

## ДОСМОТРОВЫЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ГРУЗОВ

*Ю.Н. Гавриш<sup>1</sup>, И.Ю. Вахрушин<sup>1</sup>, А.В. Павленко<sup>1</sup>, Я.А. Бердников<sup>2</sup>, М.Б. Лебедев<sup>3</sup>,  
Е.Ю. Усачев<sup>3</sup>, А.Н. Передерий<sup>4</sup>, М.В. Сафонов<sup>4</sup> И.В. Романов<sup>4</sup>*

*<sup>1</sup>ФГУП «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры  
им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия, E-mail: npkluts@niiefa.spb.su;*

*<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
Санкт-Петербург, Россия, E-mail: imor@imor.spbstu.ru;*

*<sup>3</sup>Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики  
(технический университет), Москва, Россия, E-mail: mirea@mirea.ru;*

*<sup>4</sup>ГУ Войсковая часть 35533, г. Железнодорожный, Московская обл., Россия  
E-mail: vilage@dol.ru*

В основу данного комплекса положена идея интроскопического контроля крупногабаритных изделий и методика распознавания групп элементов с близким атомным номером на основе использования дуальной энергии. В качестве источников тормозного излучения используются линейный ускоритель с энергией 6 МэВ и бетатрон с энергией до 9 МэВ. Для увеличения эффективности контроля используются трехмерное изображение объектов, получаемое посредством стереовидения, и метод дуальной энергии.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Глобализация мировой экономики приводит к возрастанию потока товаров между государствами. Вместе с тем рост активности террористических организаций и транснациональных наркокартелей требует усиления контроля над перемещаемыми товарами и транспортными средствами через государственную границу.

Широкая сеть развитых международных транспортных магистралей, значительное число пограничных пунктов пропуска (в том числе оборудованных по упрощенной схеме), наличие которых обусловлено темпами развития внешнеэкономической деятельности, продолжают способствовать активному использованию данной среды наркопреступностью для нелегального перемещения контрабанды, наркотиков, оружия как в страну, так и транзитом через ее территорию.

Среди всех видов контроля наибольшую трудность представляет проверка содержимого крупногабаритных грузов (морских и железнодорожных контейнеров) и транспортных средств. Это связано с необходимостью выполнения комплекса трудоемких и длительных погрузочно-разгрузочных работ, занимающих не менее 2-3 часов, и практически позволяет осуществить только единичный, выборочный досмотр таких объектов. По тем же причинам выборочно досматриваются и сами транспортные средства, включая их конструктивные узлы, которые могут потенциально использоваться для сокрытия контрабанды, оружия, взрывчатых веществ, наркотиков. Очевидно, что только внедрение автоматизированных досмотровых радиометрических комплексов (ДРК) позволит успешно решить данную проблему.

### 2. ОПИСАНИЕ ДРК

ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» в кооперации с рядом российских научных центров (Московский институт радио-электроники и автоматики, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Томский государственный политехнический университет) разработал и изготовил досмотровый радиометрический комплекс, который позволяет с высокой достоверностью проводить досмотр как перевозимых грузов, так и используемых для этих целей транспортных средств.

В основу данного комплекса положена идея интроскопического контроля крупногабаритных изделий с использованием в качестве источника тормозного излучения ускорителей электронов с энергией до 9 МэВ [1,2]. С учетом возможностей получения интенсивных потоков гамма-излучения с высокой стабильностью, кроме получения обычного теневого изображения контролируемого объекта, реализована методика распознавания групп элементов с близким атомным номером методом дуальной энергии. Данная опция позволяет выделять подозрительные области для нелегального провоза взрывчатых и наркотических веществ, как правило, имеющих низкий атомный номер, а также наличие радиоактивных веществ и, в первую очередь, делящихся, у которых большой атомный номер. Определение делящихся веществ возможно даже при использовании необходимой при перевозке данных веществ биологической защиты.

Использование линейного ускорителя, который обладает высокой мощностью тормозного излучения, позволяет применение систем детектирования с малыми размерами детекторов, что обеспечивает высокое пространственное разрешение при досмотре инспектируемых грузов.

Значительное увеличение эффективности кон-

троля достигается переходом к трехмерному изображению объектов, в частности, посредством стереовидения. Подобные системы предполагают расщепление потока фотонов с высокой энергией на два расходящихся пучка в пределах диаграммы направленности, две системы коллимации и две детекторные линейки для сбора данных. Далее информация с детекторных линеек для двух ракурсов программным путем сортируется и нормализуется для получения стандартной стереопары, последующая обработка которой позволяет вывести ее на специализированный экран для наблюдения.

Стереовидение содержимого контейнера позволяет получить не только объемное изображение объектов контроля, но и определить численно расстояние до них, а, следовательно, их расположение в контейнере.

Все технологическое оборудование комплекса (ускорители и системы детектирования) размещено на подвижной раме-портале, который равномерно перемещается со скоростью 0,4 м/с, вдоль инспектируемого объекта. Схематическое расположение показано на Рис.1.

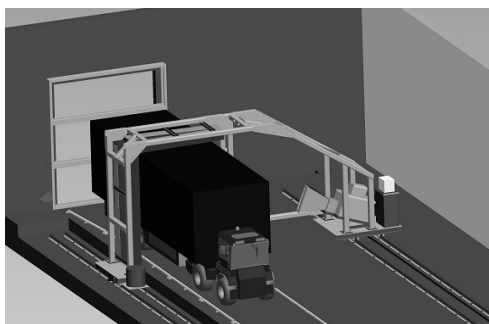


Рис.1. Схематическое расположение технологического оборудования ДРК

Все технологическое оборудование располагается в радиационно-защитном помещении. Въезд и выезд досматриваемого объекта в радиационно-защитное помещение осуществляется через откатные ворота, вход обслуживающего персонала по специальному лабиринту, снабженному радиационно-защитными дверями. Обслуживающий персонал комплекса располагается в специальном помещении модульного типа, оснащенного всеми необходимыми инженерными коммуникациями для нормальной жизнедеятельности. Электропитание комплекса, обогрев модульного помещения и радиационно-защитного сооружения (инфракрасные обогреватели) производится от дизель-генератора, расположенного в специальном контейнере, в котором предусмотрено хранение горючего, обеспечивающего бесперебойную работу комплекса в течение 20 дней.

Построение комплекса по такой схеме обеспечивает его высокую работоспособность даже при условии частичного выхода из строя части технологического оборудования:

- в случае выхода из строя линейного ускорителя остается возможность получения теневого изображения исследуемого объекта в наиболее вероятных областях провоза нелегальных предметов (нижняя часть контейнера, шасси, баки для горючего и т.д.);
- в случае выхода из строя одного бетатрона ис-

пользование пучка электронов с одной энергией позволит получить теневое изображение исследуемого объекта (и его стереограмму);

- в случае выхода из строя одной из детекторных линеек высокого разрешения остается возможность получения теневого изображения и распознавания групп элементов.

Данный досмотровый комплекс не имеет аналогов в мировой практике, разработан на основании накопленного опыта создания больших интроскопических систем для досмотра крупногабаритных изделий машиностроения.

Подобное построение комплекса, выполненного по модульной схеме, позволяет в зависимости от категории решаемых задач осуществлять поставку технологического оборудования как в полном объеме, так и в сокращенном – аналогично досмотровым комплексам, которые сейчас используются таможенными органами в категориях стационарных и передислоцируемых.

#### Основные параметры комплекса

№ п/п	Основные технические характеристики комплекса	Значения пар-ров
1	Максимальная инспектируемая толщина объекта в эквиваленте по стали, мм	320
2	Пространственное (усредненное) разрешение, мм При этом обеспечивается обнаружение следующих стальных проволочек: – без преграды, мм; – за преградой из 100 мм стали, мм; – за преградой из 250 мм стали, мм	3 1,0 4,5 6
3	Пространственное разрешение для контрастных объектов, мм	1
4	Разрешение по плотности (контрастная чувствительность), %	1
5	Восстановление Z-функции (разрешение групп элементов с близким атомным номером, ±)	10...12
6	Восстановление координат и габаритных размеров объектов в досматриваемом грузе, не хуже, мм	40...100
7	Производительность комплекса для контейнеров (2,5×2,5×12 м), контейнеров/ч	25
8	Общая потребляемая мощность комплекса (с учетом кондиционирования и обогрева помещений), не более, кВт	100
9	Количество рабочих станций по обработке теневого рентгеновского изображения	3
10	Диапазон температур, допускающий эксплуатацию комплекса, °С	-50...+50
11	Диапазон влажности, допускающий эксплуатацию комплекса, %	0...95
12	Время непрерывной работы, ч/сут.	24

В таблице приведены основные параметры комплекса для контроля крупногабаритных транспортных средств и грузов на наличие запрещенных к перевозке веществ и предметов.

Состав оборудования комплекса можно разбить

на две основные группы:

- основное технологическое оборудование, обеспечивающее получение и обработку теневого изображения контролируемого объекта;

- вспомогательное технологическое оборудование, обеспечивающее нормальное функционирование основного оборудования и предоставляющее дополнительную информацию об условиях эксплуатации.

Состав основного технологического оборудования:

- линейный ускоритель электронов с энергией 6 МэВ в локальной биологической защите;

- бетатрон с энергиями 4,5 и 9 МэВ в локальной биологической защите;

- модульные детекторные линейки высокого разрешения (два комплекта) и высокой чувствительности (один комплект) для регистрации и первичной обработки тормозного излучения, прошедшего исследуемый объект;

- система формирования веерного тормозного излучения для облучения исследуемого объекта;

- система перемещения ускорителя с системами формирования веерного тормозного излучения и детектирования вдоль исследуемого объекта;

- автоматизированная система управления комплексом с системой обработки теневого рентгеновских изображений и архивирования.

Состав вспомогательного технологического оборудования:

- система энергообеспечения;
- система радиационной безопасности;
- система видеонаблюдения;
- система селекторной связи;
- система пожаротушения;
- система откатных въездных и выездных дверей;
- система отопления и вентиляции.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДРК

#### 3.1. ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ

Основные технические характеристики ускорителя:

- энергия ускоренных электронов 6 МэВ;
- мощность дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от тормозной мишени на оси пучка 5 Гр;
- диаметр электронного пучка на тормозной мишени не более 1,8 мм;
- частота следования импульсов излучения 50...250 Гц;
- длительность импульса излучения 3 мкс.

В ускорителе применена ускоряющая структура на стоячей волне, представляющая собой последовательность ускоряющих резонаторов и резонаторов связи. Резонаторы связи расположены на оси структуры. Ускоряющая структура обеспечивает высокий темп ускорения, что позволяет сократить ее длину и длину излучателя в целом. Рабочая резонансная частота составляет 3 ГГц.

Фокусировка пучка достигается за счет высоко-частотной фокусировки, осуществляемой высоко-

частотным полем на участке группирователя ускоряющей структуры.

Номинальная энергия ускоренных электронов 6 МэВ.

В качестве источника СВЧ-мощности используется магнетрон десятисантиметрового диапазона на импульсную мощность 1,8 МВт с механической перестройкой частоты, который работает в диапазоне частот 2995...3002 МГц. Точная настройка частоты магнетрона на частоту ускоряющей структуры осуществляется с помощью вводимого в резонатор магнетрона плунжера, управляемого механическим устройством подстройки частоты с электродвигателем. Общий вид ускорителя представлен на Рис.2.



Рис.2. Общий вид излучателя с локальной биологической защитой, элементами выходного коллиматора и системы кондиционирования

Для поддержания постоянной температуры ускоряющей структуры и резонаторного блока магнетрона используется теплообменник фирмы Rittal (Рис.3). Он поддерживает температуру охлаждающей жидкости на заданном уровне с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ .



Рис.3. Теплообменник ускорителя

В качестве источника электронов используется двухэлектродная электронно-оптическая система с косвенным подогревом катода.

Импульсное катодное напряжение подводится к источнику электронов от высоковольтного импульсного трансформатора.

Для стабилизации энергии и мощности дозы тормозного излучения, в наибольшей степени зависящей от согласования частоты ВЧ-колебаний, генерируемых магнетроном с резонансной частотой ускоряющей структуры, используется быстродействующая система АПЧ.

Прогрев ускоряющей структуры при включении магнетрона составляет приблизительно 30 с. До совпадения частоты магнетрона с резонансной час-

тотой ускоряющей структуры с погрешностью не более  $\pm(25...30)$  кГц, установление стабильных параметров тормозного излучения невозможно.

Локальная радиационная защита предназначена для уменьшения уровня радиации вокруг ускорителя во время его работы. Для формирования веерных пучков тормозного излучения в сторону линеек приемных детекторов используется первичный щелевой коллиматор с углом раствора  $6^\circ$ . Далее располагается вторичный коллиматор, формирующий два расходящихся под соответствующим углом веерных пучка.

Для высоковакуумной откачки ускоряющего устройства используется высоковакуумный титановый насос диодного типа НМД-0,016 производительностью 16 л/с.

В ускорителе применен линейный модулятор. Высоковольтный трехфазный трансформатор и выпрямитель размещаются в общем маслonaполненном баке. В качестве накопителя энергии и формирователя импульсов применена одинарная формирующая линия (ФЛ). Линия разряжается через тиратронный коммутатор, собранный на тиратроне ТГИ 1000/25. Используется резонансный заряд ФЛ. В цепь заряда входят зарядный трансформатор и диод, которые смонтированы в маслonaполненном баке высоковольтного выпрямителя.

Особенностью работы магнетрона является возможность внутренних искровых разрядов. При этом сопротивление нагрузки ФЛ резко снижается и имеет место ее перезаряд. Для снятия перезаряда установлена цепь, состоящая из диодов и резисторов.

Оборудование модулятора размещено во всепогодном шкафу (Рис.4) с двойными стенками. Для поддержания микроклимата внутри шкафа используется автономная система кондиционирования воздуха.



Рис.4. Модулятор линейного ускорителя

При штатной работе комплекса управление работой ускорителя осуществляется по командам центрального компьютера комплекса, связь с которым осуществляется через блок системы управления.

Блок системы управления также обеспечивает возможность работы автономно, в локальном режиме при проведении технического обслуживания излучателя.

### 3.2. БЕТАТРОН МИБ-6/9

Бетатрон МИБ-6/9 является источником тормозного излучения, способным работать в режиме дуальной энергии, и предназначен для использования в системах досмотра крупногабаритных объектов. Внешний вид бетатрона с элементами локальной защиты и системы формирования веерного выходного пучка представлен на Рис.5.

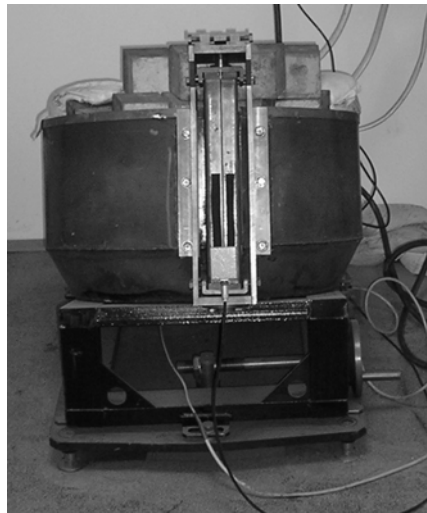


Рис.5. Бетатрон МИБ 6/9

В состав бетатрона входят:

- излучатель;
- электронный блок излучателя;
- блок питания и управления;
- выносной пульт управления.

Основные технические параметры бетатрона:

- максимальная энергия ускоренных электронов 9,0 МэВ;
- мощность дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени на оси пучка, не менее 0,2 Гр/мин;
- геометрические размеры фокусного пятна 0,2×2,5 мм;
- частота следования импульсов излучения 400 Гц;
- длительность импульса излучения на уровне 50% составляет 2...5 мкс.

### 3.3. МОДУЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРНЫЕ ЛИНЕЙКИ

Система приемных детекторов предназначена для измерения распределения остаточной интенсивности веерного пучка тормозного излучения, прошедшего в результате сканирования контролируемый объект, а также последующего преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму и передачи полученных данных в компьютер. Система приемных детекторов делится на два типа: система детекторов высокого разрешения и система детекторов высокой чувствительности. Принцип построения их идентичен. Отличие заключается в размере приемных детекторов и используемых фотодиодов.

Основными компонентами системы приемных детекторов являются:

- детекторная линейка, выполняющая функции измерения интенсивности гамма-излучения и преобразования полученных данных в цифровую форму;

– блок управления, обеспечивающий связь системы с компьютером и управление параметрами ее работы.

Детекторная линейка (ДЛ) состоит из однотипных модулей по 8 детекторных каналов в каждом. ДЛ размещается в кожухе, защищающем ее от влияния рассеянных квантов гамма-излучения и других дестабилизирующих факторов, таких как перепады температур, давления, электромагнитных помех. Измерительные элементы системы устанавливаются по линии веерного пучка.

Первичным измерительным элементом системы приемных детекторов является сцинтиллятор, который в паре с фотодиодом осуществляет преобразование интенсивности гамма-излучения в измеряемый аналоговый электрический сигнал.

Аналоговые сигналы с фотодиодов интегрируются и усиливаются предварительными усилителями. В аналого-цифровом преобразователе (АЦП) происходит преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму.

Преобразованные в цифровую форму сигналы поступают на сигнальный процессор, который обеспечивает объединение и буферизацию цифровых данных, а также передачу по протоколу RS-422 полученных данных в блок управления.

С помощью блока управления осуществляется синхронизация работы системы приемных детекторов с источником излучения (линейным ускорителем и бетатроном). Для этого на вход блока управления подается внешний синхроимпульс, опережающий импульс ускорителя на несколько микросекунд.

Общий вид детекторных модулей представлен на Рис.6.



Рис.6. Общий вид детекторных модулей

### 3.4. СИСТЕМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Система перемещения представляет собой стальную конструкцию, на которой располагается все основное технологическое оборудование комплекса. Движение осуществляется по рельсовым направляющим с помощью двух синхронно работающих электродвигателей. Система слежения движения обеспечивает равномерность и перпендикулярность перемещения портала относительно исследуемого объекта. Управление перемещением портала осуществляется с центрального пульта главного оператора комплекса.

### 3.5. АСУ КОМПЛЕКСА

Автоматизированная система управления (АСУ) комплекса предназначена для реализации оперативного контроля, обеспечения радиационной безопасности, анализа и управления технологическим процессом досмотра большегрузного транспорта и контейнеров.

Система выполняет следующие основные функции:

- автоматизированное управление технологическим оборудованием досмотрового контроля по заданному алгоритму при 24-часовой длительности работы с поддержанием установленных параметров автоматического режима;
- отображение на экране АРМ оператора системной информации о ходе досмотрового контроля и состоянии оборудования;
- предоставление по каждому сегменту управляющего контура полной информации, включающей значения параметров, управляющих воздействий, шкал приборов, аварийные и предаварийные границы;
- вывод информации об исполнении команд оператора и регистрация и оповещение об отклонениях параметров за предаварийные и аварийные границы;
- обеспечение безопасной работы персонала и фиксация действий оператора при работе с системой;
- ведение архивов параметров и событий. В архиве событий сохраняются все команды, поданные оператором с терминала, информация о срабатывании защиты и о предупреждениях;
- поддержание протокола обмена информацией с сетями верхнего уровня.

Компьютерная система управления комплекса построена по территориально-распределенному принципу на базе РС - совместимых контроллеров промышленного исполнения. Распределенный принцип построения системы позволяет значительно глубже интегрировать средства вычислительной техники в технологический процесс досмотра, приблизив мощность современных процессорных устройств к объекту управления, а также снизить затраты на кабельные коммуникации. Распределение вычислительных мощностей повышает живучесть всей системы. Перераспределение вычислительных мощностей способствует ликвидации узких мест. Появляется возможность временно исключить из сети отказавшие элементы. Наиболее критичные важные узлы легко дублируются. Принцип модульности делает отдельные элементы и узлы системы относительно независимыми и автономными, что значительно упрощает алгоритм управления системы в целом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный выше комплекс успешно прошел государственные испытания и в настоящее время находится в эксплуатации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. М.Ф. Ворогушин, Ю.Н. Гавриш, В.Л. Новиков и др. Система таможенного контроля транспортных средств и крупногабаритных контейнеров // *Вопросы атомной науки и техники. Серия*

«Электрофизическая аппаратура». 2002, в.1(27), с.42.

2. М.Ф. Ворогушин, Ю.Н. Гавриш, В.П. Багриевич и др. Новое поколение линейных ускорителей электронов для радиографии интроскопии и томографии // *Вопросы атомной науки и техники*.

Серия «Электрофизическая аппаратура». 2002, в.1(27), с.24.

*Статья поступила в редакцию 09.09.2009 г.*

### **RADIOMETRIC SYSTEM FOR INSPECTION OF LARGE-SCALE VEHICLES AND CARGOS**

*Yu.N. Gavrish, I.Yu. Vahrushin, A.V. Pavlenko, Ya.A. Berdnikov, M.B. Lebedev, E.Yu. Usachev, A.N. Peredery, M.V. Safonov, I.V. Romanov*

This System is based on the principle of radiosopic inspection of large-scale products and the method of discrimination of groups of materials with neighboring atomic numbers by using the dual-energy method. A 6 MeV linear accelerator and a 9 MeV betatron are used as sources of X-ray radiation. To increase the inspection efficiency, 3D imaging of objects by a stereo viewing system and the dual-energy method are applied.

### **ДОГЛЯДОВИЙ РАДІОМЕТРИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ І ВАНТАЖІВ**

*Ю.М. Гавриш, І.Ю. Вахрушин, А.В. Павленко, Я.А. Бердников, М.Б. Лебедєв, Є.Ю. Усачьов, А.М. Передерій, М.В. Сафонов, І.В. Романов*

В основу даного комплексу покладена ідея інтроскопічного контролю великогабаритних виробів і методика розпізнавання груп елементів із близьким атомним номером на основі використання дуальної енергії. Як джерела гальмового випромінювання використовуються лінійний прискорювач із енергією 6 МеВ і бетатрон з енергією до 9 МеВ. Для збільшення ефективності контролю використовуються тривимірне зображення об'єктів, одержуване за допомогою стереобачення, та метод дуальної енергії.