

## **РАЗВИТИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ РЕНТГЕНОВСКИХ И ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИНСПЕКЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ В НИИЭФА им. Д.В. ЕФРЕМОВА**

*Ю.А. Свистунов, М.Ф. Ворогушин, В.И. Петрунин, А.В. Сидоров, Ю.Н. Гавриш,  
А.М. Фиалковский*

*ФГУП НИИ Электрофизической аппаратуры им Д.В. Ефремова  
196641, Санкт-Петербург, Россия*

Даётся обзор исследований, проводимых в НИИЭФА последние годы, по созданию инспекционных комплексов на базе линейных ускорителей, как рентгеноскопических, так и использующих ядерно-физические методы. В первом случае речь идёт о различении материалов по плотности с помощью опции дуальной энергии, во втором – об элементном анализе содержимого контейнеров на наличие взрывчатых (ВВ) и делящихся (ДВ) веществ. Идентификация ВВ и ДВ производится по присутствию в контейнере ядер азота, кислорода и углерода в определенном соотношении.

### **ВВЕДЕНИЕ**

НИИЭФА им. Д.В. Ефремова является производителем рентгеноскопических комплексов, предназначенных для высокопроизводительного досмотра транспортных средств и крупногабаритных контейнеров без их вскрытия. Комплексы позволяют сопоставить реальное содержимое объекта контроля с декларированным в грузовых документах и обнаружить нелегальные вложения и тайники с оружием, боеприпасами, наркотиками, ювелирными изделиями, алкогольными напитками и т.п.

Контроль осуществляется путем просвечивания объектов пучком фотонов тормозного излучения, генерируемого линейным ускорителем электронов. Прошедшее через контролируемый объект излучение регистрируется детекторами. Система обработки и визуализации данных производит обработку информации, поступающей с детекторной линейки. Формируемое изображение состава груза выводится на дисплей в режиме реального времени или запоминается для последующей обработки. При необходимости детальной инспекции полученное изображение выводится на одну из нескольких рабочих станций таможенных инспекторов.

Были разработаны и поставлялись заказчикам три вида рентгеноскопических комплексов. Комплекс таможенного контроля крупногабаритных грузов "ЭФАСКАН" устанавливается на пунктах таможенного контроля в аэропортах, морских портах и т.п. Комплекс "ЭФАСКАН-2" обеспечивает контроль транспорта на автотрассах. Ускоритель, детекторная линейка и система формирования тормозного поля монтируются на устройстве транспортировки и перемещаются относительно автотранспорта. Комплекс "ЭФАСКАН-3" предназначен для досмотра товарных железнодорожных составов (вагонов, цистерн, контейнеров) без их вскрытия. В процессе просвечивания железнодорожный состав со скоростью 18 км/ч перемещается под пучком тормозного излучения. В этих системах были получены рекордные параметры по пространственному (1 мм)

и плотностному (1%) разрешению. При просвечивании объектов использовались моноэнергии от 6 до 15 МэВ, полученные на выходе линейных ВЧ-ускорителей электронов. Исследования по созданию комплекса детектирования взрывчатых (ВВ) и делящихся (ДВ) веществ в авиаконтейнерах и багаже активными методами ядерной физики находятся в стадии НИОКР. Разработаны принципы и схема построения комплекса на базе линейного ВЧ-ускорителя ионов. Решены вопросы проектирования и изготовления малогабаритных прецизионных ускоряющих структур с рабочей частотой 433 МГц, детекторных блоков, принимающих излучение от исследуемого объекта, системы обработки информации.

Дальнейшие исследования по совершенствованию комплексов направлены на создание специальных опций, позволяющих проводить элементный анализ материалов, содержащихся в исследуемом объекте.

### **МЕТОД ДУАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ И ОПЦИЯ СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯ**

Проблема распознавания материалов по атомному номеру методом дуальной энергии в крупногабаритных грузовых контейнерах заинтересовала нас шесть лет назад. К этому времени в мире уже появились системы распознавания органических и неорганических материалов, работающие в низкоэнергетическом диапазоне (до 1 МэВ) и предназначенные для контроля ручной клади и багажа пассажиров при авиаперевозках. Однако, для крупногабаритных автомобильных контейнеров, просвечиваемых при граничной энергии гамма-квантов 4...10 МэВ достижения низкоэнергетического контроля не могли быть применены в связи с превалированием при этих энергиях механизма комптоновского рассеяния и рождения пар вместо фотоэффекта при низких энергиях. Существенным препятствием также является значительный квантовый шум в изображениях.

Богатый опыт создания интроскопических систем контроля крупногабаритных объектов на моно-

энергии в значительной степени был использован при решении задач распознавания материалов методом дуальной энергии.

Значительный объем теоретических и экспериментальных исследований на полномасштабном стенде таможенной системы в НИИЭФА позволил найти математические методы, обеспечивающие существование и единственность решения системы интегральных уравнений, описывающих физику процесса, предложить нетривиальные методы алгоритмизации задачи и обеспечить приемлемую скорость обработки данных в псевдореальном времени. Тем самым была практически решена главная проблема – громадный объем требуемых вычислений.

Математический аппарат, применяемый при обработке информации, поступающей из сигнального процессора, описан в работах [1,2].

В настоящее время основной объем экспериментальных исследований на стенде НИИЭФА завершен и требуется его существенная модернизация для реализации коммерческой версии таможенной системы с опцией дуальной энергии.

Результатом этих исследований является возможность количественного распознавания атомного номера материала для гомогенных сред и качественного для гетерогенных.

Перспектива работ усматривается в создании ускорителя с короткой добавочной секцией, включаемой синфазно и противофазно для модуляции энергии ускорителя, а также модулятора, триодной пушки и специальной системы синхронизации для формирования "дуплетной" пары ВЧ-импульсов и импульсов тока. Планируется использование многоядерной системы обработки данных для параллельных вычислений.

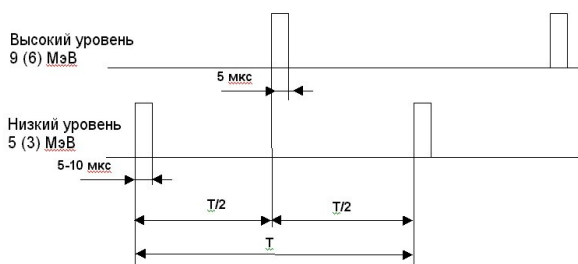


Рис.1 Симметричный режим работы ускорителя

Пример режима работы ускорителя при использовании опции дуальной энергии показан на схеме (Рис.1). Импульсы тока с высокой и низкой энергией чередуются, ток в импульсе с низкой энергией должен быть в несколько раз больше, чем в импульсе с высокой энергией.

В дальнейшем предполагается добавить опцию стереовидения объектов в контейнере, раскрашенных в соответствии с атомным номером.

Инновационной идеей, предлагаемой нами, является система не с расходящимися пучками фотонов, а со сходящимися на одной детекторной линейке.

Для формирования разнесенных в пространстве двух фотонных потоков используется один ускоритель с двумя мишенями и сканированием элек-

тронного пучка на каждую мишень посредством управляющего магнитного поля.

Далее информация с детекторной линейки для двух ракурсов программным путем разделяется и нормализуется для получения стандартной стереопары, последующая обработка которой позволяет вывести ее на экран для наблюдения с помощью поляризационных очков.

Таким образом, исключаются трудности с нивелированием неидентичности характеристик двух детекторных линеек за счет доработки стандартного однофокусного ускорителя до двухфокусного.

## ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Планы работ НИИЭФА по созданию комплексов прикладного назначения на базе линейных ВЧ-ускорителей ионов и результаты первых исследований по созданию ускоряющих трактов с рабочей частотой 433 МГц были опубликованы в Трудах Международных конференций [3,4]. Речь идет об использовании ускоренных протонов и дейтронов с энергиями от 1 до 10 МэВ в комплексах обнаружения взрывчатых, делящихся и наркотических веществ в контейнерах и багаже, производстве изотопов для медицинских целей, элементном экспресс-анализе окружающей среды и ряде других специальных приложений.

Предполагается для ускорения протонов и дейтронов до 1...4 МэВ использовать резонаторы с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), а при ускорении от 2 до 10 МэВ – Н-резонаторы с переменнo-фазовой фокусировкой (ПФФ).

Для использования в качестве нейтронного генератора в комплексе обнаружения взрывчатых (ВВ) и делящихся (ДВ) веществ рассматриваются протонный ВЧ-линейный ускоритель (8 МэВ) и ускоритель дейтронов (4 МэВ) с рабочей частотой 433 МГц.

Сравнительный анализ возможностей использования ускорителя дейтронов с энергией 4 МэВ и протонов с энергией 8 МэВ в качестве источников наносекундных импульсов моноэнергетических нейтронов с энергией около 7 МэВ показывает, что ускоритель дейтронов предпочтительнее.

В случае использования других методик обнаружения, где нужен источник быстрых нейтронов широкого энергетического спектра, возможно применение как протонного, так и дейтронного вариантов.

При этом ускоренные пучки могут взаимодействовать в обоих случаях с бериллиевой мишенью. Толщина этой мишени в случае протонного пучка должна быть на порядок больше (0,2 г/см<sup>2</sup> против 0,02 г/см<sup>2</sup>).

Возможная схема демонстрационной установки по обнаружению ВВ в авиаконтейнерах с использованием считающегося наиболее эффективным метода PFNA (импульсный анализ по быстрым нейтронам) приведена на Рис.2. В качестве ускоряющей структуры используется резонатор с ПОКФ с выходной энергией дейтронов 4 МэВ. В этом случае определяется не только наличие ВВ, но и его местоположение в объекте. В другом варианте используются микросекундные импульсы нейтронов с расстоянием

между ними 5-6 микросекунд и анализ по излучению С-,N-,О-изотопов объекта.

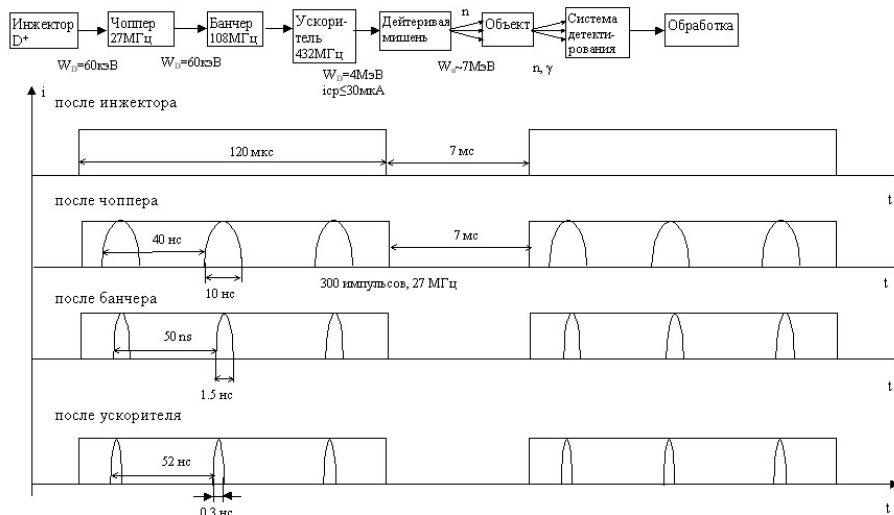


Рис.2. - Схема инспекции (PFN Analysis + запаздывающие n и  $\gamma$ )

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время рассматриваются различные варианты продолжения перспективных исследований по заявленным выше темам. Частично – по государственным контрактам, частично – по контрактам с зарубежными фирмами.

Планируется модернизация стенда инспекции для демонстрации контроля контейнеров с помощью метода дуальной энергии и завершения работ по созданию стенда для установки комплекса по обнаружению ВВ и ДВ в авиаконтейнерах и багаже.

## ЛИТЕРАТУРА

1. S. Ogorodnikov, V. Petrunin, M. Vorogushin. Radioscopic discrimination of materials in 1...

10 MeV range for customs applications // *Proceedings of the EPAC 2002*. June 3-7, Paris, p.2807-2810.

2. V. Petrunin. Mathematical methods of data processing for high-energy introspective examination of large scale objects // *NIM in physics research, section A*. 2006, v.558, p. 196-198.
3. Yu. Svistunov, M. Vorogushin, D. Semenov, B. Vodennikov. Choice of ion linac as neutron generator for contraband detection system // *Proceedings of LINAC 2006*. Knoxville, USA August 21-25, p.475-477.
4. Yu. Svistunov, et al. Advances of NPK LUTS contraband detection system // *ibid* p. 472-474.

## RESEARCHES IN CREATION OF ROENTGEN AND NUCLEAR-PHYSICAL CONTRABAND DETECTION SYSTEMS OF THE EFREMOV INSTITUTE

*Yu.A. Svistunov, M.F. Vorogushin, V.I. Petrunin, A.V. Sidorov, Yu.N. Gavriush, A.M. Fialkovsky*

Report reviews research works of NPK LUTS NIIIEFA connected with creation of contraband detection systems for the last years. There are considered scanning schemes made it possible to form dual radioscopic images of tested samples and containers with use electron linacs and inspection's schemes with accelerated protons or deuterons producing neutron flow. In the last case neutron activation analysis is used after neutron irradiation of an object. Presence of explosives or fission is determined by content N, O, C nuclei.

## РОЗВИТОК РОБІТ ЗІ СТВОРЕННЯ РЕНТГЕНІВСЬКИХ І ЯДЕРНО-ФІЗИЧНИХ ІНСПЕКЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ У НДІЕФА ім. Д.В. ЄФРЕМОВА

*Ю.А. Свистунов, М.Ф. Ворогушин, В.І. Петрунін, А.В. Сидоров, Ю.Н. Гавриш, А.М. Фіалковський*

Дається огляд досліджень, проведених у НДІЕФА за останні роки, по створенню інспекційних комплексів на базі лінійних прискорювачів як рентгеноскопічних, так і з використанням ядерно-фізичних методів. У першому випадку мова йде про розділення матеріалів по щільності за допомогою опції дуальної енергії, у другому – про елементний аналіз вмісту контейнерів на наявність вибухових (ВР) і речовин, що діляться (ДР). Ідентифікація ВР і ДР робиться по присутності в контейнері ядер азоту, кисню і вуглецю в певному співвідношенні.