

# ПРОЕКТ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ ЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТИПА ЛУ-8-2

## DESIGN OF TOMOGRAPHIC COMPLEX ON THE BASIS OF LINEAR RESONANCE ACCELERATOR OF LU-8-2 TYPE

*A. A. Agarov, N. V. Zavyalov, S. A. Kartanov, N. N. Kurapov, V. N. Leontyev, V. I. Potapin, S. V. Potapov, N. P. Sitnikov, M. V. Tatsenko, A. V. Tel'nov, M. I. Khromyak, I. V. Shorikov*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия  
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF)

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-8-2, предназначенный для непрерывной генерации тормозного излучения (ТИ) в круглосуточном режиме. Ускоритель был спроектирован для проведения исследований по обнаружению высокообогащённого урана (ВОУ) в большегрузных машинах и грузовых контейнерах на контрольно-пропускных пунктах. Для этого в конструкцию были заложены возможности регулировки амплитудно-временных характеристик ускоренного пучка 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.

Основываясь на полученных экспериментальных результатах работы ускорителя ЛУ-8-2 в радиографическом режиме был разработан проект томографического комплекса для получения трёхмерного изображения объектов с большими массовыми толщинами. В докладе представлены требования к характеристикам генерируемого ТИ и регистрирующего оборудования для получения объёма данных, необходимого для восстановления трёхмерного изображения внутренней структуры исследуемых объектов.

RFNC-VNIIEF has developed a linear resonance electron accelerator LU-8-2, meant for continuous generation of bremsstrahlung in the around-the-clock mode. The accelerator was designed to perform studies on detection of high-enriched uranium (HEU) in heavy-duty vehicles and cargo containers at check points. For this purpose there were designed capabilities for adjustment of time-amplitude characteristics of an accelerated beam in the broad range, as well as their high repeatability. LU-8-2 accelerating structure was developed on the basis of a round iris-loaded waveguide with a microwave power supply from MI-456AM magnetron. Experimentally measured average energy of LU-8-2 accelerated electrons was  $8 \pm 0,5$  MeV at the average beam power – 1,5 kW.

Basing upon the obtained experimental results of LU-8-2 accelerator's operation in radiographic mode there was developed a design of a tomographic complex for obtaining a three-dimensional object images with large mass thicknesses. The paper presents requirements to characteristics of generated bremsstrahlung and registering equipment for obtaining data level, required for reconstruction of a three-dimensional image of studied objects' internal structure.

### Введение

Транспортабельный линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-8-2 [1,2] разработан для оснащения таможенных пунктов в целях

предотвращения бесконтрольных перевозок высокообогащённого урана (ВОУ). Для дистанционного обнаружения ВОУ предложено использовать метод, основанный на регистрации запаздывающих нейтронов осколков деления, которые обра-

зуются в результате ( $\gamma$ , f) и (n, f) реакций [3]. Средняя энергия ускоренных электронов должна быть не менее 8 МэВ. Для обеспечения СВЧ питания и получения требуемых параметров ускорителя применён коммерчески выпускаемый магнетрон МИ-456АМ.

Предусмотрена возможность регулировки основных параметров ускорителя: тока, частоты следования и длительности импульсов электронного пучка. Подобная регулировка необходима для отладки и оптимизации метода обнаружения ВОУ. Конструкция ускорителя позволяет организовать его транспортировку на грузовом транспорте для оперативного развертывания в полевых условиях.

В последние годы на ускорителе ЛУ-8-2 проведены радиографические эксперименты показывающие возможность его применения в качестве источника излучения для неразрушающего контроля объектов большой массовой толщины. А достаточно высокая средняя мощность электронного пучка при энергии в 8 МэВ позволяет разработать высокопроизводительный томографический комплекс для проверки внутренней структуры объектов с большой массовой толщиной.

## 1. Описание ускорителя ЛУ-8-2

Внешний вид основного оборудования линейного резонансного ускорителя электронов ЛУ-8-2 в рабочем помещении показан на рис. 1.



Рис. 1. Основное оборудование ускорителя ЛУ-8-2 в рабочем помещении: 1 – измерительная стойка; 2 – силовая стойка; 3 – модуляторный шкаф; 4 – блок импульсного трансформатора; 5 – система водяного охлаждения; 6 – излучающий модуль;

Конструкция ускорителя ЛУ-8-2 имеет модульную структуру, облегчающую погрузку на транспортное средство для доставки к месту

назначения. В состав ускорителя ЛУ-8-2 входят следующие основные системы: излучающий модуль; модулятор магнетрона и инжектора электронов; оборудование силовой автоматики; система водяного охлаждения и термостабилизации; система вакуумирования; автоматизированная система управления; система видеонаблюдения.

В излучающий модуль (излучатель) входят: СВЧ генератор, ускоряющая секция, магнитная система, инжектор электронов, система вакуумирования, система вывода пучка и мишень тормозного излучения. Излучающий модуль служит для генерации мощного ионизирующего излучения в виде пучка электронов или тормозного излучения (ТИ). Основные характеристики излучателя:

- средняя энергия ускоренных электронов на мишени ( $8 \pm 0,5$ ) МэВ;
- максимальная средняя мощность пучка электронов 1,5 кВт;
- длительность импульса тока от 3 до 6 мкс;
- частота следования импульсов тока от 50 до 800 Гц;
- диаметр пучка на выходе ускорителя, не более 3 мм;
- длина излучающего модуля, не более 1,8 м;
- вес излучающего модуля, не более 900 кг.

СВЧ генератор разработан на основе магнетрона МИ-456АМ и предназначен для СВЧ питания ускоряющей структуры. В состав генератора входят магнетрон и СВЧ тракт (рис. 2). Основные выходные параметры магнетрона МИ-456АМ:

- несущая СВЧ частота  $2797 \pm 5$  МГц;
- импульсная СВЧ мощность 3,5 МВт;
- средняя СВЧ мощность 4 кВт.

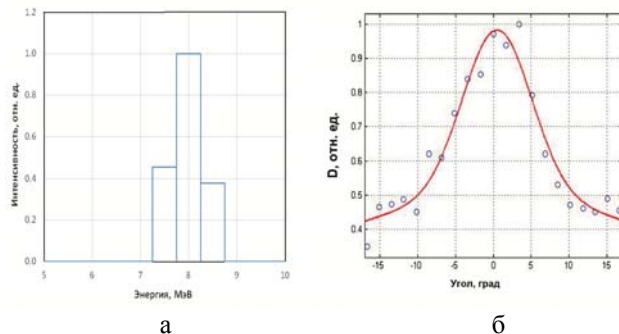


Рис. 2. Энергетический спектр ускоренных электронов и угловое распределение

Ускоряющая секция (УС) состоит из входного и выходного трансформаторов типа волны (ТТВ) и круглого диафрагмированного волновода (КДВ) с переменной геометрией ускоряющих ячеек (чашек). КДВ рассчитан и изготовлен для работы на

бегущей волне типа E01 при моде  $2\pi/3$ . Все чашки настроены на рабочую частоту выбранного типа колебаний ( $2797 \pm 0,1$ ) МГц. Инжектор электронов ЛУ-8-2 (пушка диодного типа) обеспечивает формирование сходящегося сплошного аксиально-симметричного пучка электронов с энергией до 50 кэВ. Вывод ускоренных электронов в атмосферу осуществляется через двухслойную титано-алюминиевую фольгу толщиной 40 мкм, расположенную на выпускном отверстии выходного ГТВ.

Система вакуумирования ускорителя ЛУ-8-2 обеспечивает и постоянно поддерживает в процессе работы в ускоряющей секции рабочее давление не хуже  $5 \cdot 10^{-5}$  Па. Система водяного охлаждения и термостабилизации поддерживает требуемый тепловой режим всех систем ускорителя, температура воды в контуре выдерживается с точностью  $\pm 10$ С. Предельная расчётная мощность тепловыделения при работе всех систем ЛУ-8-2 не превышает 14 кВт.

Модулятор, используемый для высоковольтного импульсного питания (50 кВ) магнетрона и электронной пушки, разработан в Российском институте мощного радиостроения (РИМР). Он относится к новой серии модуляторов с улучшенными импульсными характеристиками, разработанных специально для использования в составе линейных электронных ускорителей и представляющих из себя импульсные генераторы с полным разрядом ёмкостного накопителя энергии.

Автоматизированная система управления состоит из двух модулей: пульта управления и стойки измерительной, и позволяет оператору дистанционно управлять ускорителем и мониторировать его основные параметры.

Для измерения средней энергии ускоренных электронов применили модифицированный метод поглощающих фильтров, основанный на методиках, описанных в [4] и [5]. Этот метод позволяет оценить среднюю энергию с точностью не хуже  $\pm 6\%$ . В качестве фильтров использовали сборку из десяти алюминиевых пластин, изолированных между собой шайбами из прессованной слюды, при прохождении пучка через сборку ток регистрируется отдельно с каждой пластины. Сборку предварительно просчитали по программе С-007 [6] методом Монте-Карло для моноэнергетического пучка электронов (от 1 до 10 МэВ с шагом 0,5 МэВ), по нормали падающего на пластины. Сравнение экспериментальной кривой поглощения электронов с расчетными данными показало, что средняя энергия ускоренных электронов составляет 8 МэВ в пределах погрешности метода.

Полученное распределение токов на пласти-

нах сборки использовали для восстановления энергетического спектра ускоренных электронов. Решение системы алгебраических уравнений проводилось по методу наименьших квадратов в положительной области решений. Восстановленный энергетический спектр показан на рисунке 2а.

Измерения углового распределения ТИ ЛУ-8-2 проводили [2] с использованием термомлюминесцентных дозиметров (TLD), установленных на расстоянии 1 м от мишени тормозного излучения. Угловое распределение ТИ ускорителя ЛУ-8-2 показано на рис. 2б.

Для измерения профиля пучка электронов использовали цветную дозиметрическую плёнку СО ПД(Ф) Р-5/50, расположенную на расстоянии 40 мм от выпускной фольги ускорителя. На рис. 3 [2] показаны горизонтальное и вертикальное распределения интенсивности в поперечном сечении электронного пучка без коллимации, его поперечный размер на полувысоте распределения интенсивности составил около 3 мм.

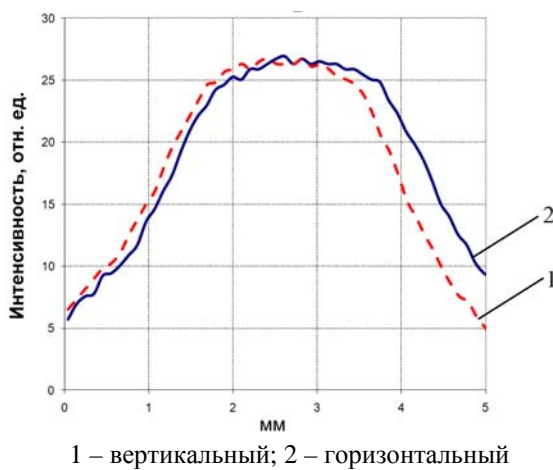


Рис. 3. Горизонтальный и вертикальный профили электронного пучка на расстоянии 40 мм от выпускной фольги ускорителя ЛУ-8-2

## 2. Радиографические эксперименты

На ускорителе ЛУ-8-2 проведены радиографические эксперименты, показывающие возможность применения ускорителя в качестве источника излучения для неразрушающего контроля объектов большой массовой толщины. Система регистрации состояла из сцинтилляционного конвертора LYSO толщиной 2 мм, поворотного зеркала и ПЗС-камеры.

Для определения просвечивающей способности ускорителя стальная мишень с толщинами лучей 10 мм, 3 мм и 1 мм (разработана РФЯЦ-ВНИИЭФ)

была помещена в «чашеобразную» деталь, выполненную из сплава ВНЖ (рис. 4). Толщина стенки детали 16 мм, диаметр  $\approx 140$  мм. На рис. 5 показано рентгеновское изображение миры, полученное при временах экспозиции в 1 и 3 мин. Видно, что стальная мира с толщинами лучей 3 мм и 10 мм отчетливо различима в детали из ВНЖ. Коэффициент контрастной чувствительности составил  $\sim 1,5\%$  при просвечиваемой массовой толщине  $\sim 100$  г/см<sup>2</sup>, это является высоким показателем характеризующим качество рентгенографической системы.



Рис. 4. Фотография стальной миры внутри детали из ВНЖ

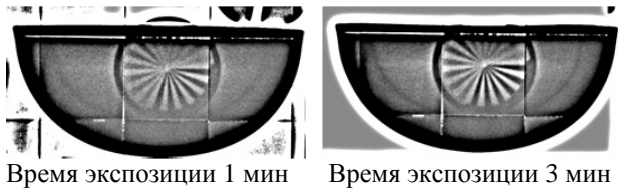


Рис. 5. Рентгеновские изображения стальной миры внутри детали из ВНЖ

Для определения стабильности пучка ТИ ускорителя ЛУ-8-2 проводилась его съемка в разные моменты времени. На рисунке 6 показаны пять последовательных снимков пучка ТИ. Время экспозиции каждого кадра составляет 10 сек.

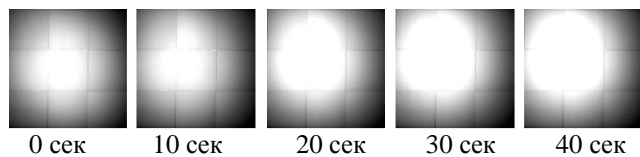


Рис. 6 Изображение пучка тормозного излучения ускорителя ЛУ-8-2

Видно, что с течением времени меняется положение и амплитуда пучка ТИ. Смещение центра пучка составляет около 15 мм как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Амплитуда при этом увеличивается с 8400 до 9600 отсчетов. Нестабильности положения и амплитуды пуч-

ка ТИ была вызвана достаточно длительным временем выхода ускорителя на стабильный режим. Планируется устранение этих эффектов за счет дооснащения ЛУ-8-2 дополнительным оборудованием, обеспечивающим требования к томографическим установкам.

Для изучения возможности применения ускорителя ЛУ-8-2 в качестве источника излучения в рентгеновском томографическом комплексе были получены 36 проекций объекта исследования (шестеренчатый редуктор) с шагом 5°. На рис. 7 показаны рентгенограммы объекта для 0°, 45°, 90°, 135° и 180°.

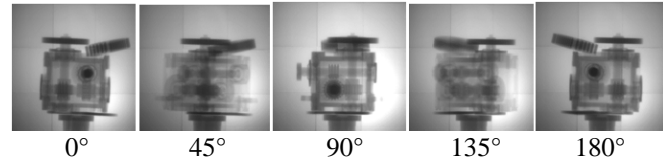


Рис. 7. Изображение пяти проекций объекта исследования до коррекции

Существующая нестабильность пучка по амплитуде и положению приводит к возникновению дополнительной ошибки в восстановленной плотности объекта при реконструкции 3D модели объекта. Поэтому перед восстановлением был проведен процесс получения лучевых сумм с подбором положения и амплитуды пучка для каждой проекции. На рис. 8 представлены изображения пяти проекций после обработки.

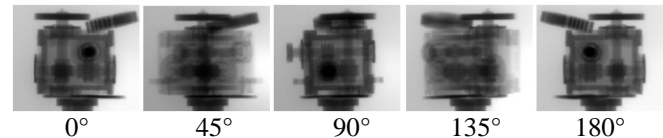
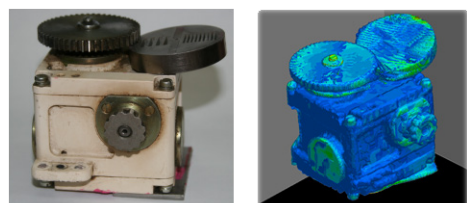


Рис. 8. Изображения пяти проекций объекта исследования после коррекции

Результат восстановления 3D модели объекта по 36 проекциям показан на рис. 9. Реконструкция выполнялась по программе DIA (РФЯЦ-ВНИИЭФ, С. В. Потапов), основанной на итерационном алгоритме последовательных приближений, в котором в качестве меры близости изображений используется квадратичная невязка.



Объект исследования Восстановленная 3D модель

Рис. 9. Объект и его восстановленная 3D модель

### 3. Оборудование, необходимое для томографического комплекса

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается универсальный промышленный рентгеновский томограф на основе ускорителя ЛУ-8-2, который может включать в себя и другие типы источников излучения (ИИ). При этом необходимо, чтобы система регистрации удовлетворяла ряду требований, в том числе по ширине диапазона энергии излучения для обеспечения совместимости с различными ИИ. В качестве регистратора излучения рассматривается линейный детектор рентгеновского излучения<sup>1</sup>, рассчитанный на диапазон энергий от 600 кэВ до 9 МэВ с рабочей областью 820 мм. Ширина сцинтиллятора (CdWO<sub>4</sub>) в детекторе составляет 250 мкм, толщина 10 мм с шагом пикселя 400 мкм. Применение такого линейного детектора позволит существенно увеличить соотношение сигнал/шум в получаемых изображениях за счет уменьшения фона рассеянного излучения.

Кроме того, система регистрации будет оснащена прецизионным поворотным устройством. Оно должно обеспечивать поворот объекта массой до 200 кг с точностью 20 угл. секунд. На таком поворотном устройстве возможно получение до 3000 проекций объекта с погрешностью по углу поворота не превышающей 5%, то есть угловые шаги по 0,12° с точностью ±20 угловых секунд.

Дооснащение ускорителя ЛУ-8-2 должно включать: трехфазный стабилизатор напряжения общего сетевого питания установки (380 В, 50 Гц); стабилизированные источники питания соленоида и корректирующих катушек ускоряющей структуры; отдельный высоковольтный модулятор для инжектора электронов; специализированный коллиматор ускоренного пучка.

Трехфазный стабилизатор напряжения должен обеспечить: высокую стабильность (± 1%) питания оборудования установки при отклонении общего сетевого питания в пределах ±20% от номинального; защиту электронного оборудования от индустриальных и атмосферных импульсных помех, распространяемых по сети общего электропитания.

Стабилизированный источник питания соленоида (400 В, 20 А) требуется для получения устойчивого поперечного размера ускоренного

пучка электронов за счет стабилизации амплитуды магнитного продольного поля на оси ускоряющей структуры ЛУ-8-2. Может быть использован источник постоянного тока со стабильностью не хуже 0,1%.

Стабилизированные источники питания корректирующих катушек потребуются для предотвращения поперечного смещения пучка от оси ускорения. Предпочтительней использовать двухканальные источники питания, обладающие высокой стабильностью и малым уровнем пульсаций по напряжению – 0,03%, по току – 0,1%.

Отдельный высоковольтный модулятор для инжектора электронов должен решить следующие задачи: исключить нестабильность параметров пучка в момент включения; повысить стабильность работы магнетрона, за счёт устранения влияния токовой нагрузки инжектора на модулятор магнетрона; позволит оперативно регулировать средний ток пучка посредством изменения скважности. Модулятор инжектора должен обеспечивать следующие параметры:

- пределы регулировки напряжения на нагрузке (5...50) кВ;
- максимальный импульсный ток в нагрузке 3 А;
- регулирование длительности импульса (1...7) мкс;
- частота повторения импульсов (10...1000) Гц;
- нестабильность амплитуды от импульса к импульсу ±1%.

Модуляторы с такими параметрами могут разработать в ОАО «РИМР» (г. Санкт-Петербург).

Для создания на базе линейного ускорителя ЛУ-8-2 томографического комплекса разработана мишень ТИ с коллиматором [7] (рис. 10). Геометрия мишени оптимизирована для формирования равномерного поля облучения на расстоянии в один метр. Мишень ТИ включает в себя вольфрамовый конвертер толщиной 1 мм, помещённый между входным и выходным коллиматорами из меди и алюминиевый фильтр на выходе. Входной и выходной коллиматоры снабжены каналами водяного охлаждения.

Пучок электронов от ускорителя проходит через входной коллиматор мишени и попадает на вольфрамовый конвертер. Далее выходной коллиматор формирует поле ТИ с требуемым распределением. Алюминиевый фильтр дополнительно выравнивает распределение дозы по поверхности и поглощает электроны, которые прошли через конвертер. В программе С-007 был проведен расчет распределения поглощенной дозы в кремнии на

<sup>1</sup> Сканирующий рентгеновский модуль «X-scan iNE» (Detection Technology, Finland)

расстоянии один метр от мишени ТИ ускорителя ЛУ-8-2. При выходном коллиматоре с углом вершины конуса  $20^\circ$  ТИ на одном метре от мишени образует пятно диаметром  $\sim 300$  мм со спадом 26% от максимума поглощенной дозы. Расчетное распределение поглощенной дозы в кремнии при токе электронов 190 мкА показано на рис. 11.

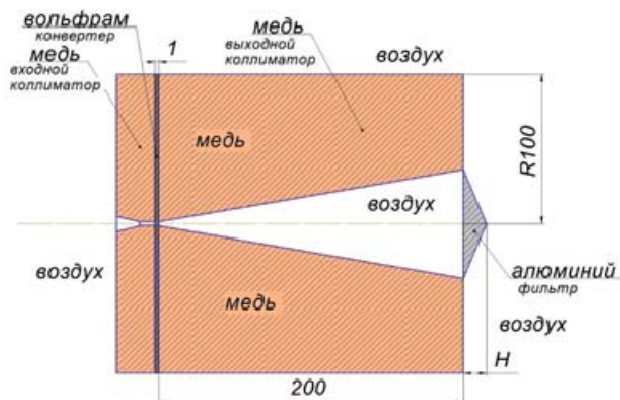


Рис. 10 Схема мишени ТИ

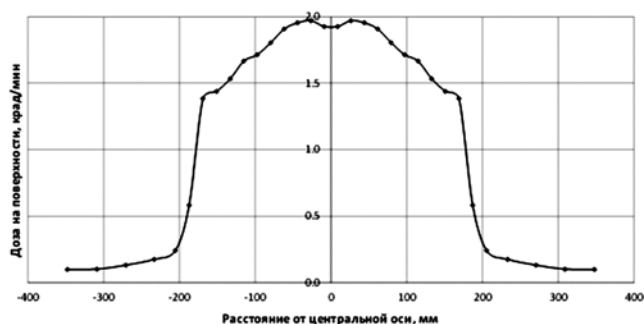


Рис. 11. Расчетное распределение поглощенной дозы в кремнии

Промышленный томограф на основе ускорителя ЛУ-8-2 с дополнительным оснащением и разрабатываемым программным обеспечением DIA позволит получать высококачественные рентгеновские томограммы внутренней структуры крупногабаритных объектов с массовыми толщинами до  $200 \text{ г/см}^2$ .

### Заключение

Представлено краткое описание основных узлов разработанного во ВНИИЭФ линейного ускорителя электронов ЛУ-8-2 и его экспериментально измеренные характеристики: средняя энергия ускоренных электронов –  $8 \pm 0,5$  МэВ, поперечные размеры пучка электронов на выходе ускорителя без коллимации не превышают 3 мм. Расчетная мощность поглощенной дозы на 1 м от мишени

ТИ с коллиматором электронного пучка  $\varnothing 2$  мм составляет около 2 крА/мин.

Проведенные эксперименты показывают достаточную просвечивающую способность и возможность применения ускорителя ЛУ-8-2 в качестве источника излучения в универсальном промышленном рентгеновском томографе. При этом необходимо дооснастить ускоритель ЛУ-8-2 дополнительными системами стабилизации питания и формирования поля облучения. Это позволит повысить стабильность пучка ТИ, как по амплитуде, так и по геометрическому положению, улучшить пространственное разрешение рентгеновского изображения за счет уменьшения размеров фокусного пятна. Применение прецизионного поворотного устройства обеспечит поворот объекта массой до 200 кг с точностью 20 угловых секунд и получение до 3000 проекций объекта, что достаточно для получения необходимого объема информации для восстановления его внутренней структуры с разрешением 0,4 мм.

### Список литературы

1. V. T. Punin, D. N. Shadrin, I. V. Shorikov, N. P. Sitnikov, A. V. Telnov and N. V. Zavylov, C. E. Moss and J. W. Toevs. HEU Detection at a Distance. Design of the linear electron accelerator LU-8-2// Proc.Workshop «Detecting Nuclear and Radioactive Material in a Civilian Maritime Environment» 1–4 November 2005, Albuquerque, USA.
2. Гордеев В. С., Завьялов Н. В., Тельнов А. В. и др., Линейный резонансный ускоритель электронов ЛУ-8-2 для дистанционного обнаружения ВОРУ // Труды международной конференции XII Харитоновские тематические научные чтения. 2010, С. 106–112.
3. C. E. Moss, C. A. Goulding, C. L. Hollas and W.L. Myers. Neutron Detectors for Active Interrogation of Highly Enriched Uranium// IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 51, N.4, August 2004.
4. Москалёв В. А. и Сергеев Г. И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат. – 1991.
5. Милованов О. С., Смирнов И. А. Экспресс-метод измерения энергии пучка ускоренных электронов // Ускорители. М.: Атомиздат, 1969. Вып. XI. С. 57–60.
6. А. К. Житник, Е. Н. Донской, С. П. Огнев, А. В. Горбунов, А. Н. Залялов, Н. В. Иванов, А. Г. Малькин, В. И. Рослов, Т. В. Семёнова,

А. Н. Субботин. 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.

7. Курапов Н. Н., Тельнов А. В., Хромьяк 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.