

На правах рукописи

Недавний Игорь Олегович

**РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ ГАММА-КОНТРОЛЬ
БИНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ»**

**05.11.13 - приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск-2006

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА В ТОМСКОМ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Научный руководитель

доктор технических наук

Сидуленко Олег

Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Смирнов Геннадий

Васильевич

кандидат технических наук

Вяткин

Игорь Владимирович

Ведущая организация

Алтайский государственный

технический университет

им. И.И. Ползунова

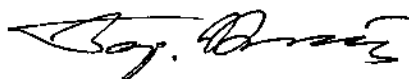
Защита состоится 26 декабря 2006 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 в Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Савиных, 7, корпус 18, аудитория 211.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан « » ноября 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Винокуров Б.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Современная тенденция к увеличению объема и номенклатуры практического использования бинарных объектов, несомненно сохранится и в будущем. Это объясняется тем, что в изделиях конструкционного назначения для обеспечения максимально возможного срока их службы и снижения эксплуатационных затрат в ряде случаев первостепенную роль играет качество покрытий. Традиционным сейчас и неизбежным в будущем является использование минералорганических композитов и их аналогов. В связи с этим актуальным является разработка новых и усовершенствование существующих методов и реализующих эти методы средств радиометрического контроля бинарных объектов как в геометрии «на просвет», так и в геометрии одностороннего доступа к исследуемому изделию.

Работа выполнена в рамках тематического плана научно-исследовательских работ ФГНУ НИИ интроскопии и Томского политехнического университета, к которому автор данной диссертации прикреплен в качестве соискателя.

Объект исследования – радиометрический гамма-контроль бинарных объектов.

Предмет исследования – закономерности формирования радиометрической информации при контроле бинарных объектов и алгоритмы ее обработки.

Цель диссертационной работы состоит в разработке алгоритмов функционирования и структурных схем радиометрических устройств гамма-контроля, оптимизированных по критерию минимума влияния одного из компонентов бинарного объекта на определяемые количественные характеристики второго компонента.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Исследовать информационные характеристики способов трансмиссионного гамма-контроля покрытий с использованием двух энергетических линий, в том числе линии рентгенофлуоресцентного излучения покрытия.
2. Исследовать возможность определения соотношения ингредиентов композитов двухэнергетическим трансмиссионным методом.

3. Исследовать возможность минимизации параметров основы (подложки) на результат определения толщины покрытия при альбедном рентгенофлуоресцентном контроле.

4. Определить направления дальнейших работ в развитие тематики диссертационных исследований.

Методология работы. Исследования выполнены на основе использования фундаментальных констант и положений в области взаимодействия гамма-излучения с веществом. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием прецизионного измерительного оборудования для ядерно-физических исследований и излучающих устройств в лабораториях НИИ интроскопии, что обеспечило необходимую достоверность полученных результатов.

Научная новизна работы характеризуется следующими научными результатами, полученными лично автором.

1. Получена совокупность математических соотношений для анализа алгоритмов формирования и обработки радиометрической информации применительно к задаче повышения достоверности неразрушающего гамма-контроля бинарных объектов.

2. Разработаны способы и структурные схемы приборов трансмиссионного контроля толщины покрытия, основанные на совместном использовании информации потоков гамма-квантов различных энергий, в том числе потоков гамма-квантов рентгенофлуоресцентного излучения.

3. Решена задача по нахождению условий, при которых исключается влияние основы (подложки) на результат альбедного рентгенофлуоресцентного контроля толщины покрытия.

Практическая значимость работы состоит:

- в получении научно-обоснованных данных для совершенствования способов и разработки средств неразрушающего радиометрического контроля бинарных объектов с повышенной достоверностью получаемых результатов.

- в развитии теоретических положений в области радиометрического контроля и получении новых знаний об информативных характеристиках системы «источник гамма-квантов - бинарный объект-детектор».

Реализация результатов работы. Результаты работы в части, относящейся к контролю бинарных смесей, использованы при выполнении научно-

исследовательских работ Московским автомобильно-дорожным институтом (МАДИ-ГТУ).

Материал диссертационных исследований используется в Томском политехническом университете при обучении студентов по специальности 190200 – «Методы и приборы контроля качества и диагностики» и подготовке бакалавров и магистров по направлению 551000 – «Приборостроение».

Личный вклад диссертанта состоит:

- в получении совокупности математических соотношений для их реализации в алгоритмах функционирования приборов гамма-контроля бинарных объектов;
- в разработке структурных схем трансмиссионных радиометров с повышенным уровнем надежности результатов контроля толщины покрытий;
- в совершенствовании альбедного гамма-толщиномера покрытий, осуществленном по критерию минимизации влияния параметров основы на результат измерения;
- в разработке технических решений, выполненных без соавторов (пять полезных моделей) и научном обосновании технических решений, выполненных в соавторстве (семь полезных моделей);
- в определении направлений дальнейшего развития диссертационных исследований.

На защиту выносятся:

- алгоритмы формирования и обработки радиометрической информации о подлежащих контролю параметрах бинарных смесей и объектов;
- способы и средства снижения влияния параметров основы на результат контроля покрытий при одностороннем и двухстороннем доступе к исследуемому изделию;
- структурные схемы и характеристики приборов гамма-контроля покрытий;
- предложения по дальнейшему развитию тематики диссертационных исследований.

Публикации.

По материалам диссертационных исследований пять статей с соавторами опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК. Три статьи с соавторами опубликованы в сборниках научных трудов Московского автомобильно-дорожного университета. Две публикации без соавторов осуществлены в материалах Международных научно-практических конференций. Сущность разработок,

выполненных на основе диссертационных исследований, раскрыта в описаниях двенадцати полезных моделей. Всего по теме диссертации имеется 22 публикации.

Апробация работы.

Материал диссертации обсужден на одиннадцатой и двенадцатой конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск) и на научных семинарах НИИ интроскопии и кафедры «Приборы и методы контроля качества и диагностики» Томского политехнического университета.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 134 наименований и приложения. Она содержит 36 рисунков и 7 таблиц. Общий объем работы 174 страницы.

Автор благодарит научного руководителя д.т.н. Сидуленко О.А., соавторов публикаций Забродского В.А., Осипова С.П., Удоды В.А., Метеля А.А. и сотрудников НИИ интроскопии и кафедры физических методов и приборов контроля качества ТПУ, оказавших содействие в выполнении данной работы.

По вопросам, относящимся к процессам взаимодействия гамма-излучения с веществом, научными консультантами являлись к.т.н. Забродский В.А. и к.т.н. Осипов С.П.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации на основе анализа научно-технической литературы и изучения теоретических и практических разработок в области радиометрических методов контроля установлена объективная необходимость достижения цели и решения задач исследований, сформулированных во введении. Отмечена роль научных коллективов и персонально ученых, внесших свой вклад в развитие этих методов. Применительно к тематике запланированных исследований в части, относящейся к альбедному контролю покрытий, значительных успехов достигли коллективы НИИ интроскопии (Капранов Б.И., Забродский В.А., Сидуленко О.А.) и конструкторского бюро машиностроения им. Макеева (Кутаев Ю.М., Бобков В.Г., Конев А.В.). Ими детально исследованы информационные возможности эффекта рентгеновской флуоресценции и установлено влияние

подложки (основы изделия) на достоверность результатов контроля экранно-защитных покрытий. Это влияние проявляется за счет следующих факторов:

1. Рассеянные в подложке гамма-кванты вследствие конечного энергетического разрешения детектора частично попадают в реперный канал, смещая уровень стабилизации, и в счетный канал квантов рентгенофлуоресцентного излучения, смещая оценку толщины покрытия в сторону большего значения;

2. Рассеянные в подложке гамма-кванты, энергия которых превышает энергию К-края поглощения элементов покрытия, возбуждают эти элементы, также смещая оценку толщины покрытия в сторону большего значения.

Отрицательное воздействие этих факторов оценено и разработан алгоритм обработки радиометрической информации, предусматривающий введение соответствующей поправки. Однако, ранее не был рассмотрен и учтен эффект обратного рассеяния в основе рентгенофлуоресцентного излучения покрытия, что не обеспечивает предельный уровень снижения влияния параметров основы на результат контроля.

Методологические основы трансмиссионных методов радиометрического контроля развиты трудами научной школы члена-корреспондента РАН Ключева В.В., НИИ интроскопии, г. Москва (Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. и др.), Всесоюзного научно-исследовательского института радиационной техники, г. Москва (Кузелев Н.С., Фирстов В.Г. и др.), НИИ интроскопии и Томского политехнического университета, г. Томск (Горбунов В.И., Чахлов В.Л., Воробьев В.А. и др.), НИХТИ, г. Люберцы (Гончаров В.И., Филичев С.П. и др.), НПО «Алтай», г. Бийск (Ворожцов В.А. и др.) и ряда других организаций. Большой вклад в становление научной школы в области неразрушающего радиационного контроля внес С.В. Румянцев.

Соответственно, опубликованы серьезные научные труды и справочники, являющиеся методологическими и научно-практическими пособиями для проектирования трансмиссионных радиометрических систем контроля.

Вместе с тем, научно-практические исследования применительно к трансмиссионному радиометрическому контролю бинарных объектов требуют своего дальнейшего развития. Более того, возможности трансмиссионного гамма-контроля систем «покрытие-основа», являющихся частным случаем бинарных

объектов, исследованы явно недостаточно. Поэтому вторая глава диссертации, посвященная трансмиссионному контролю, является наиболее представительной.

На первом этапе работы исследованы вопросы, относящиеся к трансмиссионному гамма-контролю ингредиентов в бинарной среде.

Так, для контроля бинарных объектов, представляющих собой ткань из углерода или стекловолокна, пропитанную эпоксидным компаундом, использован принцип измерения прошедших через исследуемый объект неодинаковых по значению энергии квантов гамма-излучения. Энергии подбираются таким образом, чтобы в процессе взаимодействия гамма-квантов первой энергии существенную роль играли фотоэффект и когерентное рассеяние, а второй энергии – только некогерентное рассеяние. Оптимизируемым параметром в этом случае является доля гамма-квантов первой энергии в суммарной интенсивности – α . Пусть $\mu_{1\text{тк}}, \mu_{1\text{пр}}$ – массовые коэффициенты ослабления излучения первой энергии (меньшей) для вещества тканевой основы и пропиточного вещества, а $\mu_{2\text{тк}}, \mu_{2\text{пр}}$ – массовые коэффициенты ослабления излучения второй (большей) энергии. Тогда коэффициент α находится из условия:

$$\alpha = \left(\mu_{2\text{пр}} - \mu_{2\text{тк}} \right) / \left(\mu_{1\text{тк}} - \mu_{2\text{тк}} - \mu_{1\text{пр}} + \mu_{2\text{пр}} \right). \quad (1)$$

Оценить, как изменение вещественного состава влияет на величину коэффициента α можно только для конкретных энергий. В качестве примера рассмотрен комбинированный источник (Am-241+Ba-133), энергетическая линия америция ~60 кэВ, а бария – 303 кэВ. Для стекловолокна, состоящего из 96% SiO₂ и 4% FeO₃ и эпоксидного связующего значение α равно 0,0632, а для стекловолокна из чистого оксида кремния $\alpha = 0,0947$. Если использовать в качестве энергетического веса первой линии среднее значение коэффициентов, то остаточная погрешность измерения весовой доли пропитки не превысит 0,8%. Это означает, что предлагаемый способ существенно снижает погрешность, вызванную отклонением в элементном составе стекловолокна.

Применительно к контролю битумопесчаной смеси наиболее перспективными источниками гамма-излучения являются: Eu-155, с периодом полураспада 1,81 года, энергетическими линиями 41 кэВ, 86 кэВ, 105 кэВ; Ti – 44, с периодом полураспада 47,3 года, энергетическими линиями 67,8 кэВ, 78,4 кэВ; Am – 241, с периодом полураспада 45,8 года, основная энергетическая линия – 59,5 кэВ.

Уравнение для нахождения весовой доли W_B битума в смеси имеет вид:

$$W_A = \left(\mu_{1\Gamma} - \psi \mu_{2\Gamma} \right) / \left(\mu_{1\Gamma} - \mu_{1A} - \psi (\mu_{2\Gamma} - \mu_{2A}) \right), \quad (2)$$

где $\psi = \ln(N_1/N_0) / \ln(N_2/N_0)$, причем $\mu_{1\Gamma}, \mu_{2\Gamma}$ - коэффициенты ослабления гамма-квантов с первой и второй энергией для песка; μ_{1A}, μ_{2A} - аналогичные коэффициенты для битума; $N_0/N_1, N_0/N_2$ - величина измеренного ослабления потока гамма-квантов с первой и второй энергией.

Эффективность двухэнергетического трансмиссионного гамма-контроля подтверждена методом математического моделирования и для случая бинарных объектов в виде среды с флуктуирующим атомным номером Z , включающую в себя инородные фрагменты.

Для бинарной системы «покрытие-основа» сопоставление способов трансмиссионного гамма-контроля выполнено, исходя из критерия минимума влияния толщины основы h_0 на надежность результатов контроля толщины покрытия h_1 .

Диссертантом разработана структурная схема толщиномера покрытия, в основу которого положен принцип сопоставления сигналов, соответствующих различным энергетическим линиям, и предварительным возведением одного из них в степень $k_1 = \mu_{01}/\mu_{02}$ или $k_2 = \mu_{02}/\mu_{01}$, μ_{01} и μ_{02} - соответственно линейные коэффициенты ослабления излучения с первой и второй энергиями гамма-квантов для материала основы. При таком алгоритме обработки радиометрической информации исключается влияние параметров основы на результат определения значения h_1 . Данному алгоритму эквивалентен алгоритм, основанный на применении логарифмических преобразователей двух сигналов и блока умножения прологарифмированного значения одного из сигналов детектора на величину, равную отношению значений линейного коэффициента ослабления излучения для материала основы (подложки) при одной энергии гамма-квантов и линейного коэффициента ослабления излучения для материала основы (подложки) при другой энергии гамма-квантов.

В этом случае для двухэнергетического излучателя:

$$F_1 = \ln N_{01}/N_1 = \mu_{n1} h_n + \mu_{01} h_0, \quad (3)$$

$$F_2 = \ln N_{02}/N_2 = \mu_{n2} h_n + \mu_{02} h_0, \quad (4)$$

где N_{01} , N_1 – поток гамма-квантов с первой энергией при отсутствии и наличии контролируемого изделия; N_{02} , N_2 – поток гамма-квантов со второй энергией при отсутствии и наличии контролируемого изделия; $\mu_{п1}$, μ_{01} – линейный коэффициент ослабления излучения для материала покрытия и основы и первой энергии гамма-квантов; $\mu_{п2}$, μ_{02} – линейный коэффициент ослабления излучения для материала покрытия и основы и второй энергии гамма-квантов.

Если преобразовывать сигнал, соответствующий (3), то

$$F_3 = F_1 \mu_{02}/\mu_{01} = \mu_{02}\mu_{п1}h_{п}/\mu_{01} + \mu_{02}h_0. \quad (5)$$

Соответственно

$$F_4 = F_3 - F_2 = (\mu_{02}\mu_{п1}/\mu_{01} - \mu_{п2})h_{п}. \quad (6)$$

Если преобразовывать сигнал, соответствующий (4), имеем

$$F_5 = F_2 \mu_{01}/\mu_{02} = \mu_{01}\mu_{п2}h_{п}/\mu_{02} + \mu_{01}h_0. \quad (7)$$

Тогда

$$F_6 = F_5 - F_1 = (\mu_{01}\mu_{п2}/\mu_{02} - \mu_{п1})h_{п}. \quad (8)$$

То есть, и этот алгоритм обработки информации обеспечивает независимость результатов контроля толщины покрытия от параметров основы. Использование делителя, настроенного на получение результата $F_4/(\mu_{02}\mu_{п1}/\mu_{01} - \mu_{п2})$, либо $F_6/(\mu_{01}\mu_{п2}/\mu_{02} - \mu_{п1})$, обеспечивает представление результата в единицах измеряемой физической величины непосредственно в процессе измерения.

Аналогичный алгоритм целесообразен также при использовании моноэнергетического источника и регистрации как потока первичных гамма-квантов, так и потока гамма-квантов рентгенофлуоресцентного излучения покрытия.

При сопоставлении радиометрической информации первичного и рентгенофлуоресцентного излучений в случае просвечивания композита со стороны основы имеет место особенность метода, позволяющая исключить из структуры прибора блок умножения и осуществление сопутствующих процедур, связанных с наличием этого блока. Эта особенность состоит в том, что рентгенофлуоресцентное излучение покрытия возбуждается первичным излучением источника, уже прошедшим через основу (подложку). То есть функция переноса излучения через основу (подложку) как при измерении потока гамма-квантов источника, так и при измерении потока гамма-квантов

рентгенофлуоресцентного излучения имеет вид $\exp(-\mu_0 h_0)$, в то время как для геометрии «источник-покрытие-основа» функция переноса излучения через основу (подложку) при измерении потока гамма-квантов источника имеет вид $\exp(-\mu_0 h_0)$, а функция переноса излучения через основу (подложку) при измерении потока гамма-квантов рентгенофлуоресцентного излучения имеет вид $\exp(-\mu_{\delta.\delta.0} h_0)$.

В соответствии с изложенным имеем:

$$F_7 = \ln N_1 / N_0 = -\mu_i h_i - \mu_0 h_0 \quad (9)$$

и

$$F_8 = \ln (N_{\delta.\delta.i} / N_0) = \ln \left\{ \tilde{N} \left[\exp(-\mu_{\delta.\delta.i} h_i) - \exp(-\mu_i h_i) \right] \right\} - \mu_0 h_0, \quad (10)$$

где C – коэффициент преобразования числа гамма-квантов излучения источника в число квантов рентгенофлуоресцентного излучения покрытия, распространяющихся в направлении детектора.

Выполнив процедуру вычитания сигналов, получим

$$F_9 = F_8 - F_7 = \ln \left\{ C \left[\exp(-\mu_{p.f.p} h_p) - \exp(-\mu_p h_p) \right] \right\} + \mu_p h_p, \quad (11)$$

то есть передаточную характеристику трансмиссионного гамма-толщиномера покрытий, не зависящую от параметров основы.

Следует отметить, что в случае, когда вкладом рассеянного излучения можно пренебречь, алгоритмы формирования и обработки радиометрической информации при контроле покрытий применимы и для контроля соотношения компонентов в бинарном композите. В этих формулах индексы $\mu_{п1}$, $\mu_{п2}$ следует заменить на индексы μ_{11} , μ_{12} – коэффициенты ослабления излучения первой и второй энергетической линии источника для первого компонента композита, а μ_{01} , μ_{02} – на μ_{21} , μ_{22} – коэффициенты ослабления излучения первой и второй энергетической линии для второго компонента композита.

Третья глава диссертации посвящена рентгенофлуоресцентному контролю покрытий в геометрии одностороннего доступа к исследуемому объекту.

Рис. 1. Иллюстрирует структурную схему прибора, основанную на дальнейшем развитии ранее использованной в разработках НИИ интроскопии

(г. Томск) и КБ машиностроения им. Макеева (г. Миасс) идеи компенсации эффекта возбуждения элементов покрытия рассеянным излучением основы.

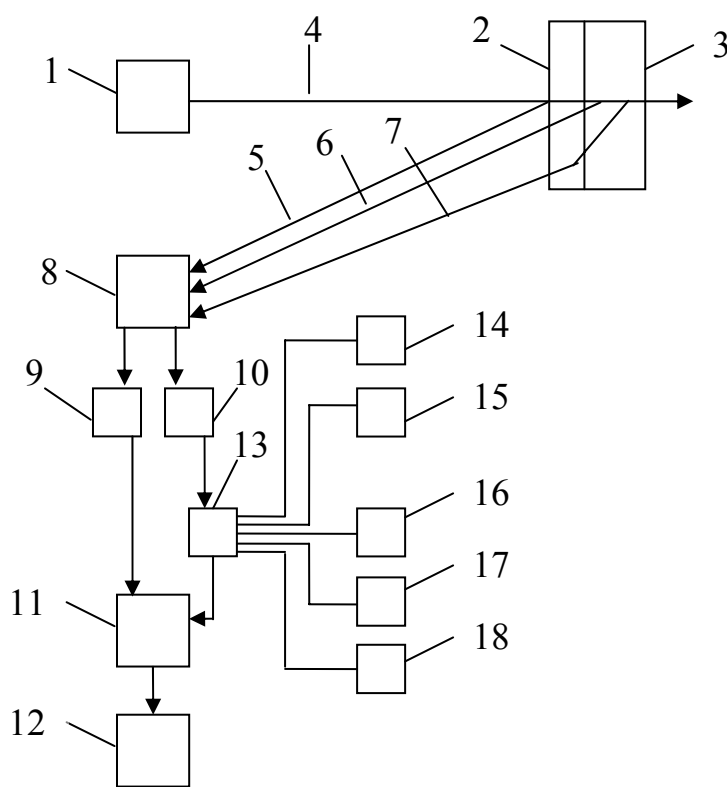


Рис. 1. Структурная схема прибора для рентгенофлуоресцентного контроля толщины покрытия:

1 – источник излучения; 2 – покрытие; 3 – основа; 4 – поток N_0 фотонов первичного излучения; 5 – компонент N_x потока фотонов рентгенофлуоресцентного излучения покрытия 2, обусловленный возбуждением атомов его материала первичным излучением; 6 – поток N_s фотонов рассеянного излучения; 7 – компонент N_{xs} потока фотонов рентгенофлуоресцентного излучения покрытия 2, обусловленный возбуждением атомов его материала рассеянным излучением; 8 – детектор излучения; 9 – измеритель потока $N_x + N_{xs}$; 10 – измеритель потока N_s ; 11 – блок вычитания; 12 – регистратор; 13 – вычислитель; 14 – задатчик значения τ_s коэффициента преобразования фотонов рассеянного излучения в фотоны рентгенофлуоресцентного излучения покрытия 2; 15 – задатчик значения коэффициента μ_{sn} ослабления рассеянного излучения для материала покрытия 2; 16 – задатчик значения коэффициента μ_{xp} ослабления рентгенофлуоресцентного излучения покрытия 2 для материала этого покрытия; 17 – задатчик значения регламентированной толщины h_p покрытия 2; 18 – задатчик значения регламентированной плотности ρ_p материала покрытия 2.

Сущность развития состоит в использовании блоков 13-18.

Значения N_s , N_x и N_{xs} определяются следующими выражениями:

$$N_s = N_0 \frac{\sigma \rho_{\hat{n}}}{\mu_{\hat{n}} + \mu_{soc}} \left[1 - e^{-(\mu_{\hat{n}} + \mu_{soc}) h_{oc}} \right] e^{-(\mu_{\hat{n}} + \mu_{s\hat{n}}) h_{\hat{n}}} ; \quad (12)$$

$$N_x = N_0 \frac{\tau \rho_{\hat{n}}}{\mu_{\hat{n}} + \mu_{x\hat{n}}} \left[1 - e^{-(\mu_{\hat{n}} + \mu_{x\hat{n}}) h_{\hat{n}}} \right]; \quad (13)$$

$$N_{xs} = N_0 \frac{\tau_s \rho_{\hat{n}}}{\mu_{s\hat{n}} - \mu_{x\hat{n}}} \left[e^{-\mu_{x\hat{n}} h_{\hat{n}}} - e^{-\mu_{s\hat{n}} h_{\hat{n}}} \right] \frac{\sigma \rho_{oc}}{\mu_{loc} + \mu_{soc}} \left[1 - e^{-(\mu_{loc} + \mu_{soc}) h_{oc}} \right] e^{-\mu_{\hat{n}} h_{\hat{n}}} . \quad (14)$$

Здесь σ – коэффициент, определяющий вероятность рассеяния в направлении детектора фотонов первичного излучения, ρ_{oc} – плотность материала основы, μ_{loc} – коэффициент ослабления первичного излучения для материала основы, μ_{soc} – коэффициент ослабления рассеянного излучения для материала основы, h_{oc} – толщина основы, $\mu_{\hat{n}}$ – коэффициент ослабления первичного излучения для материала покрытия, τ – коэффициент преобразования фотонов первичного излучения в фотоны рентгенофлуоресцентного излучения покрытия.

Для уменьшения громоздкости формул для описания N_s , N_x и N_{xs} угол между направлением первичного и направлением подлежащих регистрации рассеянного и рентгенофлуоресцентного излучений взят равным 180° .

Как видно из (12), (13) и (14), компенсация в соответствии со значением N_{xs} , являющегося источником погрешности при случайных изменениях h_{oc} , может быть осуществлена лишь для одного, наперед заданного значения $h_{\hat{n}}$.

Вычислитель 13 настроен на вычисление значения $K_{выч}$ по соотношению,

$$K_{\hat{a}\hat{u}} = \frac{\tau_s \rho_{\hat{n}}}{\mu_{s\hat{n}} - \mu_{x\hat{n}}} \left(e^{-\mu_{x\hat{n}} h_{\hat{n}}} - e^{-\mu_{s\hat{n}} h_{\hat{n}}} \right) e^{\mu_{s\hat{n}} h_{\hat{n}}} , \quad \text{определенному исходя из условия}$$

$$N_{x\hat{n}} - K_{\hat{a}\hat{u}} N_s = 0 .$$

В качестве источника 1 взят радионуклид ^{57}Co с энергией излучаемых фотонов 122 кэВ, а в качестве детектора 8 – спектрометрический сцинтилляционный счетчик.

Следует отметить и то обстоятельство, что в направлении детектора распространяются также и кванты возбуждаемого первичным излучением рентгенофлуоресцентного излучения покрытия, которые рассеялись в основе и прошли через это покрытие. Квазиисточником этих квантов, также как и подвозбужденных квантов потока N_{xs} , является основа контролируемого композита.

Выражение для потока N_{sx} этих квантов имеет вид

$$N_{sx} = N_0 \frac{\tau \rho_i}{\mu_{li} - \mu_{xi}} \left[e^{-\mu_{xi} h_i} - e^{-\mu_{li} h_i} \right] \frac{\sigma_x \rho_{oc}}{\mu_{xoc} + \mu_{xsoc}} \left[1 - e^{-(\mu_{xoc} + \mu_{xsoc}) h_{oc}} \right] e^{-\mu_{xsi} h_i}, \quad (15)$$

где σ_x – коэффициент, определяющий вероятность рассеяния в направлении детектора квантов рентгенофлуоресцентного излучения покрытия в материале основы; μ_{xoc} – коэффициент ослабления рентгенофлуоресцентного излучения покрытия для материала основы; μ_{xsoc} – коэффициент ослабления рассеянного в основе рентгенофлуоресцентного излучения покрытия для материала основы; μ_{xsi} – коэффициент ослабления рассеянного в основе рентгенофлуоресцентного излучения покрытия для материала покрытия.

При контроле свинцового, золотого и платинового покрытий учет влияния N_{sx} не обязателен. Однако, для элементов со значением атомного номера порядка 40-50 (молибден, олово), значение вычитаемой части сигнала следует выбирать из условия $N_{xs} + N_{sx} - k_{\hat{a}\hat{u}} = 0$, поскольку сброс энергии квантами рентгенофлуоресцентного излучения таких элементов при их рассеянии в направлении детектора недостаточен для их энергетического разрешения.

Вместо вычислителя 13 может быть использован регулируемый делитель. Значения $K_{выч}$ определяют, устанавливая в рабочем пространстве прибора образец «покрытие с толщиной h – основа с переменной толщиной». Этот образец

перемещают, одновременно воздействуя на делитель, и добиваются минимума изменений показания прибора при перемещениях образца.

В четвертой, завершающей, главе дано описание приборной реализации выполненных исследований и представлены направления их развития.

Ранее в НИИ интроскопии (г. Томск) был разработан и передан для промышленного использования радиометрический толщиномер РТ-01-250. Данный прибор предназначен для контроля массовой толщины (в единицах мг/см^2) многокомпонентного экранных защитных покрытий класса ЭП-60 на алюминиевой основе. Измерение массовой толщины основано на регистрации потока гамма-квантов радионуклида ^{241}Am ($E_\gamma=60$ кэВ), прошедших через исследуемое изделие.

Максимальное значение погрешности измерения толщины покрытия порядка $\pm 10\%$ при доверительной вероятности $p=0,997$ обеспечено в этом приборе за счет того, что основным процессом взаимодействия гамма-излучения с веществом покрытия является фотоэлектрическое поглощение, а с материалом основы контролируемого изделия – некогерентное рассеяние.

Однако, такой уровень погрешности не отвечает современным требованиям и качеству двухслойных изделий. Поэтому при сохранении идеи двухстороннего доступа к контролируемому изделию потребовалось изменить сам принцип работы прибора. Это было осуществлено на основе выполненных диссертационных исследований. Авторство в части обоснования и разработки структурной схемы усовершенствованного прибора принадлежит диссертанту. Авторство в части разработки схемотехнических решений и конструктивному оформлению прибора, обеспечивших возможность использования двух алгоритмов обработки радиометрической информации, принадлежит старшему научному сотруднику НИИ интроскопии Опокину Владимиру Ивановичу.

Первый алгоритм, реализованный в приборе, основан на сопоставлении потоков излучения совмещенного излучателя $^{241}\text{Am}+^{57}\text{Co}$ ($E_1=60$ кэВ; $E_2=122$ кэВ). Использование данной версии предпочтительно для контроля значительных толщин радиационнозащитных покрытий – до 1000 мг/см^2 . Недостаток – наличие двух радионуклидов. Второй алгоритм основан на измерении потоков первичного

излучения радионуклида кобальт-57 и рентгенофлуоресцентного излучения покрытия.

Геометрию контроля изделия со стороны его основы и конструкцию блока измерительного преобразователя иллюстрирует рис. 2.

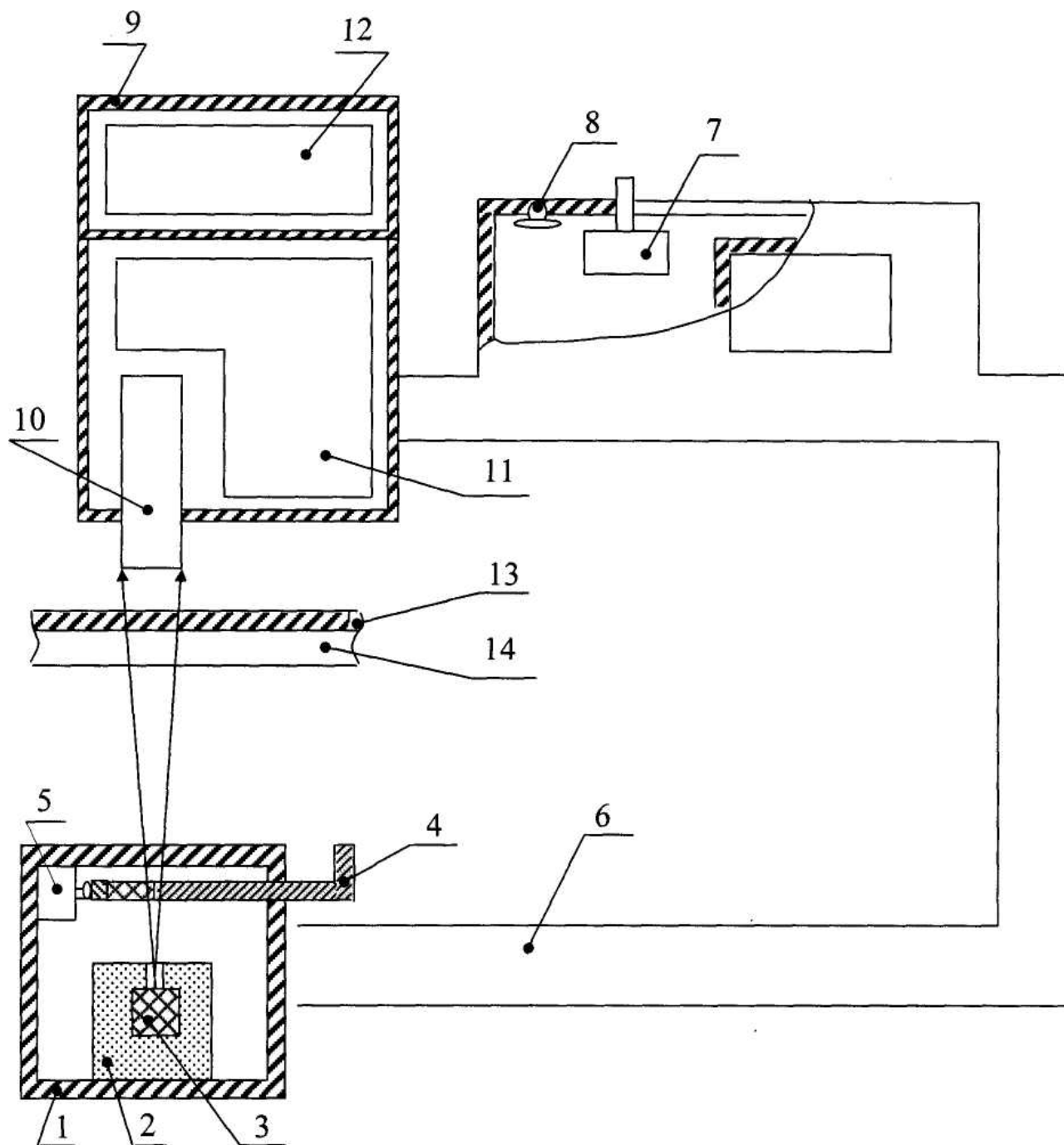


Рис. 2. Конструкция блока измерительного преобразователя: 1- корпус источника; 2 - контейнер; 3 -радионуклид; 4 - заслонка свинцовая; 5 - кнопка блокировки; 6 - корпус скобы; 7 - кнопка ПУСК; 8 - светодиод; 9 - корпус детектора; 10 - сцинтилляционный детектор; 11 - плата питания фотоумножителя; 12 - плата усилителя; 13 -контролируемое покрытие; 14 - основа изделия.

Для данного прибора погрешность измерения в единицах поверхностной плотности покрытия в диапазоне 50-1000 мг/см² при доверительной вероятности $P=0,997$ не превышает $\pm 3\%$ даже при изменениях толщины алюминиевой основы от 5 до 25 мм.

В качестве направлений развития диссертационных исследований отмечены:

1. Использование эффекта рентгеновской флуоресценции для определения энергетического спектра излучения импульсного рентгеновского аппарата
2. Повышение пространственной разрешающей способности сцинтилляционных преобразователей гамма-излучения.
3. Исследование защитных характеристик и разработка одежды операторов, находящихся в условиях повышенного фона низкоэнергетического излучения.

В приложении представлены документы, свидетельствующие об использовании результатов диссертационных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

1. Выведены аналитические выражения, сопоставляющие погрешность измерения весовой доли связующего вещества, энергию излучения, флуктуации удельного веса анализируемого вещества по объему объекта контроля и количества примесей в веществе. В частности применительно к системе битум-минеральный наполнитель целесообразны значения одной энергии в диапазоне 100 кэВ-300 кэВ, чему соответствует радионуклид ⁵⁷Co, а второй – диапазон 39 кэВ-85 кэВ, чему соответствует радионуклид ²⁴¹Am.

2. Надежность результатов трансмиссионного гамма-контроля покрытий на основах со случайно изменяющейся толщиной может быть обеспечена лишь путем измерения прошедших через композит двух потоков излучения с различными энергиями гамма-квантов, при этом могут быть измерены поток первичного излучения моноэнергетического источника и поток рентгенофлуоресцентного излучения покрытия. Установлена целесообразность возведения значения одного из сигналов в степень, равную отношению коэффициентов ослабления излучения этих энергий для материала основы. Дальнейшее сопоставление неизмененного сигнала и трансформированного таким образом второго сигнала обеспечивает однозначную информацию о толщине покрытия вне зависимости от случайных изменений толщины основы.

3. Для случая, когда в геометрии «на просвет» просвечивание композита осуществляется со стороны покрытия и использованы двухэнергетический излучатель и детекторы с логарифмической характеристикой, независимость результатов контроля покрытия от параметров основы (подложки) обеспечивается при сопоставлении сигналов, значения одного из которых умножены на величину, равную отношению коэффициентов ослабления излучения с первой и второй энергетическими линиями для материала основы (подложки).

4. При использовании моноэнергетического излучателя алгоритма обработки радиометрической информации путем сопоставления потоков первичного излучения и рентгенофлуоресцентного излучения покрытия излучатель целесообразно устанавливать со стороны основы изделия. В этом случае отпадает необходимость использовать в приборе блок умножения значений одного из сигналов на величину, равную отношению коэффициентов ослабления излучения для материала основы (подложки).

5. При случайных изменениях параметров основы полная их компенсация в альбедном канале рентгенофлуоресцентного излучения возможна лишь для одного значения толщины покрытия. В этой связи устройство рентгенофлуоресцентного контроля толщины покрытия при одностороннем доступе к объекту должно содержать метрологический блок, обеспечивающий получение информации о величине поправки в виде функции толщины покрытия.

6. В связи с возрастанием требований к качеству продукции наиболее важным направлением развития тематики диссертационных исследований является совершенствование способов увеличения селективности методов контроля состава исследуемых сред и увеличения пространственной разрешающей способности радиометрических комплексов.

Содержание диссертации раскрыто в следующих публикациях:

1. Недавний О.И., Осипов С.П., Недавний И.О. Выбор расстояния от источника излучения до объекта контроля для гамма-абсорбционного плотномера в геометрии расходящегося пучка // Дефектоскопия. – 2000. - №7, С. 76-81.

2. Забродский В.А., Недавний И.О., Осипов С.П. Особенности гамма-абсорбционного способа измерения весовой доли связующего вещества в бинарных системах // Известия вузов. Строительство. – 2003. - № 4, С. 112-116.

3. Недавний И.О., Осипов С.П. Автоматизация процессов производства битумоминеральных смесей с использованием информации о статистических свойствах зерновых композитов // Моделирование технологических процессов в промышленности и образовании: Сборник научных трудов МАДИ – ГТУ. – Москва, 2004, С. 129-135.

4. Воробьев В.А., Недавний И.О., Осипов С.П. Использование радиационных методов для информационного обеспечения автоматизации процессов приготовления песчано-битумных смесей // Моделирование технологических процессов в промышленности и образовании: Сборник научных трудов МАДИ – ГТУ. – Москва, 2004, С. 103-110.

5. Забродский В.А., Недавний И.О., Сидуленко О.А. Сравнительная оценка способов трансмиссионного гамма-контроля покрытий. Известия Томского политехнического университета, 2005, т. 308, № 6 С. 74-76.

6. Недавний И.О. Повышение надежности рентгенофлуоресцентного контроля покрытий. Труды XI международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии». Том 1, Томск, изд-во ТПУ, 2005, с. 123-125.

7. Недавний И.О. Обнаружение и идентификация включений в условиях флуктуации параметров объекта контроля двухэнергетическим рентгеновским способом / Недавний И. О., Осипов С.П. // Дефектоскопия. - 2005. - № 4 - С.76-84.

8. Забродский В.А. Система управления качеством полимерных композитов на тканевой основе / Забродский В.А., Недавний И.О., Осипов С.П. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2005. - № 5.- С. 45-48.

9. Недавний И.О., Метель А.А. Автоматизация производства битумосодержащих рулонных материалов // Интегрированные технологии автоматизированного управления: Сборник научных трудов МАДИ-ГТУ. – Москва. 2005. С. 121-124.

10. Недавний О.И., Недавний И.О., Удод В.А. Сцинтиллятор радиометрического дефектоскопа. Свидетельство на полезную модель № 20974. – G 01T. 1/20. – 2001.

11. Недавний О.И., Недавний И.О., Удод В.А. Преобразователь энергии ионизирующего излучения в электрический сигнал. Свидетельство на полезную модель № 21831. – G 01T. 1/20. – 2002.

12. Недавний И.О., Осипов С.П. Радиометрический дефектоскоп. Патент № 38399, 2004, Бюл. 16.

13. Недавний И.О., Осипов С.П. Устройство радиационного контроля. Патент на полезную модель № 38400, 2004, Бюл. № 16.

14. Недавний И.О. Измеритель энергетического спектра излучения рентгеновского аппарата. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2004135723/22 от 06.12.2004 г.

15. Недавний И.О. Радиационный толщиномер покрытия. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2005105781/22 от 01.03.2005 г.

16. Недавний И.О. Трансмиссионный толщиномер покрытия. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2005108015/22 от 21.03.2005 г.

17. Метель А.А., Недавний И.О. Устройство радиометрического контроля. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 200519496/22 от 01.04.2005 г.

18. Забродский В.А., Недавний И.О. Метрологический блок устройства рентгенофлуоресцентного контроля толщины покрытия. Патент на полезную модель № 46846, 2005, Бюл. № 21.

19. Забродский В.А., Недавний И.О. Устройство рентгенофлуоресцентного контроля толщины покрытия. Патент на полезную модель № 48055, 2005, Бюл. № 25.

20. Недавний И.О. Устройство трансмиссионного гамма-контроля толщины покрытия на подложке. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2006104136/22 от 10.02.2006 г.

21. Недавний И.О. Трансмиссионный гамма-толщиномер покрытия на подложке. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2006104138/22 от 10.02.2006 г.

22. Недавний И.О. Двухэнергетический трансмиссионный гамма-контроль покрытия. Труды XII международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Том 1, Томск, изд-во ТПУ, 2006, с. 105-106.