## Касьянов Станислав Валериевич

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЦИФРОВЫХ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ИСТОЧНИКОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ФОТОНОВ

Специальность: 05.11.13. - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

#### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

### Научный руководитель:

доктор технических наук, старший научный сотрудник

Сидуленко Олег Анатольевич.

#### Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Смирнов Геннадий Васильевич

кандидат технических наук, инженер

Вяткин Игорь Владимирович

#### Ведущая организация:

ФГУП "Всероссийский научно исследовательский институт авиационных материалов", г. Москва

Защита состоится <u>12.10.2010</u> в 15-00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 2, учебный корпус № 10, ауд.213

С диссертацией можно ознакомиться в научно — технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г.Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» сентября 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций кандидат технических наук, доцент

Зал. Пот Винокуров Б.Б.

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современная экономика характеризуется возрастанием потока товаров между государствами, который усиливается особым географическим Российской Федерации. положением Важной государственных органов является контроль за перемещением грузов. Важнейшее место среди технических средств досмотрового контроля занимают комплексы цифровой рентгенографии. Метод цифровой рентгенографии отличает высокая информативность, основанная на возможности визуализации структуры объекта контроля. В комплексах цифровой рентгенографии крупногабаритных объектов в качестве источника фотонов используют линейные ускорители и бетатроны. Научное обоснование, экспериментальные и опытно-конструкторские работы по созданию современных комплексов цифровой рентгенографии для применения в досмотровом контроле крупногабаритных грузов и транспортных средств являются важнейшими задачами, ЧТО подтверждает актуальность диссертационных исследований.

<u>Цель работы:</u> — теоретически обоснованное, экспериментальное подтверждение возможности создания и разработка рентгенографической системы для досмотрового контроля крупногабаритных грузов и транспортных средств с использованием малогабаритного бетатрона.

#### Основные задачи:

- исследовать пространственно-энергетические характеристики радиационного поля применительно к цифровым рентгенографическим системам с использованием источников высокоэнергетичных фотонов;
- разработать алгоритмы определения параметров рентгенографической досмотровой системы (геометрическая схема контроля, параметры и конструкция щелевого коллиматора источника излучения, параметры детекторов ионизирующего излучения, производительность контроля);
- разработать установку для проведения экспериментальных исследований
- экспериментально оценить достижимые параметры комплекса цифровой рентгенографии для досмотра крупногабаритных грузов и транспортных средств на основе малогабаритного бетатрона;
- создать опытный образец рентгенографической системы для досмотрового контроля транспортных средств.

Методы исследований основываются на физических принципах взаимодействия квантов высокоэнергетического рентгеновского излучения с веществом и их регистрации. Теоретические исследования дополнены экспериментальной проверкой полученных результатов. Анализ результатов натурных и вычислительных экспериментов проводился с помощью численных методов и статистических методов обработки экспериментальных данных.

#### Научная новизна:

- рассмотрено влияние размеров и материала радиометрических детекторов высокоэнергетического рентгеновского излучения на величину соотношения сигнал-шум;
- получено выражение, связывающее значение энергетического коэффициента

накопления высокоэнергетического рентгеновского излучения в зависимости от ширины раскрытия щелевого коллиматора;

- выполнена оценка производительности системы высокоэнергетической цифровой рентгенографии для досмотрового контроля крупногабаритных объектов и транспортных средств;
- разработаны алгоритмы выбора параметров неоднородных щелевых коллиматоров для источников высокоэнергетического рентгеновского излучения;
- экспериментально оценены возможности комплексов цифровой рентгенографии для досмотра крупногабаритных грузов и транспортных средств на основе малогабаритных бетатронов;
- создан опытный образец рентгенографической системы для досмотрового контроля транспортных средств.

<u>Практическая значимость</u> работы состоит в том, что полученные в результате диссертационных исследований аналитические выражения и алгоритмы расчета научно обосновывают проектирование, рациональный выбор и эффективную оценку параметров систем высокоэнергетической цифровой рентгенографии на основе источников фотонного излучения с максимальной энергией до 10 МэВ для досмотрового контроля крупногабаритных грузов и транспортных средств.

**Реализация результатов работы.** Результаты выполненных исследований использованы при разработке НИИ интроскопии Национального исследовательского Томского политехнического университета досмотрового комплекса и используются при чтении курса лекций для студентов электрофизического факультета Томского политехнического университета по дисциплине «Неразрушающие методы контроля». Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований на прототипе установки для цифрового рентгенографического контроля крупногабаритных объектов, использованы при разработке досмотрового комплекса, введенного в эксплуатацию в ВЧ 43753, предназначенного для контроля транспортных средств.

Апробация работы. Основные положения диссертационной обсуждались научно-технических НИИ интроскопии на семинарах Национального исследовательского Томского политехнического университета, на 17 Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» (г. Екатеринбург, 2005), на 54 научно-технической конференции Московского государственного института радиотехники, электроники автоматики (г. Москва, 2005), на 6-ой и 8-ой Международных конференциях «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» (г. Москва, 2007, 2009).

<u>Публикации.</u> Основные положения диссертации опубликованы в 14 печатных работах, из них 9 статей опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Объем диссертации составляет 128 страниц машинописного текста, в том числе 21 рисунок, 16 таблиц, 93 наименования использованных источников.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

- обоснование эффективности применения малогабаритных бетатронов для целей цифровой рентгенографии крупногабаритных объектов в реальном масштабе времени;
- результаты аналитического анализа влияния размеров и материала радиометрических детекторов высокоэнергетического рентгеновского излучения на величину отношения сигнал-шум при рентгенографическом контроле крупногабаритных объектов;
- алгоритмы выбора параметров систем цифровой рентгенографии на основе высокоэнергетических источников рентгеновского излучения для досмотрового контроля крупногабаритных объектов;
- результаты экспериментальных исследований по оценке возможностей рентгенографических систем на основе малогабаритных бетатронов применительно к досмотровому контролю крупногабаритных объектов и транспортных средств.
- структурная схема и технические характеристики опытного образца рентгенографической системы для досмотрового контроля транспортных средств.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**<u>Во введении</u>** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, определена научная и практическая ценность результатов.

<u>В первой главе</u> проведен анализ достижений в области разработки рентгенографических систем для досмотрового контроля крупногабаритных грузов. Рассмотрены принципы построения современных систем рентгенографического таможенного контроля и их характеристики.

Радиационный контроль заключается в просвечивании объекта ионизирующим излучением и получении его теневого изображения (рис.1) Для досмотра крупногабаритных грузов в качестве источников ионизирующего излучения используются радиоактивные изотопы, линейные и циклические индукционные ускорители, в том числе импульсные бетатроны. Такие источники позволяют осуществить контроль при толщине объекта 250-300 мм в стальном эквиваленте.

Излучение, прошедшее через объект контроля, регистрируется детекторами, получаемые с них сигналы преобразуются в цифровую форму и поступают в компьютер, где с помощью соответствующего программного обеспечения получают теневое изображение объекта. Полезный сигнал подвергается пространственно-временным значительным искажениям при прохождении излучения через объект контроля, приобретая большую дисперсию в связи с вероятностным характером взаимодействия излучения с веществом объекта контроля.

Основными направлениями исследований, повышающих качество и достоверность результатов цифрового рентгенографического контроля, являются: выбор оптимальных параметров излучателя, системы коллимации излучения и

системы регистрации, а также развитие методов компьютерной обработки получаемой с детекторов информации.

Во второй главе приведены примеры применения циклических индукционных ускорителей в качестве источников излучения в досмотровых системах. Также в этой главе рассматривается влияние рассеяния на качество досмотрового контроля, особенности регистрации высокоэнергетического фотонного излучения и оценивается эффективность щелевой коллимации пучка излучения при радиометрическом контроле крупногабаритных объектов.

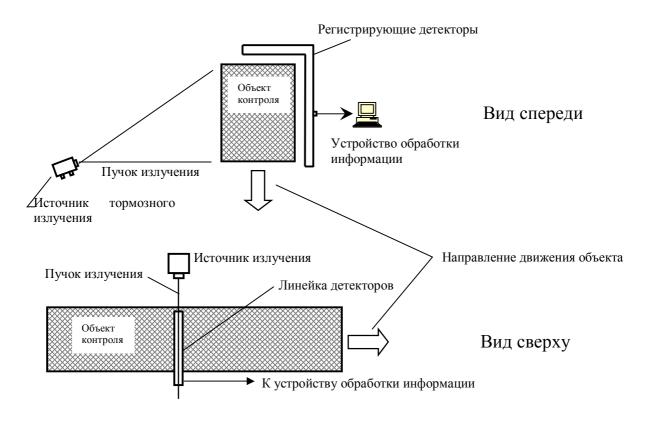


Рис. 1 Схема досмотрового контроля.

Вклад рассеянных в объекте контроля (ОК) квантов в интегральный поток регистрируемого излучения характеризуется энергетическим коэффициентом В. Исследовалась зависимость Bот параметров щелевого коллиматора источника высокоэнергетического тормозного излучения для крупногабаритного объекта контроля (линейные размеры 200-300 см по стали). Такие объекты характерны для задач досмотрового контроля. Величина Bзависит от большого числа параметров схемы контроля, к которым относятся: энергетический спектр фотонного излучения; максимальная толщина и форма ОК; эффективный атомный номер и плотность материала ОК; угловое распределение интенсивности излучения; расстояния от источника излучения до ОК и от источника излучения до линейки детекторов; размеры и материал детекторов. Коллиматоры источника излучения и блока детекторов ограничивают эффективный рассеивающий объем объекта контроля, что и приводит к уменьшению коэффициента накопления. Так как значение коэффициента накопления излучения определяется эффективным рассеивающим объемом, используется следующая характеристика коллиматора – раскрытие щели. Под раскрытием щели коллиматора следует понимать ширину поля облучения на лобовой поверхности объекта контроля (см. рис. 2). Важными характеристиками являются также эффективный атомный номер и плотность материала, из которого изготовлены коллиматоры. Выделяя наиболее важные параметры, можно, не потеряв общности, оценить эффективность применения щелевой коллимации источника излучения. Для этого, исходя из класса исследуемых объектов, принимается ряд допущений, снижающих размерность задачи:

- объект контроля состоит из материала с эффективным атомным номером 6.
- объект контроля можно считать плоскопараллельным барьером толщиной H.
- радиометрический детектор точечный, изотропный, полного поглощения.
- источник излучения мононаправленный, энергетический спектр источника тормозного излучения описывается формулой Шиффа.
- максимальная усредненная по объему объекта контроля плотность не больше  $0.3~{\rm r/cm}^3$ .

Задача оценки энергетического коэффициента накопления для щелевого коллиматора источника фотонов при допущениях становится трехпараметрической. Наиболее значимыми параметрами являются: максимальная энергия тормозного излучения —  $E_{MAX}$ ; толщина барьера из материала с эффективным атомным номером 6-H; ширина раскрытия щелевого коллиматора детектора —  $d_0$ .

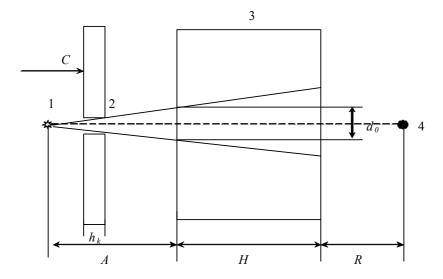
На рис. 2 приведена геометрическая схема просвечивания. С целью исследования эффективности щелевой коллимации источника излучения была проведена серия расчетов энергетических коэффициентов накопления методом Монте-Карло с локальной оценкой интенсивности рассеянного излучения.

Исследованы зависимости  $B(d_0)$  для различных максимальных энергий в диапазоне от 1 МэВ до 10 МэВ, барьер толщиной 300 см, плотность материала барьера -0, 3 г/см<sup>3</sup>, эффективный атомный номер -6. Из анализа данных следует, что для раскрытия щели менее 4 см и максимальных энергий в диапазоне от 2 до 10 МэВ вклад рассеяния в интегральный поток регистрируемого за объектом контроля излучения не превосходит 10%.

Зависимость вклада рассеяния в интегральный поток регистрируемого излучения от раскрытия щели можно описать аппроксимационной формулой:

$$B(d_0) - 1 = (B_E - 1) \cdot (1 - \exp(-c \cdot d_0)), \tag{1}$$

где c — параметр аппроксимации;  $B_{\it B}$  — коэффициент накопления в барьерной геометрии. В нашем случае параметр аппроксимации зависит только от максимальной энергии тормозного излучения. Применение эмпирической формулы (1) для оценки приборного энергетического коэффициента накопления в рассматриваемом диапазоне энергий и раскрытий щели коллиматора приводит к погрешности, не превосходящей 2 %.



Bud no C

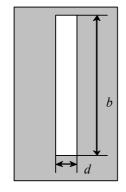


Рис. 2 Схема просвечивания:

1 – источник излучения;

2 – щелевой коллиматор;

3 – объект контроля;

4 – детектор.

Указанная зависимость (1) позволяет найти максимальное значение ширины раскрытия щели, исходя из предельно допустимого вклада излучения, рассеянного в объекте контроля, в интегральную поглощенную энергию регистрируемого излучения.

Для оценки статистических свойств измеряемых радиометрических сигналов, необходимо рассчитать эффективность регистрации и зависимость коэффициента накопления флуктуаций от размеров сцинтиллятора. Особенности регистрации высокоэнергетического фотонного излучения связаны с немоноэнергетичностью регистрируемого излучения и с тем обстоятельством, что значительная доля энергии фотонов, испытавших взаимодействие с веществом сцинтиллятора, уносится не только вторичными фотонами, но и вторичными электронами.

Измеряемый сигнал y при токовом режиме регистрации пропорционален сумме случайного числа N одинаково распределенных независимых случайных

величин 
$$E_i$$
: 
$$y = c \cdot \sum_{i=1}^{N} E_i$$
 (2)

Случайное число N распределено по закону Пуассона. Случайные величины  $E_i$  — это поглощенная энергия от i-го фотона, испытавшего взаимодействие с веществом сцинтиллятора. Коэффициент пропорциональности c является

коэффициентом усиления. Для детектора «полного поглощения» поглощенная энергия равна энергии фотона. Для фотонов с энергий большей 2 МэВ условие «полного поглощения» является практически не реализуемым. Плотность вероятности случайной величины  $E_i$  есть не что иное, как приборный энергетический спектр (спектр поглощенной энергии).

Среднее значение и дисперсия случайной величины y, формула (2) вычисляются по формулам:

$$\overline{y} = c \cdot \overline{N} \cdot \overline{E}, \qquad \sigma^2 y = c^2 \cdot \overline{N} \cdot \eta^2 \cdot \overline{E}^2,$$
 (3)

где  $\overline{N}$  — среднее значение случайной величины N;  $\overline{E}$  — среднее значение поглощенной энергии от фотона, испытавшего взаимодействие с веществом сцинтиллятора;  $\eta^2$  — коэффициент накопления флуктуаций. Из формул (2) — (3) следует, что квадрат относительной погрешности измерения случайной величины

$$y$$
 равен: 
$$\delta^2 y = \eta^2 / \overline{N}$$
 (4)

Коэффициент накопления флуктуаций  $\eta^2$  характеризует степень увеличения квадрата относительной погрешности измерения y для токового режима регистрации фотонного излучения по сравнению со счетным режимом.

Среднее значение  $\overline{N}$  для источника тормозного излучения с максимальной энергией  $E_{\max}$  и энергетическим спектром —  $f(E,E_{\max})$  для сцинтиллятора толщиной l

находится следующим образом:

$$\overline{N} = N_0 \int_{0}^{E_{\text{max}}} f(E, E_{\text{max}}) (1 - \exp(-\mu(E)l)) dE = N_0 \varepsilon(E_{\text{max}}, l),$$
 (5)

где  $N_0$  — среднее значение числа фотонов, зарегистрированных детектором полного поглощения;  $\mu(E)$  — энергетическая зависимость линейного коэффициента ослабления фотонного излучения для вещества сцинтиллятора;  $\epsilon(E_{\rm max},l)$  — эффективность регистрации тормозного излучения с максимальной энергией  $E_{\rm max}$  для сцинтиллятора толщиной l .

Проведен расчет зависимости эффективности регистрации от толщины сцинтиллятора l для различных типов сцинтилляторов, позволяющий выбрать компромиссное значение толщины сцинтиллятора, исходя из эффективности регистрации, обеспечивающей заданную производительность контроля и технологические особенности производства сцинтилляторов. Из анализа данных, следует, что для обеспечения высокой производительности контроля необходимо применять детекторы на основе сцинтилляторов CsI и  $CdWO_4$ . При толщине сцинтиллятора 25 мм эффективность регистрации в диапазоне максимальных энергий тормозного излучения от 3 до 10 МэВ для CsI составляет от 0,58 до 0,42 и от 0,73 до 0,54 для  $CdWO_4$ .

С целью анализа зависимости  $\eta_f^2(l)$ , был проведен соответствующий цикл расчетов для различных типов сцинтилляторов игольчатого типа. Функции  $\eta_f^2(l)$ 

являются убывающими. Предельные значения коэффициентов накопления флуктуаций для диапазона толщин сцинтилляторов от 5 до 30 мм отличаются друг от друга в пределах 10-30%.

В результате анализа полученных результатов установлено, что интегральное влияние утечки вторичных фотонов и электронов для детекторов с поперечными размерами  $3\times3$  мм<sup>2</sup> и более не приводит к существенному отклонению коэффициента накопления флуктуаций от предельных значений, полученных при расчетах. Расхождение составляет не более 7,5 %.

<u>Третья глава</u> посвящена оценке потенциально достижимых параметров контроля рентгенографической системы. Подробно рассмотрена оптимизация геометрической схемы контроля.

В качестве критерия оптимизации была выбрана суммарная энергия, поглощенная в слое сцинтиллятора при прохождении известного спектра излучения. Рассмотрим алгоритм оценки производительности досмотрового комплекса.

Ha рис. приведена типичная геометрическая схема контроля крупногабаритного объекта. Объект собой контроля, представляющий прямоугольную призму размерами -  $H \times H \times L$ , сканируется расходящимся пучком тормозного излучения. Будем рассматривать следующую модель регистрации высокоэнергетических фотонов. Радиометрический детектор состоит из двух перпендикулярных друг другу линеек сцинтилляционных детекторов  $a \times a \times l$ . Источник размерами фотонного излучения импульсный, немоноэнергетический, анизотропный, с углом половинного ослабления –  $\alpha$ .

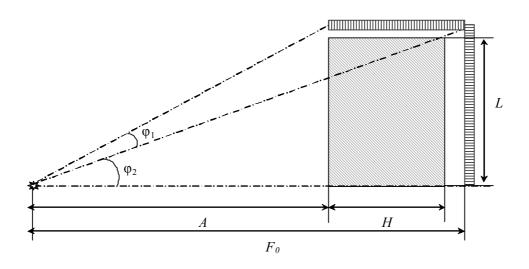


Рис. 3 Геометрическая схема контроля.

Ослабление фотонного излучения определяется двумя основными факторами: толщиной ослабляющего фильтра и расстоянием от источника излучения до точки детектирования (геометрический фактор).

Рассмотрим первый фактор. Число фотонов прошедших без ослабления объект толщиной h и зарегистрированных детектором толщиной  $h_{cu}$ 

вычисляется по формуле

$$N = N_0 \int_0^E \int_0^{\max} f(E, E_{\text{max}}) \exp(-\mu(E)h) (1 - \exp(-\mu_{cy}(E)h_{cy}) dE, \qquad (6)$$

где  $N_0$  - число зарегистрированных детектором фотонов при отсутствии объекта контроля в предположении детектора полного поглощения. Формула (6) может быть записана через приборный эффективный коэффициент ослабления тормозного излучения:

$$N = N_0 \exp(-\mu_{\phi\phi}(E_{max}, h, h_{cu})h). \tag{7}$$

Приборный эффективный линейный коэффициент ослабления излучения  $\mu_{9\phi\phi}(E_{\rm max},h,h_{c_{\rm H}})$  зависит от материала и толщины ослабляющего барьера, от материала и толщины сцинтилляционного детектора, от максимальной энергии и формы энергетического спектра источника фотонного излучения. При  $h_{c_{\rm H}} \to \infty$  (детектор полного поглощения) число частиц стремится к  $N_{\infty} = N_0 \exp(-\mu_{9\phi\phi}(E_{\rm max},h)h)$ , в данном случае  $\mu_{9\phi\phi}(E_{\rm max},h)$  - это классический эффективный линейный коэффициент ослабления тормозного излучения.

Толщина сцинтилляционного детектора, как правило, выбирается из следующего условия:

$$N(h_{cu})/N_{\infty} \le q, \quad 0 < q < 1 \tag{8}$$

, где q - эффективность регистрации тормозного излучения радиометрическим детектором, нижний уровень порога q определяется технологией производства сцинтилляторов и значением производительности контроля, задаваемой в технических условиях на проектирование радиометрического комплекса.

Была рассчитана зависимость  $N(h_{cy})/N_{\infty}$  от максимальной энергии  $E_{\rm max}$  для сцинтиллятора CsI и ослабляющего барьера из вещества с эффективным атомным номером 6 плотностью 0,3 г/см³ и толщиной 2500 мм и 500 мм. Анализ данных показал, что применение сцинтилляторов CsI толщиной менее 20 мм в рассматриваемом энергетическом диапазоне нецелесообразно, так как это приведет к потерям в производительности контроля, обусловленным уменьшением эффективности регистрации тормозного излучения (меньше 0,3).

Формула 7 с учетом геометрического ослабления и анизотропии фотонного излучения дает выражение для нахождения минимального количества частиц, регистрируемых дальними угловыми детекторами:

$$N(\alpha) = \frac{N_0 \times \sin^2(\alpha) \times a^2 \times \exp(-\mu_{\beta\phi\phi}(E_{\text{max}}, H/\cos(\alpha), h_{c\mu})H/\cos(\alpha))}{H^2}, \tag{9}$$

где  $N_{\theta}$  - число зарегистрированных детектором фотонов при отсутствии объекта контроля в предположении детектора полного поглощения,  $a \times a$  - поперечный размер апертуры детектора.

Производительность комплекса в целом будет определяться числом  $N(\alpha)$ , вычисляемым по формуле (9).

Для определения производительности контроля в конкретных случаях, для разных соотношений L/H объекта, справедливо выражение:

$$P = \min_{\left[-\varphi_1, \varphi_2\right]} \left( \exp(-\mu_{\theta\phi} H(\varphi)) \cdot f(\varphi) \cdot \cos(\varphi) / F^2(\varphi) \right), \tag{10}$$

где  $\varphi_2 = \arctan(L/(A+H))$ ;  $\varphi_1 = \arctan(L/A) - \varphi_2$ ;

$$F(\varphi) = \begin{cases} L/\sin(\varphi + \varphi_2), & \varphi \le 0; \\ (A+H)/\cos(\varphi), & \varphi > 0 \end{cases}; \ H(\varphi) = \begin{cases} L/\sin(\varphi + \varphi_2) - A/\cos(\varphi), & \varphi \le 0; \\ H/\cos(\varphi), & \varphi > 0 \end{cases}.$$

Для геометрии просвечивания, приведенной на рис. 3, была проведена серия расчетов производительности контроля по формуле 10 для различных максимальных энергий тормозного излучения и различных поперечных размеров объекта. Энергии изменяли от 1 до 10 МэВ. Размеры изменялись: H от 100 до 300 см,  $L = H \div 2H$ . Материал объекта имеет плотность 0,3 г/см<sup>3</sup> и эффективный атомный номер 6. Фокусное расстояние  $F_0$  рассчитано, исходя из значения угла половинного ослабления интенсивности излучения. В табл. 1 приведены зависимости оптимального расстояния  $A_{opt}$  от соотношения поперечных размеров объекта контроля L/H для различных максимальных энергий тормозного  $A_0 = F_0 - H$ , излучения, также указаны значения расстояний приведена эффективность использования пучка фотонного излучения.

Таблица 1. Оптимальное расстояние от источника тормозного излучения до объекта контроля толщиной  $H=300\ cm$ , плотностью материала 0,3 г/см, эффективным атомным номером материала 6 и эффективность использования

пучка тормозного излучения – отн. ед.

L/H		$E_{MAX}$ , $M$ э $B$							
L/II		1	2	4	6	7,5	10		
	$A_{opt}$ , $c$ M	0	99,6	56,6	12,4	12,1	0		
1	$A_0$ , $c$ м	0	126	217	311	403	816		
	$Э \phi \phi$ -ть, отн.ед.	1	1,06	1,41	2,07	3,01	7,23		
	$A_{opt}$ , $c$ M	113	175	109	73	76,2	10,4		
1,2	$A_0$ , $c$ м	58,3	211	321	434	544	1039		
	$Э \phi \phi$ -ть, отн.ед.	1,42	1,11	1,45	2,16	3,16	8,19		
	$A_{opt}$ , $c$ M	224	269	174	139	143	50,5		
1,4	$A_0$ , $c$ м	118	296	425	556	685	1263		
	$Э \phi \phi$ -ть, отн.ед.	1,63	1,04	1,46	2,08	3,08	8,37		
	$A_{opt}$ , $c$ M	345	320	232	203	198	104		
1,6	$A_0$ , $c$ м	177	381	528	678	825	1485		
	$Э \phi \phi$ -ть, отн.ед.	1,76	1,06	1,43	2,08	3	8		
	$A_{opt}$ , $c$ M	468	406	310	272	270	153		
1,8	$A_0$ , $c_M$	237	467	632	801	966	1709		
	$Э \phi \phi$ -ть, отн.ед.	1,86	1,02	1,45	2,19	3,03	8,33		
	$A_{opt}$ , $c_{\mathcal{M}}$	576	469	353	360	321	212		
2	$A_0$ , $c_M$	297	552	735	923	1107	1932		
	$Э \phi \phi$ -ть, отн.ед.	1,86	1,05	1,44	2,08	3,02	8,08		
2		4							

Из анализа данных, приведенных в табл. 1 можно сделать следующие выводы. Для небольших максимальных энергий (1-2 МэВ) величина  $A_{opt}$  больше или сравнима с величиной  $A_0$ . Для максимальной энергии 1 МэВ эффективность использования пучка фотонного излучения возрастает от 1 (L/H=1) с насыщением до 1,86. Для максимальной энергии 2 МэВ  $A_{opt} \approx A_0$ , эффективность не превосходит 11 %. Далее с возрастанием максимальной энергии эффективность возрастает. С возрастанием отношения L/H ( $E_{\rm max} > 4 M$ эВ), эффективность изменяется незначительно, диапазон изменения не более 10 процентов.

Анализ полученных результатов показывает, что ненадлежащий выбор расстояния от источника излучения до объекта контроля для радиометрических досмотровых комплексов на основе источников тормозного излучения максимальной энергией от 4 до 10 МэВ приводит к существенному увеличению времени контроля. Увеличение времени контроля составит от 1,44 раза для энергии 4 МэВ и до 8 раз для энергии 10 МэВ

Также в главе определяются параметры коллиматоров источника излучения. Толщина выбирается, исходя из двух критериев. Первый критерий основан на представлении поверхности щелевого коллиматора, расположенной со стороны объекта контроля, в качестве источника вторичного фотонного излучения. Вклад этого источника в суммарную интенсивность регистрируемого излучения должен быть незначительным, на практике достаточно ограничить порог 10 %. Для второго критерия толщина коллиматора рассчитывалась с учетом того, что персонал категории «А» пребывает в помещениях досмотрового комплекса не более четверти рабочего времени,  $P_{\rm max} = 56\,{\rm mk}\,3{\rm B}/{\rm чаc}$ .

В табл. 2 приведены результаты расчетов минимальных значений толщины коллиматора, удовлетворяющих первому и второму критериям. Вклад рассеяния в интегральный поток регистрируемого излучения не превосходит 0,1 для первого критерия.

Таблица 2. Толщина коллиматора, мм; в числителе для первого критерия; в

знаменателе для второго критерия.

Материал	$E_{\rm max}$ , M $ m B$						
With Commission	1	2	4	6	7,5	10	
Fe	<u>195</u>	<u>263</u>	<u>321</u>	<u>337</u>	<u>338</u>	331 321	
1.6	138	180	247	268	275	321	
Pb	<u>108</u>	<u>163</u>	<u>169</u>	<u>155</u>	<u>145</u>	135 137	
ΓU	62,8	119	159	154	147	137	
W	<u>65,9</u>	<u>97,6</u>	<u>10,4</u>	94,6	<u>89,2</u>	82,4 78,9	
VV	42,0	73,4	93,2	89,6	85,7	78,9	

Наиболее предпочтительным является коллиматор из вольфрама, однако следует помнить о сложности его механической обработки и высокой цене самого материала. Рассмотрен компромиссный вариант — составной коллиматор из

свинца с коллимационной вставкой из вольфрама.

В завершении главы рассматриваются геометрические схемы сканирования для частных случаев контроля крупногабаритных объектов - рентгенографии и радиометрии объектов большого диаметра.

В совокупности факторов, улучшение параметров рентгенографической системы контроля крупногабаритных объектов достигается следующими действиями:

- повышением интенсивности источника
- оптимизацией геометрической схемы радиометрического контроля
- увеличением угла незатененного пучка излучения
- усовершенствованием системы коллиматоров
- увеличением апертуры детекторов
- повышением эффективности регистрации излучения
- улучшением методов обработки получаемых изображений

После моделирования проведенного И оптимизации параметров рентгенографической системы контроля, были определены предварительные требования к eë отдельным составляющим, что позволило перейти к практической части исследований. В четвертой главе описаны системы цифровой рентгенографии, разработанные и собранные при участии автора работы. Первая система представляет собой установку экспериментальных исследований. Основное её назначение – исследование характеристик излучателей и детекторов. Схема экспериментальной установки, моделирующей фрагмент досмотровой системы, приведена на рис.4, и состоит из следующих основных блоков:

- Излучатель бетатрона МИБ 7.5 с коллиматором
- Устройство для перемещения объекта контроля диапазоном изменения скорости от 0.02 до 0.15 м/сек.
  - Детекторный модуль.
  - Компьютер с соответствующим программным обеспечением.

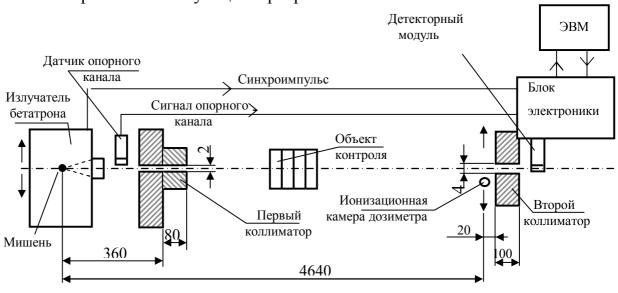


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

На данной экспериментальной установке произведены экспериментальные исследования:

- 1. Определение дисперсии выходного излучения источника. Величина среднеквадратичного отклонения интенсивности излучения составляла не более 5 %
- 2. Определены рентгеночувствительности различных типов детекторов. Рентгеночувствительность детектора типа сцинтиллятор CsI(Tl)+ фотодиод составила 1226 нK /( $P \cdot cm^3$ ), детектора типа сцинтиллятор CdWO<sub>4</sub> + фотодиод 980 нK /( $P \cdot cm^3$ ) полупроводникового (GaAs) 4500 нK /( $P \cdot cm^3$ )
  - 3. Определение зависимости дисперсии сигнала от толщины поглотителя.

Дисперсия сигналов с радиометрических детекторов типа сцинтиллятор CsI(Tl) размерами 6x6x20мм<sup>3</sup> + кремниевый PIN - фотодиод за стальным поглотителем приведена в таблице 3:

$\Delta_{\text{стали}}$ ,мм	σ <sub>изм</sub> .,%
0	5.2
50	6.5
100	11.0
150	18.0
210	24.6

Таблица 3. Относительное среднеквадратичное отклонение оцифрованного радиометрического сигнала с детектора для различных толщин стального поглотителя.

В таблице 4 приведено количество отсчетов сигнала, необходимое для получения чувствительности 5 % при различной толщине поглотителя.

Таблица 4. Число импульсов накопления для разной толщины стального поглотителя:

$\Delta$ ,MM	20	30	50	100	120	150	180	200	210
N	9.4	5.8	4.4	5.6	6.3	9.0	9.7	10.3	11.6

В результате предварительных экспериментов, проведенных на экспериментальной установке, и сопоставления полученных результатов с теоретическими результатами, были определены оптимальные параметры источника излучения и детекторов, схема сканирования и требования к производительности и безопасности системы, сформулировано техническое изготовление 64 канального детекторного радиометрическими детекторам типа сцинтиллятор CsI(Tl) размерами 6х6х20мм<sup>3</sup> + кремниевый PIN - фотодиод. Использование этого модуля позволило получить изображения крупногабаритных объектов (рис. 5) и определить основные характеристики рентгенографической системы:

- 1. Пространственное разрешение в направлении сканирования 5 мм.
- 2. Чувствительность 3% при скорости сканирования 0.05 м/сек.
- 3. Реальная проницаемость по стали около 200 мм.
- 4. Для соотношения сигнал/шум 3/1 динамический диапазон всей системы составляет 1820.

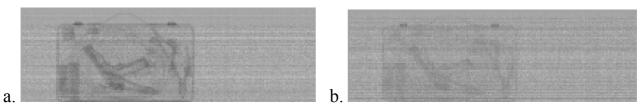


Рис. 5. Рентгенографические изображения: а. поглотитель 150 мм, b. поглотитель 210 мм

Производительность контроля можно было определить по качеству изображения при сканировании объекта контроля на различных скоростях. Максимальная контрастная чувствительность 3% регистрировалась при скорости 5.5 см/с.

Проведен ряд экспериментов с 16-канальным полупроводниковым арсенидогаллиевым детектором с размерами кристалла 1×1,2×20 мм<sup>3</sup>. Детекторы этого типа в силу особенностей технологического процесса их производства имеют недостаточный объем для применения в радиометрических системах контроля, обеспечивающих проникновение по стали более 100 мм, но тем не менее, представляют большой интерес для использования в цифровой рентгенографии.

На заключительном этапе была создана система контроля крупногабаритных объектов с использованием бетатрона в качестве источника фотонного излучения. На данной рентгенографической установке получены следующие характеристики:

- 1. Проницаемость по стали до 250 мм.
- 2. Чувствительность по стальной проволоке 0.8 мм.
- 3. Дефектоскопическая чувствительность по клину 3% (за сталью толщиной 100мм).
- 4. Чувствительность по проволочному кольцу толщиной 6 мм (кольцо из стальной проволоки 6мм радиуса 100мм различимо за стальным поглотителем толшиной 100 мм.
- 5. Скорость сканирования, при которой гарантируется достижение предельных параметров, 0.2 м/сек.

На рисунке 6 представлено изображение транспортного средства, полученное на данной рентгенографической системе контроля.

По сравнению с результатами, полученными на экспериментальной 64 - канальной установке рентгеновского контроля, достигнуты улучшения следующих параметров: пространственного разрешения в связи с геометрическим увеличением; проницаемости по стали; скорости сканирования - за счет уменьшения вклада рассеянного излучения, которое, во-первых, существенно

уменьшается за счет помещения бетатрона в свинцовый контейнер биологической защиты, во-вторых, помещение, в котором расположен прототип досмотровой системы гораздо больше того, где расположен 64 — канальная экспериментальная установка, следовательно, вклад рассеянного излучения в общий сигнал намного меньше.

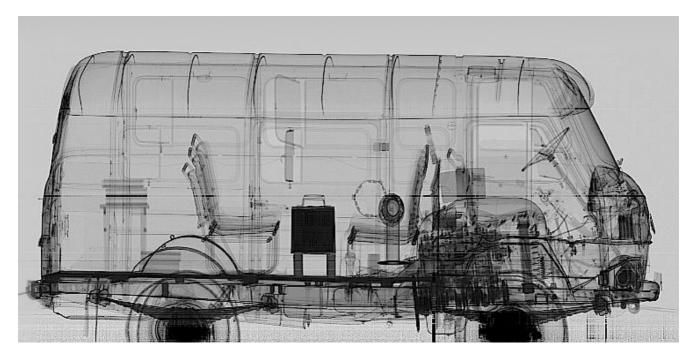


Рис.6 Рентгенографическое изображение, результат просвечивания автомобиля с тестовым объектом (сталь толщиной 200мм). Измеренная дефектоскопическая чувствительность по клину 3%.

В <u>заключении</u> рассмотрены перспективы применения результатов диссертационной работы и определены дальнейшие направления исследований.

По мнению большинства разработчиков, основным недостатком бетатрона при использовании его в рентгенографических системах контроля является невысокая интенсивность излучения, что влечет за собой необходимость применять детекторы со сцинтилляторами большого объема и делать усреднение сигнала по большому отсчетов, что сказывается на потоковой производительности досмотрового комплекса. Однако, современные математические методы обработки изображений позволяют улучшить пространственное разрешение ДЛЯ досматриваемых объектов до приемлемых значений. В то же время непосредственно сканирования транспортного средства на порядок меньше общего времени процедуры досмотра, и на производительность комплекса влияет несущественно. Для получения качественного теневого изображения объекта длиной порядка 20 м время сканирования варьируется в пределах 1-2 минуты для линейного ускорителя и 2 - 3 минуты для бетатрона.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что бетатрон является одним из наиболее предпочтительных источников излучения для применения в мобильных и передвижных досмотровых комплексах.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение эффективности регистрации детекторов фотонного излучения высоких энергий, увеличение

динамического диапазона детекторного модуля, внедрение новых методов обработки получаемых изображений. Планируется развить теоретическую и экспериментальную базу для разработки радиометрических и рентгенографических систем контроля, использующих метод дуальных энергий. Все эти меры позволят совершенствовать методы радиационного контроля крупногабаритных объектов при применении их в рентгенографическом контроле транспортных средств.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1. Разработан алгоритм оптимизации параметров рентгенографических досмотровых систем.
- 2. Определены технические требования к отдельным компонентам досмотровой системы к источнику излучения, системе коллимации пучка, детекторному модулю.
- 3. Получены закономерности, позволяющие оценить предельное значение производительности досмотрового контроля крупногабаритных объектов на основе источников высокоэнергетического фотонного излучения.
- 4. Получена закономерность, связывающая величину энергетического коэффициента накопления с раскрытием щели для щелевого коллиматора высокоэнергетического фотонного излучения.
- 5. Разработан алгоритм, позволяющий выбрать параметры геометрической схемы рентгенографического контроля крупногабаритных объектов.
- 6. Создана экспериментальная установка для проведения экспериментов по определению достижимых дефектоскопических характеристик и возможностей разрабатываемой системы досмотра транспортных средств.
- 7. Создан действующий образец рентгенографической досмотровой системы на основе бетатрона на энергию 5 МэВ в качестве источника излучения, получены изображения крупногабаритных объектов, при этом достигнуты предполагаемые дефектоскопические характеристики.
- 8. Теоретически и практически обоснована эффективность применения бетатрона в качестве источника фотонов в рентгенографической системе контроля крупногабаритных объектов.

# <u>ПУБЛИКАЦИИ.</u> Основное содержание диссертации изложено в следующих печатных работах:

- 1. Касьянов В. А., Касьянов С. В., Осипов С. П. Оптимизация геометрической схемы радиометрического контроля крупногабаритных объектов. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. − 2005. − №11 − с.62 63.
- 2. Сидуленко О.А., Касьянов В. А., Касьянов С. В., Осипов С.П. Методика оценки производительности досмотрового комплекса для контроля крупногабаритных объектов. // Контроль. Диагностика. -2005. -№12 C. 34, 39 -42.
- 3. Сидуленко О. А., Касьянов В. А., Касьянов С. В., Осипов С. П. Оценка эффективности щелевой коллимации высокоэнергетического источника

- излучения при радиометрическом контроле крупногабаритных объектов. // Дефектоскопия.  $-2006. N \cdot 2 C.40 45.$
- 4. Касьянов В. А., Касьянов С. В., Осипов С. П. Особенности регистрации высокоэнергетического тормозного излучения в досмотровом контроле. // Датчики и Системы. -2005. N = 12 C. 10 13.
- 5. Недавний О. И., Осипов С. П., Касьянов С. В. Эффекты маскировки и демаскировки локальных включений в досмотровом контроле. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.  $-2007. \mathbb{N}9 c.50 53.$
- 6. Сидуленко О. А., Касьянов В. А., Касьянов С. В., Осипов С. П. Исследование возможности применения малогабаритных бетатронов для идентификации веществ объектов контроля методом дуальных энергий// Контроль. Диагностика. 2008. N 9.
- 7. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Осипов С.П., Касьянов С.В. Щелевые и пинхольные коллиматоры в цифровой рентгенографии// Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.  $-2007. \text{N}_{\text{\tiny 2}} 3. \text{c.}62$  64.
- 8. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Осипов С.П., Касьянов С.В. Выбор параметров щелевых коллиматоров для формирования узких пучков высокоэнергетического рентгеновского излучения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.  $2009. N \ge 8$ .
- 9. Касьянов С.В. Применение бетатронов в радиографических досмотровых системах //Известия Томского политехнического университета. 2008 Т. 312, № 2 (Приложение). с. 134-138
- 10. Чахлов С.В., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Чумаков Д.М., Андрияанов М.В., Усачев Е.Ю., Лебедев М.Б. Макет установки для рентгеновского контроля крупногабаритных объектов //Труды 54 научно-технической конференции МИРЭА (Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) Москва, 16-25 мая 2005г. Москва: МИРЭА, 2005. с. 46
- 11. Лебедев М.Б., Усачев Е.Ю., Чумаков Д.М., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Сидуленко О.А., Штейн М.М., Чахлов С.В. Установка для рентгеновского контроля крупногабаритных объектов (грузовых и легковых автомобилей, контейнеров для морских и авиаперевозок) //Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Материалы 6-ой Международной конференции Москва, 15-17 мая 2007. М.: Машиностроение, 2007. с. 69-71
- 12. Сидуленко О.А. ,Касьянов В.А., Касьянов С.В., Осипов С.П. Выбор и оценка параметров систем досмотрового контроля крупногабаритных объектов //Неразрушающий контроль и диагностика. Материалы XVII Российской научнотехнической конференции г. Екатеринбург, 2005 г.. г. Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, ISBN 5-7691-1648-X, 2005. с. 219
- 13. Касьянов В.А., Касьянов С.В., Токач Е.Ф., Чахлов В.Л., Чахлов С.В., Штейн М.М., Усачев Е.Ю., Лебедев М.Б., Чумаков Д.М. Применение бетатронов в комплексах радиометрического контроля крупногабаритных объектов. //Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Сборник материалов 8-ой международной конференции Москва, СК «Олимпийский». 18-20 марта 2009. Москва: Издательский дом. 2009. с. 60-64 (68478039)

14. I.I. Nadreev, S.V. Kasyanov, S.A. Ryabcov, O.P. Tolbanov, A.V. Tyazhev. The detection block for systems of nondestroying testing based on the GaAs detectors //Proceeding of IEEE International Siberian conference on control and communications "SIBCON 2005". 21-22 October, Tomsk, Russia.