изделий является компьютерная томография, которая позволяет произвести контроль состояния деталей и их расположения внутри изделий без разборки, а также бесконтактно выявить внутренние и внешние дефекты в деталях сложной формы. В последние годы на ускорителе ЛУ-8-2 проведены радиографические эксперименты показывающие возможность его применения в качестве источника излучения для неразрушающего томографического контроля. Основываясь на полученных экспериментальных результатах работы ускорителя ЛУ-8-2 в радиографическом режиме, была рассчитана и спроектирована мишень тормозного излучения для получения трехмерного томографического изображения объектов с большими массовыми толщинами.

Введение

Основными задачами создания современного высокотехнологичного оборудования является повышение технических характеристик этого оборудования, таких как срок службы, надежность изделий, безопасность и др. Решение этих задач связано с постоянным усложнением конструкции деталей и изделий, с применением новых материалов и ростом эксплуатационных нагрузок (рабочих температур, скоростей, давлений и т. д.). В этой связи, существенно возрастает актуальность и востребованность методов неразрушающего контроля.

Неразрушающий контроль позволяет выявить глубоко скрытые, трудно определяемые дефекты и отклонения в материалах и конструкциях изделий, обладает большой точностью и надежностью. Кроме того, неразрушающий контроль позволяет существенно снизить количество дорогостоящих проверок состояния изделия. Во многих случаях он является единственно доступным и безопасным методом контроля. Поэтому развитие методов неразрушающего контроля на данный момент приобретает особую важность.

В настоящее время наиболее широко применяются акустический (ультразвуковой), радиографический, магнитный, акустико-эмиссионный и капиллярный методы неразрушающего контроля.

Наиболее универсальным и информативным методом неразрушающего контроля сложных изделий является рентгеновская компьютерная томография, которая позволяет произвести контроль состояния деталей и их расположения внутри изделий без разборки, а также бесконтактно выявить внутренние и внешние дефекты в деталях сложной формы.

Компьютерная томография (КТ) – технология неразрушающего сканирования, которая позволяет визуализировать и исследовать внешнюю и внутреннюю структуру объекта в трехмерном пространстве. Принцип работы основан на регистрации до нескольких тысяч проекций цифровой радиографии при 360-градусном повороте объекта. Затем с помощью разработанных алгоритмов «восстанавливаются» отдельные двумерные сечения в трехмерном объеме объекта, что позволяет визуализировать детали внутренней структуры в виде 3D-модели этого объекта.

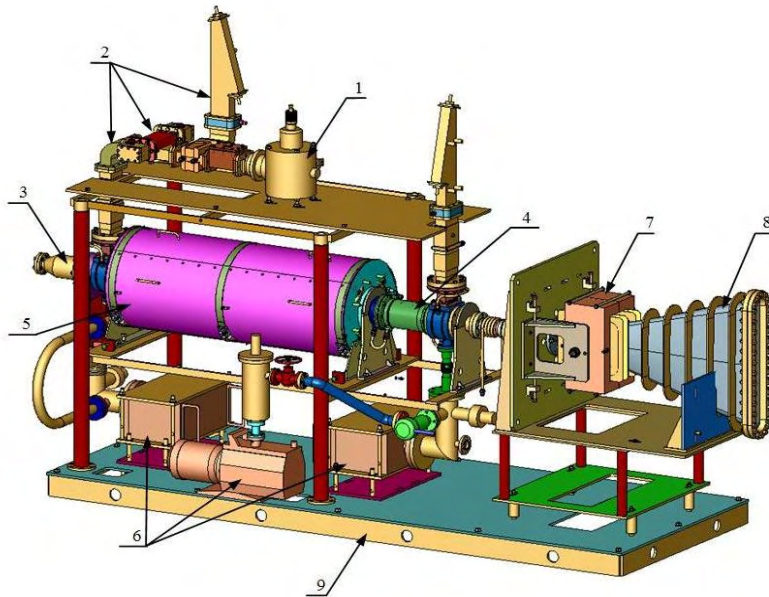


Рис. 1. Трехмерная модель излучающего модуля ускорителя электронов ЛУ-8-2: 1 – магнетрон МИ-456АМ; 2 – узлы СВЧ тракта; 3 – инжектор электронов; 4 – ускоряющая структура; 5 – магнитная система (соленоид); 6 – система вакуумирования; 7 – магнит развертки пучка; 8 – раструб; 9 – несущая платформа

КТ практически исключает ошибки интерпретации и дает такие возможности, которые недоступны ни с какой другой технологией.

Необходимыми компонентами томографического комплекса являются источник тормозного излучения с необходимыми параметрами, система позиционирования объекта и высокопроизводительный вычислительный комплекс, служащий для анализа рентгеновских изображений и реконструкции 3D-модели исследуемого объекта.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-8-2 [1], способный осуществлять непрерывную генерацию тормозного излучения (ТИ) в круглосуточном режиме. В последние годы на ускорителе ЛУ-8-2 проведены радиографические эксперименты, показывающие возможность его применения в качестве источника излучения для неразрушающего контроля. А достаточно высокая средняя мощность электронного пучка при энергии в 8 МэВ дает возможность создать высокопроизводительный томографический комплекс для проверки внутренней структуры крупногабаритных объектов с большими массовыми толщинами.

1. Описание линейного резонансного ускорителя электронов ЛУ-8-2

Важнейшей частью, разработанного в ИЯРФ линейного резонансного ускорителя электронов ЛУ-8-2, является излучающий модуль. На рис. 1 представлена трехмерная модель излучающего

модуля ускорителя ЛУ-8-2 с указанием основных узлов и систем.

Конструкция ускорителя ЛУ-8-2 имеет модульную структуру, облегчающую погрузку на транспортное средство для доставки к месту назначения. В конструкцию были заложены возможности регулировки амплитудно-временных характеристик ускоренного пучка электронов в широком диапазоне, а также их высокая повторяемость. Ускоряющая структура ЛУ-8-2 создана на основе круглого диафрагмированного волновода с СВЧ питанием от магнетрона МИ-456АМ. Экспериментально измеренная средняя энергия ускоренных электронов ЛУ-8-2 составила $8 \pm 0,5$ МэВ при средней мощности пучка – 1,5 кВт.

2. Демонстрация радиографического режима работы

На ускорителе ЛУ-8-2 проведены радиографические эксперименты, показывающие возможность применения ускорителя в качестве источника излучения для неразрушающего контроля объектов большой массовой толщины [2]. Для изучения возможности применения ускорителя ЛУ-8-2 в качестве источника излучения для томографического комплекса были получены 36 проекций объекта исследования (шестеренчатый редуктор) с шагом 5° . На рис. 2 показаны объект исследования, рентгенограммы объекта для 0° , 45° , 90° , 135° и 180° и результат восстановления 3D модели объекта по 36 проекциям. Реконструкция

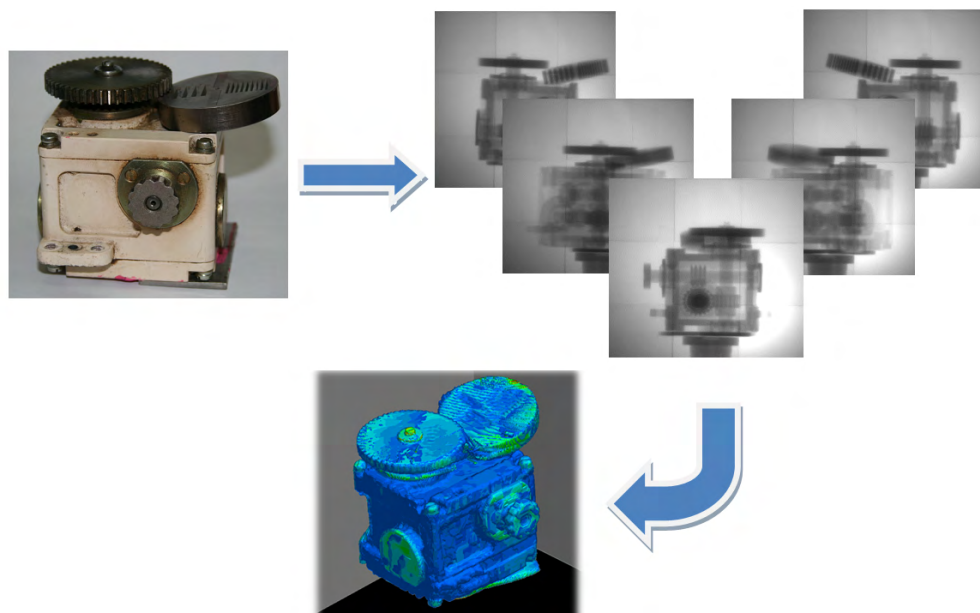


Рис. 2. Процесс реконструкции 3D-модели исследуемого объекта

выполнялась по программе DIA [3], основанной на итерационном алгоритме последовательных приближений, в котором в качестве меры близости изображений используется квадратичная невязка.

3. Расчеты и обоснование конструкции мишени ТИ

Мишень ТИ служит для формирования равномерного поля облучения на расстоянии один метр от мишени и является одним из ключевых узлов источника тормозного излучения для томографического комплекса. Основной характеристикой мишени ТИ является размер фокусного пятна источника квантов ТИ. Размытие границ изображений деталей происходит из-за влияния размеров фокусного пятна источника квантов, геометрической нерезкости проецирования, рассеяния энергии в детектирующем слое и конечных размеров оцифровывающего устройства.

Основной задачей мишени тормозного излучения является конвертация пучка ускоренных электронов в кванты тормозного излучения. При этом в мишени возникает ТИ с широким спектром энергий от очень мягких квантов до квантов, обладающих энергией, равной максимальной энергии электронов. Интенсивность тормозного излучения при взаимодействии пучка электронов с мишенью зависит от четырех основных факторов: тока электронов, их энергии, материала мишени и ее толщины.

При выборе материала для конвертера мишенного узла, была принята во внимание не толь-

ко интенсивность тормозного излучения, которая возрастает квадратично с увеличением заряда ядер вещества, но также доступность материала и его физические свойства, главным из которых является температура плавления. Большая часть энергии электронов при взаимодействии с конвертером превращается в тепло. Целесообразно из материалов с высоким атомным номером Z в качестве материала конвертера выбрать вольфрам ($Z = 74$), температура плавления которого составляет 3653 К.

Для модели мишенного узла ускорителя ЛУ-8-2 выполнен стационарный тепловой расчет [4]. Мощность излучения, подводимая к вольфрамовому конвертеру, в расчете была равна 1,5 кВт, что соответствует параметрам электронного пучка ускорителя ЛУ-8-2. На рис. 3 и в табл. 1 представлены результаты численного расчета устойчивого теплового режима, из которого следует, что максимальная температура вольфрамового конвертера не превышает температуру плавления и имеет хороший коэффициент запаса по температуре.

Таблица 1
Максимальный расчетный нагрев в вольфрамовом конвертере

Температура в теоретической модели		
Максимальная расчетная температура, К	Температура плавления материала, К	Коэффициент запаса по температуре, $T_{пл}/T_{max}$
1190 К	3653 К	3,07

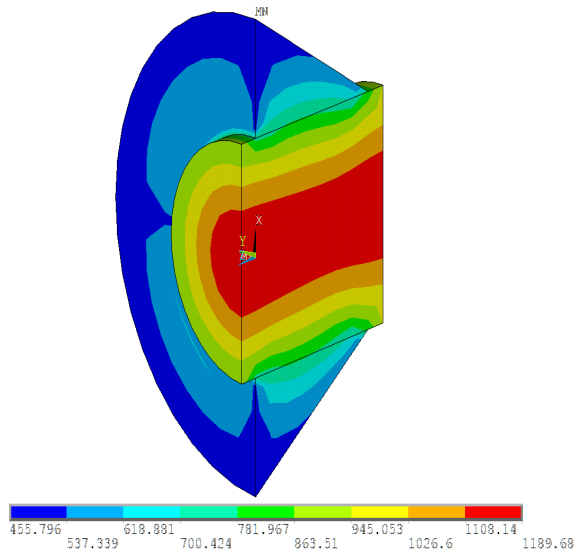


Рис. 3. Распределение температуры (К) в вольфрамовом конвертере

При определении толщины конвертера мишенного узла следует учитывать два конкурирующих фактора: во-первых, чем толще мишень, тем большая доля кинетической энергии электронов преобразуется в энергию тормозного излучения; во-вторых, при увеличении толщины начинает сказываться поглощение тормозного излучения в материале мишени.

Для выбора толщины конвертера мишенного узла произведен расчет методом Монте-Карло [5] количества квантов ТИ падающих на поверхность перпендикулярную оси мишенного узла, находящуюся на расстоянии один метр от конвертера. Результаты расчета, нормированные на один электрон, приведены в табл. 2. Максимальный пробег электронов с энергией 8 МэВ в вольфраме $\approx 3,5$ мм. Это означает, что некоторое количество электронов будет пролетать через конвертер, не передав ему всю свою энергию.

Таблица 2

Кванты ТИ падающие на поверхность на расстоянии один метр от конвертера

Толщина вольфрамового конвертера, мм	Количество квантов ТИ, штук	Средняя энергия квантов ТИ, МэВ
1,5	5,26E-02	1,56

Выходной коллиматор мишенного узла использован для формирования поля облучения с требуемыми характеристиками. Угол раствора выходного коллиматора мишенного узла выбран равным 20° . Такой угол обеспечивает на расстоя-

нии один метр от конвертера мишенного узла область облучения диаметром 350 мм. Длина выходного коллиматора выбрана равной 200 мм, так как медь такой толщины обеспечивает ослабление тормозного излучения со средней энергией 1,5 МэВ более чем в 1000 раз. Этого достаточно для создания требуемого размера поля облучения на исследуемом объекте и ослабления фонового излучения мишени.

Фильтр, стоящий на выходе коллиматора, выбран в форме конуса выполненного из алюминия. Алюминий достаточно эффективно поглощает электроны, прошедшие через вольфрамовый конвертер, при этом длина свободного пробега для квантов ТИ со средней энергией 1,5 МэВ в алюминии составляет порядка 6 см. Центральная ось конуса совмещена с осью мишени. Такой фильтр поглощает и рассеивает часть квантов ТИ вылетающих по оси мишенного узла, тем самым выравнивает дозу по поверхности на расстоянии один метр от конвертера.

На основании расчетов был выбран вариант мишенного узла с коническим алюминиевым фильтром, с толщиной 40 мм при вершине конуса. На рис. 4 представлено распределение квантов ТИ по поверхности на расстоянии один метр от мишени при толщине фильтра 40 мм. Фильтр с такой толщиной при вершине конуса обеспечивает достаточно эффективное выравнивание дозы по поверхности при наименьших потерях количества квантов ТИ.

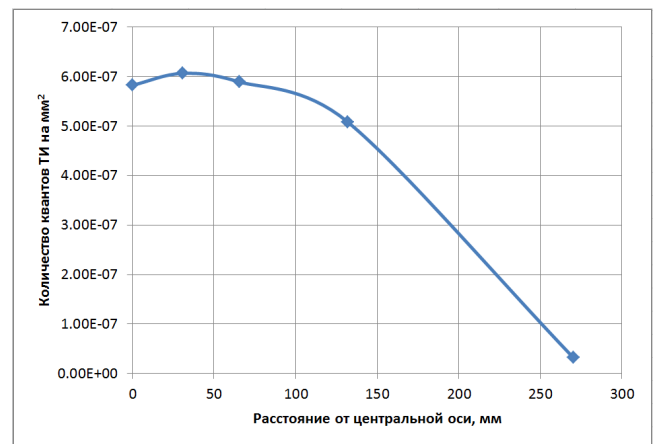


Рис. 4. Расчетное распределение квантов ТИ по поверхности при толщине фильтра 40 мм

Также в результате расчета получен спектр квантов тормозного излучения (рис. 5 и 6) проходящих через поверхность, расположенную перпендикулярно оси мишени и находящуюся на расстоянии один метр от мишени тормозного излучения.

Спектры, приведенные на рис. 5–6, показывают нам, кванты ТИ каких энергий и в каком количестве проходят через поверхность на расстоянии один метр от мишени тормозного излучения.

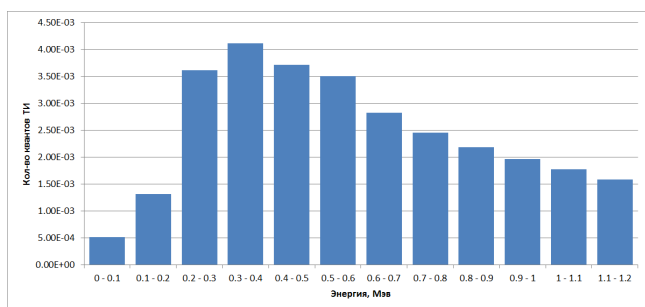


Рис. 5. Расчетный спектр квантов ТИ в диапазоне энергий от 0 до 1.2 МэВ

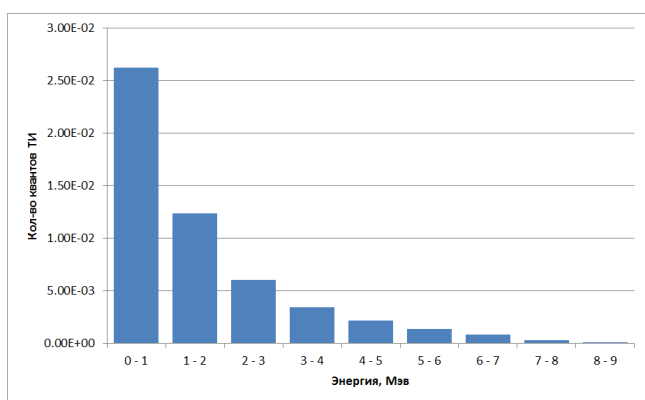


Рис. 6. Расчетный спектр квантов ТИ в диапазоне энергий от 0 до 9 МэВ

В программе С-007 [5] был проведен расчет распределения поглощенной дозы в кремнии на расстоянии один метр от мишени ТИ ускорителя ЛУ-8-2. При выходном коллиматоре с углом вершины конуса 20° ТИ на одном метре от мишени образует пятно диаметром ~ 300 мм со спадом 26 % от максимума поглощенной дозы. Расчетное распределение поглощенной дозы в кремнии при токе электронов 190 мкА показано на рис. 7.

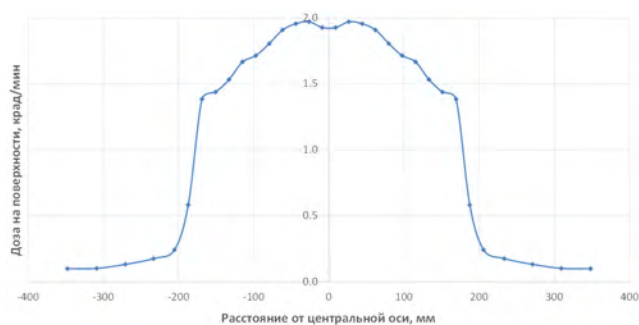


Рис. 7. Расчетное распределение поглощенной дозы в кремнии

4. Конструкция разработанной мишени ТИ

Для создания на базе линейного ускорителя ЛУ-8-2 томографического комплекса разработана мишень ТИ с коллиматором (рис. 8). Геометрия мишени оптимизирована для формирования равномерного поля облучения на расстоянии один метр от мишени. Мишень ТИ включает в себя вольфрамовый конвертер толщиной 1,5 мм, помещенный между входным и выходным коллиматорами из меди и алюминиевый фильтр на выходе. Входной и выходной коллиматоры снабжены каналами водяного охлаждения.

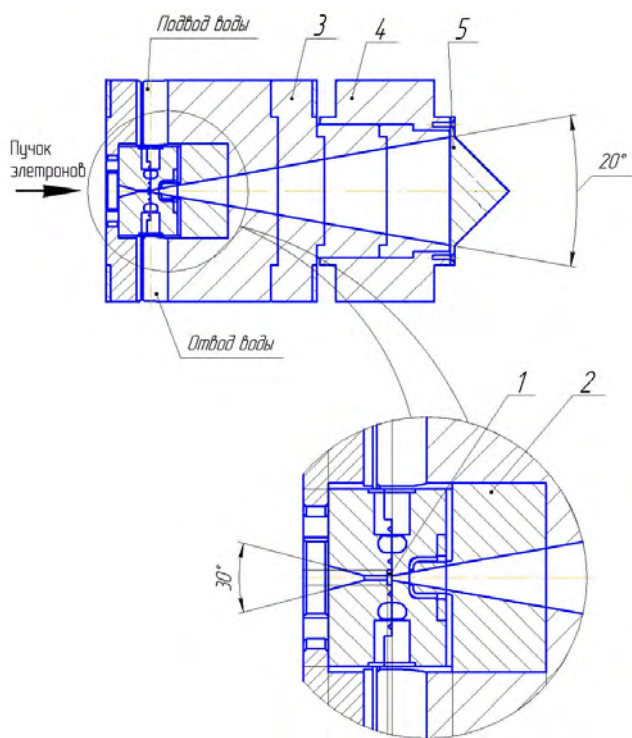


Рис. 8. Мишень ТИ: 1 – вольфрамовый конвертер; 2 – медный коллиматор; 3 – свинцовый кожух; 4 – стальной корпус; 5 – алюминиевый фильтр

Коллиматор в радиальном сечении имеет кольцевой канал охлаждения с входным и выходным отверстием, для отвода избыточного тепла от конвертора потоком воды. Сечение канала определено расчетным образом, и канал расположен в непосредственной близости от зоны нагрева. Для возможности переустановки съемных конвертеров, а так же в целях повышения технологичности конструкции коллиматора он выполнен съемным и разборным. В конструкции коллиматора так же предусмотрены каналы для монтажа двух термодатчиков, при помощи которых возможно контролировать температуру вольфрамового конвертера.

Размещение термопары осуществлено максимально близко к конвертору.

Свинцовый кожух служит для подавления фонового ТИ. Согласно расчетам, слоя свинца кожуха достаточно для создания требуемого размера поля облучения на исследуемом объекте и ослабления фонового излучения мишени.

Вся конструкция выполнена во внешнем цилиндрическом корпусе, поз. 4. На корпусе предусмотрены крепления для переноски и перевозки изделия. В конструкции мишени предусмотрена пространственная регулировка по трем плоскостям с учетом веса изделия. Регулировочные приспособления устанавливаются на корпусе в предусмотренных посадочных местах. В конструкции мишени ТИ, в зонах близких к прохождению пучка электронов, использованы немагнитные материалы.

Заключение

В работе представлено краткое описание линейного резонансного ускорителя электронов ЛУ-8-2 и его экспериментально измеренные характеристики.

Промышленный томограф на основе ускорителя ЛУ-8-2 с дополнительным оснащением и разрабатываемым программным обеспечением позволит получать высококачественные рентгеновские томограммы внутренней структуры крупногабаритных объектов с массовыми толщинами до 200 г/см^2 с высоким разрешением при восстановлении внутренней структуры исследуемых объектов.

В рамках работы представлена конструкция разработанной и изготовленной мишень ТИ с коллиматором. Мишень ТИ служит для формирования равномерного поля облучения на расстоянии один метр от мишени и является одним из ключевых узлов источника ТИ для томографического комплекса.

Результаты численного расчета устойчивого теплового режима, показывают, что максимальная температура конвертера мишени не превышает

температуру плавления и имеет хороший коэффициент запаса по температуре.

Расчетная мощность поглощенной дозы на одном метре от мишени ТИ с коллиматором электронного пучка составила около 2 крад/мин.

Список литературы

1. Гордеев В. С., Завьялов Н. В., Тельнов А. В. и др., Линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-8-2 для дистанционного обнаружения ВОУ // Труды международной конференции XII Харитоновские тематические научные чтения. 2010, С. 106–112.

2. Агапов А. А., Завьялов Н. В., Тельнов А. В. и др., Проект томографического комплекса на базе линейного резонансного ускорителя типа ЛУ-8-2 // Труды международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения», 2017, С. 15–21.

3. Бессараб А. В., Бельков С. А., Бондаренко С. В и др. Регистрация томографического изображения мишени при ее прямом облучении в эксперименте на йодной лазерной установке «Искра-5» // Квантовая электроника, 2010. Т. 40. Вып. 11. С. 1041–1044.

4. Курапов Н. Н., Хромяк М. И., Тельнов А. В. и др. Расчетное моделирование мишени тормозного излучения электронного ускорителя ЛУ-8-2 // Сборник докладов 13-й научно-технической конференции «Молодежь в науке», 2014. С. 235–242.

5. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // ВАНТ Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.

6. Курапов Н. Н., Тельнов А. В., Хромяк М. И. Расчет выходных дозовых характеристик мишени тормозного излучения электронного ускорителя ЛУ-8-2 // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине: сборник тезисов докладов VII Международной научно-практической конференции. – Томск, 2015. С. 336.