

18+

Д. Н. Афонин

**Радиационная
безопасность
при
эксплуатации
источников
ионизирующих
излучений**

Учебник



Д.Н. Афонин

Радиационная безопасность
при эксплуатации
источников ионизирующих
излучений. Учебник

http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=73481908
ISBN 9785006944992

Аннотация

НЕЗАКОННОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ НАРКОТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ, ПСИХОТРОПНЫХ ВЕЩЕСТВ, ИХ АНАЛОГОВ ПРИЧИНЯЕТ ВРЕД ЗДОРОВЬЮ, ИХ НЕЗАКОННЫЙ ОБОРОТ ЗАПРЕЩЕН И ВЛЕЧЕТ УСТАНОВЛЕННУЮ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВОМ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ. Учебник посвящен обеспечению радиационной безопасности при эксплуатации генерирующих источников ионизирующего излучения, применяемых в таможенном контроле. Содержит систематизированное изложение требований нормативных правовых актов и практические рекомендации по организации безопасной эксплуатации оборудования. Учебник предназначен для слушателей, обучающихся по дополнительным профессиональным программам повышения квалификации и

студентов обучающихся по специальности 38.05.02 «Таможенное дело».

Содержание

Введение	7
Глава 1. Номенклатура технических средств таможенного контроля, относящихся к источникам ионизирующих излучений генерирующих	20
1.1. Физические основы рентгеновской интроскопии	20
1.2. Характеристика ДРТ и РСЧ как источников рентгеновского излучения, требующих выполнения мер по радиационной безопасности	58
Конец ознакомительного фрагмента.	96

Радиационная безопасность при эксплуатации источников ионизирующих излучений Учебник

Д.Н. Афонин

© Д.Н. Афонин, 2026

ISBN 978-5-0069-4499-2

Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

Автор:

Д. Н. Афонин – профессор кафедры таможенного дела Санкт-Петербургского имени В.Б.Бобкова филиала Российской таможенной академии, доктор медицинских наук, доцент.

Рецензенты:

А. И. Начкин – заведующий кафедрой таможенного регулирования и таможенного дела АНО ВО «Университет при

МПА ЕврАзЭС», кандидат военных наук, доцент;

В. С. Смирнова – начальник отдела выбора объектов контроля службы таможенного контроля после выпуска товаров Северо-Западного таможенного управления, канд. экон. наук, майор таможенной службы.

Учебник посвящен вопросам обеспечения радиационной безопасности при эксплуатации генерирующих источников ионизирующего излучения, применяемых в таможенном контроле. Издание содержит систематизированное изложение требований нормативных правовых актов и практические рекомендации по организации безопасной эксплуатации оборудования.

Учебник предназначен для слушателей, обучающихся по дополнительным профессиональным программам повышения квалификации и студентов обучающихся по специальности 38.05.02 «Таможенное дело».

Ключевые слова: радиационная безопасность, генерирующие источники ионизирующего излучения, инспекционно-досмотровые комплексы, досмотровые рентгеновские аппараты, рентгеновские сканеры человека, рентгенофлуоресцентный анализ, таможенный контроль.

Введение

Современный мир предъявляет качественно новые требования к системе обеспечения национальной безопасности и международной торговли. Таможенная служба, находясь на переднем крае экономических интересов государства, выполняет не только фискальные и правоохранительные функции, но и выступает ключевым барьером на пути распространения угроз, способных нанести непоправимый ущерб жизни, здоровью людей и окружающей среде. Среди многообразия таких угроз особое место занимают угрозы, связанные с несанкционированным перемещением делящихся и радиоактивных материалов (ДРМ), а также товаров, обладающих повышенным радиационным фоном.

Эффективное противодействие этим вызовам стало возможным благодаря внедрению в практику таможенного контроля передовых технологий и сложных технических средств. На вооружение таможенных органов поступили и успешно эксплуатируются досмотровая рентгенотелевизионная техника, инспекционно-досмотровые комплексы (ИДК), рентгеновские сканеры для досмотра людей, портативные приборы рентгенофлуоресцентного анализа. Эти устройства, относящиеся к классу источников ионизирующих излучений генерирующих (ИИИГ), произвели настоящую революцию в методах неразрушающего контроля. Они

позволяют буквально «видеть сквозь преграды», идентифицировать химический состав веществ, выявлять сокрытые вложения, не вскрывая груз и не нарушая его целостности. Благодаря им радиационный контроль перестал быть пассивным наблюдением и превратился в активный, высокоточный инструмент обнаружения [21].

Однако, как и любой мощный инструмент, применение генерирующих источников ионизирующего излучения сопряжено с внутренним противоречием, которое лежит в основе самой физики процесса. С одной стороны, рентгеновское излучение позволяет получать бесценную информацию о содержимом объектов контроля. С другой стороны, оно является фактором, потенциально опасным для здоровья человека. Ионизирующее излучение, проходя через биологические ткани, способно вызывать необратимые изменения на клеточном уровне, приводя к соматическим и генетическим последствиям, что представляет собой объективную реальность, не зависящую от исправности оборудования или добросовестности оператора – риск существует всегда, и задача специалиста заключается не в том, чтобы избегать его любой ценой (что сделало бы невозможным выполнение служебных обязанностей), а в том, чтобы квалифицированно управлять им.

Говоря о современном этапе развития таможенного дела, невозможно обойти стороной глобальный тренд, определяющий лицо отрасли – повсеместный переход к технологи-

ям неинтрузивного контроля (НИК). Еще два десятилетия назад основным способом проверки содержимого груза был физический досмотр: вскрытие, разгрузка, пересчет, осмотр, что требовало колоссальных временных затрат, привлечения людских ресурсов и зачастую приводило к повреждению товаров или упаковки. Рост международного товарооборота, усложнение логистических цепочек и появление новых видов угроз сделали старые методы неэффективными и экономически нецелесообразными.

Технологии неинтрузивного контроля стали ответом на данный вызов. Они объединяют в себе целый комплекс физических методов и технических средств, позволяющих получать достоверную информацию об объекте контроля без нарушения его целостности и извлечения из транспортного средства или упаковки. В контексте деятельности таможенных органов к таким технологиям относятся:

Рентгенотелевизионная техника: для досмотра ручной клади, багажа и мелких грузов.

Инспекционно-досмотровые комплексы (ИДК): стационарные, мобильные и портативные системы для сканирования крупногабаритных грузов, автомобилей, контейнеров и железнодорожного транспорта.

Рентгеновские сканеры для людей: для выявления предметов, скрытых под одеждой человека.

Приборы рентгенофлуоресцентного анализа (РФА): для идентификации химического состава веществ,

включая драгоценные металлы, сплавы, наркотические средства и прекурсоры.

Технические средства радиационного контроля: стационарные и переносные приборы поиска и идентификации радиоактивных и делящихся материалов (спектрометры, дозиметры, радиометры).

Современные технологии НИК развиваются стремительными темпами, и их перспективы поистине впечатляют. Мы стоим на пороге эры «интеллектуального досмотра», где ключевую роль играют:

Повышение проникающей способности и качества изображения: Разработка новых поколений линейных ускорителей для ИДК позволяет «просвечивать» грузы с плотностью, эквивалентной 300—400 мм стали, что дает возможность выявлять контрабанду в особо защищенных полостях (например, в начинке дверей контейнеров, в каркасах прицепов, в шинах).

Многорукурсное и стереоскопическое сканирование: Переход от двухпроекционных систем (вид сверху и сбоку) к томографическим и стереоскопическим, что позволяет оператору видеть трехмерную модель объекта, точно определять форму предметов и их положение в пространстве, практически исключая «мертвые зоны».

Автоматизированное распознавание образов (AI/ML): Внедрение систем искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа теневых изображений. Ней-

росети обучаются на миллионах снимков и способны автоматически подсвечивать оператору подозрительные зоны, распознавать типовые предметы (оружие, взрывчатку, наркотики, сигареты, валюту) и даже классифицировать материалы по их эффективному атомному номеру.

Технология разделения материалов (Material Discrimination) – помимо черно-белого изображения, современные сканеры (особенно двухэнергетические) позволяют окрашивать объекты в разные цвета в зависимости от их атомного номера, что дает возможность на экране монитора практически мгновенно отличить органику (наркотики, взрывчатку) от неорганики (металлы, оружие) и материалов с низкой плотностью.

Интеграция систем – создание единых информационных сетей, где данные со стационарных радиационных мониторов, ИДК, весового оборудования и автоматических номерных знаков стекаются в центр управления. Система сама оценивает уровень риска по каждому объекту и выдает рекомендации инспектору, значительно ускоряя процесс принятия решения.

Портативность и мобильность – разработка компактных, автономных и легко разворачиваемых систем для работы в полевых условиях, на удаленных пунктах пропуска или при проведении специальных операций.

Данные технологические прорывы кардинально меняют характер работы должностного лица. Оператор современ-

ного ИДК или анализатор анализа изображений ДРТ сегодня – не просто наблюдатель, а высококвалифицированный специалист, владеющий основами физики, радиоэлектроники и компьютерной обработки сигналов. Он должен уметь интерпретировать сложные теневые изображения, понимать влияние параметров сканирования на качество результата и, что особенно важно, осознавать меру ответственности, возлагаемую на него при работе с источниками ионизирующего излучения.

Именно здесь возникает ключевая дилемма профессиональной деятельности должностного лица таможенного органа, эксплуатирующего ИИИГ. Эта деятельность носит двойственный характер. Должностное лицо таможенных органов выступает одновременно и как пользователь сложного технического устройства для решения оперативных задач, и как объект защиты, подвергающийся техногенному воздействию. Граница между эффективным контролем и недопустимым профессиональным риском чрезвычайно тонка. Её нарушение может привести либо к снижению качества таможенного досмотра (при избыточном страхе перед облучением), либо к получению персоналом необоснованных доз радиации (при пренебрежении правилами безопасности). В связи с этим, деятельность по обеспечению радиационной безопасности при применении ИИИГ перестает быть просто набором формальных инструкций, а возводится в ранг фундаментальной основы профессиональной компе-

тенции.

Рассмотрение вопросов применения источников ионизирующего излучения и технологий неинтрузивного контроля было бы неполным без понимания места этих процессов в общегосударственной повестке развития таможенной службы. Базовым документом стратегического планирования, определяющим облик российской таможни на перспективу до 2030 года, является Распоряжение Правительства РФ от 23.05.2020 №1388-р «Об утверждении Стратегии развития таможенной службы Российской Федерации до 2030 года» (далее – Стратегия-2030) [8]. Данный документ задает вектор трансформации таможенных органов, делая особый акцент на их «цифровизацию», автоматизацию и переход к качественно новым стандартам контроля.

В контексте тематики настоящего учебника Стратегия-2030 имеет принципиальное значение, поскольку она прямо и недвусмысленно определяет развитие неинтрузивных технологий как один из ключевых приоритетов технического оснащения таможни. Анализ положений документа позволяет выделить несколько ключевых тезисов, имеющих прямое отношение к деятельности должностных лиц, эксплуатирующих ИИИГ:

– **Целевые показатели оснащения:** Стратегия устанавливает амбициозные цели по увеличению доли товаров, подвергаемых таможенному контролю с применением инспекционно-досмотровых комплексов. Плановые показате-

ли предусматривают рост с 9% (базовый уровень 2018 года) до **25% к 2024 году и до 45% к 2030 году**, что означает кратное увеличение интенсивности использования ИДК, что автоматически повышает требования к готовности персонала, его квалификации и, что критически важно, к соблюдению норм радиационной безопасности при возросших нагрузках.

– **Полномасштабное внедрение и обновление парка:** Стратегия-2030 декларирует необходимость не только количественного, но и качественного обновления парка досмотровой техники. Речь идет о внедрении ИДК и досмотровых рентгеновских установок, соответствующих лучшим мировым образцам и использующих передовые физические принципы. Планируется развитие сети стационарных комплексов и активное использование мобильных ИДК для обеспечения гибкости таможенного контроля в различных пунктах пропуска.

– **Интеграция в систему управления рисками (СУР):** Документ подчеркивает, что технологии неинтрузивного контроля должны стать не просто отдельным инструментом, а неотъемлемой частью автоматизированной системы управления рисками [34], что подразумевает переход к ситуации, когда решение о применении рентгеновской техники будет приниматься не только по прямому указанию, но и автоматически, на основе профилей риска. Результаты сканирования должны в цифровом формате сопоставляться с данны-

ми деклараций и иных документов, что повышает требования к качеству получаемых изображений и точности их интерпретации.

– **Развитие перспективных технологий:** В рус-
ле общемировых трендов, обозначенных ранее, Страте-
гия-2030 ориентирует на внедрение технологий искусствен-
ного интеллекта для автоматического анализа рентгенов-
ских изображений, что позволит снизить нагрузку на опера-
тора, минимизировать «человеческий фактор» и повысить
вероятность выявления контрабандных и запрещенных вло-
жений. Кроме того, ставится задача по развитию техниче-
ских средств, работающих на новых физических принципах
(например, нейтронно-радиационный анализ), что еще боль-
ше расширит спектр ИИИГ, применяемых в таможенном де-
ле.

– **Развитие системы радиационного контроля:** Стра-
тегия подтверждает важность совершенствования техниче-
ских средств радиационного контроля, включая стационар-
ные системы обнаружения ядерных и радиоактивных мате-
риалов («Янтарь», «Радон» и др.) и переносные спектромет-
рические комплексы, что напрямую коррелирует с задачами
ТКДРМ и функциями должностных лиц, для которых пред-
назначен данный учебник.

Таким образом, из документа стратегического планирова-
ния со всей очевидностью следует, что роль должностного
лица, работающего с источниками ионизирующего излуче-

ния, будет неуклонно возрастать. Рост парка техники, усложнение ее алгоритмов, интеграция с цифровыми платформами и искусственным интеллектом не отменяют, а, напротив, усиливают ответственность человека за безопасное и эффективное применение этих мощных инструментов. Достижение целевых показателей Стратегии-2030 невозможно без высокого уровня профессиональной подготовки персонала, особенно в части понимания физических основ работы оборудования и безусловного соблюдения требований радиационной безопасности. Настоящий учебник призван стать надежной базой для формирования этих компетенций.

Предлагаемый учебник «Обеспечение радиационной безопасности при применении по целевому назначению и эксплуатации источников ионизирующих излучений (генерирующих)» призван сформировать у читателя целостное, системное понимание всех аспектов работы с рентгеновским оборудованием. Мы рассматриваем процесс обеспечения безопасности не как статичный свод запретов, а как динамический процесс, включающий в себя глубокое знание физики явления, конструктивных особенностей техники, нормативно-правового поля и практических организационно-технических мероприятий.

Особую значимость данному изданию придает его целевая аудитория. Учебник адресован не просто операторам досмотровой техники, а, в первую очередь, **должностным лицам, в чьи обязанности входят функции по организа-**

ции таможенного контроля делящихся и радиоактивных материалов (ТКДРМ) и радиационного контроля. Данные специалисты, отвечающие не только за собственную безопасность, но и за организацию безопасной эксплуатации источников излучения в масштабах структурного подразделения или таможенного органа в целом. Именно на них лежит ответственность за формирование безопасной среды для личного состава, за адекватную оценку радиационной обстановки и за принятие решений в нештатных ситуациях.

Структура учебника логически выстроена для последовательного погружения в проблематику:

Первая глава «Номенклатура ТСТК, относящихся к ИИИГ» носит ознакомительно-идентификационный характер. Здесь будет подробно рассмотрено, какие именно технические средства таможенного контроля попадают под определение «источники ионизирующего излучения генерирующие». В данном разделе будет дано четкое представление о типах и моделях оборудования, их технических характеристиках и физических принципах генерации излучения, что является необходимой базой для понимания природы потенциальной опасности, исходящей от каждого конкретного прибора. Мы подробно остановимся на том, как устроены современные ИДК, досмотровые рентгеновские установки и спектрометрические комплексы, что позволит читателю в дальнейшем осознанно подходить к выбору режимов работы.

Вторая глава «Способы и меры защиты от воздействия рентгеновского излучения на организм человека» посвящена фундаментальным принципам радиационной гигиены. Мы детально разберем три классических кита радиационной защиты: защиту временем, расстоянием и экранированием. Будет рассмотрена физика взаимодействия рентгеновского излучения с веществом, объяснена работа конструктивных средств защиты (корпусов, штор, кожухов), а также даны практические рекомендации по безопасным алгоритмам работы. Отдельное внимание будет уделено вопросам дозиметрического контроля персонала и ведению индивидуальных доз.

Третья глава «Деятельность таможенного органа по обеспечению радиационной безопасности при применении по целевому назначению и эксплуатации ИИИГ» является кульминацией всего учебника. Она переводит теоретические знания и инженерно-технические решения в плоскость управленческих решений и повседневной практики. В данной главе будут рассмотрены вопросы организации производственного контроля, проведения инструктажей, ведения радиационно-гигиенической документации (журналов учета, нарядов-допусков), порядка действий при проведении специальных видов досмотра, а также алгоритмы поведения при возникновении нештатных ситуаций и аварий. Здесь же будут детально разобраны правовые и нормативные аспекты, регламентирующие применение

ние ИИИГ в таможенном деле.

Настоящее издание ставит своей целью не только передать сумму знаний, но и сформировать у должностных лиц культуру радиационной безопасности. Такое мировоззрение, при котором понимание опасности сочетается с уверенным владением техникой, а следование нормам становится не обременительной обязанностью, а внутренней профессиональной потребностью. Мы уверены, что только гармоничное сочетание высокой технической оснащенности и глубоких знаний в области безопасности позволяет таможенным органам эффективно выполнять свои функции по защите экономических интересов и здоровья населения страны.

Глава 1. Номенклатура технических средств таможенного контроля, относящихся к источникам ионизирующих излучений генерирующих

1.1. Физические основы рентгеновской интроскопии

Понимание физических принципов, лежащих в основе работы досмотровой рентгеновской техники, инспекционно-досмотровых комплексов и иных устройств, генерирующих ионизирующее излучение, является фундаментальной основой профессиональной компетенции должностных лиц таможенных органов. Без глубокого осознания природы процессов, происходящих при взаимодействии излучения с веществом, невозможно ни эффективное применение технических средств, ни тем более осознанное обеспечение радиационной безопасности. Настоящий раздел посвящен рассмотрению базовых понятий и закономерностей, знание которых необходимо для последующего изучения номенклату-

ры оборудования, принципов его работы и мер защиты.

1.1.1. Виды ионизирующих излучений

В самом широком смысле **ионизирующее излучение** – представляет собой излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков, то есть к ионизации атомов и молекул. Способность вызывать ионизацию является ключевым свойством, определяющим как возможность регистрации излучения, так и его биологическое действие на живые организмы.

Не всякое излучение является ионизирующим. Например, видимый свет или радиоволны относятся к неионизирующим излучениям, поскольку их энергия недостаточна для вырывания электронов из атомов. Граница ионизации для большинства веществ лежит в области энергий выше 10—12 электронвольт (эВ), что соответствует ультрафиолетовому излучению и выше.

По своей природе ионизирующие излучения подразделяются на два основных класса: **корпускулярные** (потoki элементарных частиц) и **фотонные** (потoki квантов электромагнитного излучения).

Корпускулярные виды излучений

К данной категории относятся потоки частиц, обладающих массой покоя. Для таможенной практики наиболее значимыми являются следующие:

– **альфа-излучение (α -излучение)** – представляет собой поток ядер гелия-4, состоящих из двух протонов и двух

нейтронов. Эти частицы обладают большой массой, значительным электрическим зарядом (+2) и сравнительно невысокой скоростью. Вследствие этих свойств альфа-частицы имеют очень высокую ионизирующую способность (создают огромное количество ионов на единице пути), но крайне малую проникающую способность. В воздухе пробег альфа-частиц составляет всего несколько сантиметров, а обычный лист бумаги или роговой слой кожи полностью их задерживают. В контексте таможенного контроля альфа-излучающие нуклиды (например, плутоний-239, уран-235) представляют опасность преимущественно при внутреннем облучении, то есть при попадании внутрь организма с вдыхаемым воздухом, пищей или через открытые раны;

– **бета-излучение (β-излучение)** – представляет собой поток электронов (β^-) или позитронов (β^+), испускаемых при радиоактивном распаде. Масса бета-частиц значительно меньше массы альфа-частиц, а заряд равен элементарному (единице). Ионизирующая способность бета-излучения ниже, чем у альфа-излучения, но проникающая способность – выше. В воздухе пробег бета-частиц может достигать нескольких метров, а для защиты от них часто достаточно слоя алюминия толщиной в несколько миллиметров или неброского стекла. Бета-излучение способно проникать через поверхностные слои кожи и вызывать радиационные ожоги, а также представляет – опасность при внутреннем облучении;

– **нейтронное излучение (n-излучение)** – поток нейтронов – электрически нейтральных частиц, образующихся в ядерных реакциях (например, при делении ядер или в реакциях синтеза). Отсутствие заряда обуславливает уникальные свойства нейтронов: они практически не взаимодействуют с электронными оболочками атомов и могут глубоко проникать в вещество, сталкиваясь преимущественно с ядрами. Ионизация при нейтронном облучении создается вторично – за счет выбитых из атомов заряженных частиц или возникающего гамма-излучения. Проникающая способность нейтронов очень высока, и для их защиты требуются материалы, содержащие легкие ядра (вода, полиэтилен, бетон). В таможенном деле нейтронное излучение может регистрироваться как признак наличия делящихся материалов (например, при спонтанном делении ядер калифорния-252) и, как было отмечено во введении, используется в перспективных системах неинтрузивного контроля.

Фотонные виды излучений

Фотонное излучение представляет собой поток электромагнитных квантов, не имеющих массы покоя. К нему относятся два вида, неразличимых по своей физической природе, но различающихся по происхождению:

– **Гамма-излучение (γ -излучение)** – представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение, испускаемое при ядерных превращениях, при переходе ядер из возбужденного состояния в основное. Гамма-излучение сопро-

воздаёт большинство процессов радиоактивного распада. Оно обладает высокой проникающей способностью и распространяется со скоростью света.

– **Рентгеновское излучение (Х-излучение)** – также представляет собой электромагнитное излучение, но возникает при торможении заряженных частиц (обычно электронов) в электрическом поле атомов вещества (тормозное рентгеновское излучение) или при перестройке электронных оболочек атомов (характеристическое рентгеновское излучение). Энергетический диапазон рентгеновского излучения частично перекрывается с гамма-излучением. Ключевое различие – в природе происхождения: гамма-излучение – результат ядерных процессов, рентгеновское – результат взаимодействия электронов с веществом. Именно рентгеновское излучение является рабочим инструментом подавляющего большинства технических средств таможенного контроля.

1.1.2. Источники ионизирующих излучений

Источники ионизирующего излучения (ИИИ) – представляют собой объекты, содержащие радиоактивный материал или техническое устройство, испускающее или способное испускать ионизирующее излучение. В зависимости от происхождения излучения все ИИИ можно разделить на три большие группы.

1. Природные источники

Человек на протяжении всей эволюции подвергается воз-

действию естественного радиационного фона, который создается:

- космическим излучением (галактическим и солнечным);
- радиоактивными элементами, содержащимися в земной коре (калий-40, уран-238, торий-232 и продукты их распада);
- радиоактивными веществами, поступающими в организм с воздухом (радон), водой и пищей.

Природные источники формируют так называемый **естественный радиационный фон**, который варьируется в зависимости от географического положения и высоты над уровнем моря. Должностные лица таможенных органов должны учитывать наличие фонового излучения при проведении радиационного контроля, так как именно превышение над фоном является сигналом обнаружения техногенных источников.

2. Техногенные (искусственные) источники

Эта категория объединяет источники, созданные человеком и не существующие в природе в готовом виде. Они, в свою очередь, делятся на два принципиально различных типа:

Радиоизотопные источники – в их основе лежат радиоактивные изотопы (нуклиды), которые испускают излучение в процессе самопроизвольного распада. Излучение от таких источников существует постоянно и не может быть

прекращено или изменено оперативно. Интенсивность излучения определяется периодом полураспада данного изотопа. Примеры: кобальт-60, цезий-137 (используются в дефектоскопии и терапии), америций-241 (используется в дымовых извещателях и некоторых анализаторах). Радиоизотопные источники могут быть закрытыми (исключающими попадание радиоактивного вещества в окружающую среду) или открытыми.

Генерирующие источники (ИИИГ) – представляю собой устройства, в которых ионизирующее излучение создается за счет ускорения заряженных частиц (электронов, протонов, ионов) и их взаимодействия с мишенью или электромагнитным полем. Ключевое отличие от радиоизотопных источников заключается в том, что излучение возникает **только в период работы устройства** и может быть прекращено его отключением. Именно к данному классу относится подавляющее большинство технических средств таможенного контроля.

1.1.3. Определение и классификация ИИИГ

Источники ионизирующих излучений генерирующие (ИИИГ) представляют собой технические устройства, специально предназначенные для создания направленного или ненаправленного потока ионизирующего излучения за счет ускорения заряженных частиц (электронов, ионов) или за счет электромагнитного излучения, возникающего при их торможении, и не содержащие в своей конструкции

радиоактивных материалов в качестве источника первичного излучения.

Иными словами, ИИИГ преобразуют электрическую энергию в энергию ионизирующего излучения. При прекращении подачи электроэнергии генерация излучения полностью и практически мгновенно останавливается (за исключением крайне незначительной наведенной активности, которая может возникать в конструкционных материалах при длительной работе мощных установок, но в контексте таможенной техники данный эффект пренебрежимо мал).

К основным типам ИИИГ, применяемым в таможенном деле, относятся:

Рентгеновские аппараты (установки): устройства, в которых рентгеновское излучение возникает при торможении ускоренных электронов на аноде (мишени) рентгеновской трубки – самый распространенный класс ИИИГ в таможене, включающий:

- досмотровые рентгенотелевизионные установки (интроскопы) для багажа и ручной клади;
- рентгеновские сканеры для людей;
- инспекционно-досмотровые комплексы (как трансмиссионные, так и обратного рассеяния).

Ускорители электронов (линейные, циклические) – используются в мощных стационарных инспекционно-досмотровых комплексах для просвечивания крупногабаритных грузов и контейнеров. Они позволяют получать пучки

излучения со значительно более высокой энергией и проникающей способностью, чем рентгеновские трубки.

Нейтронные генераторы – устройства, в которых нейтроны образуются в результате ядерных реакций (например, дейтерий-тритиевый синтез) при бомбардировке мишени ускоренными ионами – перспективный класс ИИИГ для элементного анализа веществ.

Рентгенофлуоресцентные анализаторы – компактные приборы, использующие миниатюрную рентгеновскую трубку для возбуждения характеристического излучения атомов исследуемого материала. Излучение трубки используется для «подсветки» пробы, а анализируется вторичное (флуоресцентное) излучение.

С точки зрения обеспечения радиационной безопасности, работа с ИИИГ имеет как преимущества, так и особенности по сравнению с радиоизотопными источниками. Основное преимущество – возможность полного прекращения излучения выключением питания. Однако данное свойство порождает и потенциальную опасность: при нарушении блокировок или несанкционированном доступе в зону генерации пучка во время работы установки возможно получение высоких доз облучения за короткое время. Кроме того, для мощных ИИИГ (линейные ускорители, мощные рентгеновские трубки) характерно образование озона и оксидов азота в воздухе рабочей зоны под действием излучения, что требует организации вентиляции.

Таким образом, понимание физической природы ионизирующих излучений, классификации их источников и четкое определение места генерирующих источников в данной классификации является отправной точкой для дальнейшего изучения устройства конкретной таможенной техники, принципов ее безопасной эксплуатации и методов защиты персонала и населения.

1.1.4. Фотонное излучение. Рентгеновское излучение

Фотонное излучение представляет собой поток электромагнитных квантов (фотонов), распространяющихся в пространстве со скоростью света. Фотоны являются уникальными элементарными частицами, имеющими нулевую массу покоя, что означает их принципиальную неспособность находиться в состоянии покоя – они всегда движутся со скоростью 299 792 458 м/с. Энергия фотона определяет его место в спектре электромагнитных излучений и его способность взаимодействовать с веществом.

Рентгеновское излучение (Х-лучи) – представляю собой электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между ультрафиолетовым и гамма-излучением, с длинами волн приблизительно от 10^{-11} до 10^{-8} метра. В зависимости от энергии фотонов различают:

Мягкое рентгеновское излучение – длинноволновая часть диапазона (меньшая энергия, меньшая проникающая способность);

Жёсткое рентгеновское излучение – коротковолновая часть диапазона (большая энергия, большая проникающая способность).

Термин «рентгеновское излучение» используется преимущественно в России и странах постсоветского пространства. В международной практике более распространено название «Х-лучи» (X-rays), предложенное самим Вильгельмом Конрадом Рентгеном, открывшим данное излучение в 1895 году. За данное открытие, произошедшее во время экспериментов с катодными лучами (потоками электронов в вакуумных трубках), учёному в 1901 году была присуждена первая в истории Нобелевская премия по физике.

Природа возникновения рентгеновского излучения

Рентгеновское излучение возникает в результате двух принципиально различных физических процессов взаимодействия ускоренных электронов с веществом:

Тормозное рентгеновское излучение (с непрерывным спектром) – возникает при торможении быстрых электронов в электрическом поле атомных ядер вещества анода. Электрон, проходя вблизи ядра, изменяет траекторию и теряет часть своей кинетической энергии, которая излучается в виде рентгеновского фотона. Спектр такого излучения является непрерывным, поскольку потери энергии электронов могут быть различными. Степень жёсткости тормозного излучения возрастает при увеличении энергии возбуждающих электронов, а коротковолновая граница спектра смещается

в область меньших длин волн.

Характеристическое рентгеновское излучение (с линейчатым спектром) – возникает, когда быстрый электрон выбивает один из внутренних электронов атома (например, с K- или L-оболочки). Образовавшаяся вакансия заполняется электроном с вышележащего энергетического уровня, а разность энергий излучается в виде рентгеновского фотона со строго определённой для данного элемента и данной электронной оболочки длиной волны. Спектр такого излучения является линейчатым и не зависит от энергии возбуждающих электронов (при превышении порога возбуждения), что позволяет использовать его для идентификации химических элементов.

Свойства рентгеновского излучения

Для понимания принципов работы досмотровой техники и обеспечения радиационной безопасности необходимо знать фундаментальные свойства рентгеновских лучей:

– **Высокая проникающая способность** – рентгеновское излучение способно проникать сквозь непрозрачные для видимого света материалы. Проникающая способность зависит от энергии излучения (жёсткости) и плотности материала (чем плотнее материал, тем сильнее он поглощает излучение). Для органических веществ (с низкой плотностью) рентгеновское излучение с длиной волны менее $1 \text{ \AA}$ является «прозрачным».

– **Поглощение и рассеяние** – при прохождении через

вещество интенсивность рентгеновского излучения ослабляется по экспоненциальному закону. Поглощение описывается эмпирической формулой Блохина.

– **Ионизирующая способность** – рентгеновское излучение способно выбивать электроны из атомов и молекул, создавая положительные и отрицательные ионы. Данное свойство лежит в основе как методов регистрации излучения, так и его биологического действия.

– **Фотохимическое действие** – рентгеновские лучи вызывают почернение фотографических материалов, что исторически использовалось для получения рентгеновских снимков.

– **Люминесценция** – рентгеновское излучение вызывает свечение некоторых веществ (сцинтилляторов), что используется в детекторах и флуороскопических экранах.

– **Прямолинейность распространения** – в однородной среде рентгеновские лучи распространяются прямолинейно.

– **Неотклоняемость электрическими и магнитными полями** – поскольку фотоны не имеют электрического заряда, они не взаимодействуют с электромагнитными полями.

– **Дифракция и интерференция** – на кристаллических решётках наблюдается дифракция рентгеновских лучей, что используется в рентгеноструктурном анализе.

– **Биологическое действие** – рентгеновское излучение способно вызывать необратимые изменения в живых клетках, включая повреждение молекул ДНК. Особенно чувстви-

тельны к облучению костный мозг, хрусталик глаза, щитовидная и половые железы, лёгочная ткань.

1.1.5. Источники рентгеновского излучения

Основным источником рентгеновского излучения, применяемым в таможенной технике, является **рентгеновская трубка**. Конструктивно она представляет собой вакуумированный стеклянный или металлокерамический сосуд, в котором расположены два электрода:

Катод – спираль из тугоплавкого металла (обычно вольфрама), накаливаемая электрическим током для термоэлектронной эмиссии;

Анод (антикатод) – массивный металлический электрод (часто также вольфрамовый, медный или молибденовый), служащий мишенью для электронов.

Под действием высокого напряжения (обычно от 10 до 100 кВ в таможенных установках) электроны, испускаемые катодом, ускоряются и бомбардируют поверхность анода, генерируя рентгеновское излучение. Излучение рентгеновской трубки частично поляризовано, степень поляризации зависит от длины волны. При выключении тока генерация излучения прекращается практически мгновенно.

Помимо рентгеновских трубок, существуют и другие источники рентгеновского излучения, которые могут встречаться в перспективных разработках или в научно-исследовательских целях:

Синхротронное и ондуляторное излучение – генери-

руется при движении ускоренных электронов по искривлённой траектории в магнитных полях накопительных колец;

Излучение горячей плазмы – возникает в лабораторных и астрофизических условиях при температурах выше 10^5K ;

Лазеры на свободных электронах.

Однако для таможенной практики эти источники в настоящее время экзотичны, и основное внимание должно быть уделено именно рентгеновским трубкам различных типов и мощностей.

1.1.6. Рентгеновская интроскопия: виды и области применения

Рентгеновская интроскопия (от лат. intro – внутри и греч. skopeo – смотреть) – представляет собой метод неразрушающего контроля, позволяющий визуально наблюдать внутреннюю структуру объектов, непрозрачных для видимого света, путём преобразования рентгеновского теневого изображения в видимое на экране. В таможенном деле интроскопия является основным методом неинтрузивного осмотра.

Виды рентгеновской интроскопии:

По способу формирования изображения различают:

– **Трансмиссионная интроскопия (проекционная)** – классический метод, при котором объект просвечивается рентгеновским пучком, а прошедшее излучение регистрируется детектором, расположенным с противоположной сто-

роны объекта. Изображение формируется за счёт различной степени ослабления излучения разными участками объекта.

– **Интроскопия обратного рассеяния** – метод, при котором регистрируется излучение, отражённое (рассеянное) объектом в направлении, близком к направлению первичного пучка. Особенно чувствителен к материалам с низким атомным номером (органика) и позволяет проводить осмотр при одностороннем доступе к объекту.

По типу формирования сканирующего пучка:

Сканирование узким «веерным» лучом – объект последовательно просвечивается узким коллимированным пучком, что снижает дозовую нагрузку и улучшает отношение сигнал/шум;

Сканирование «летающим пятном» – узкий пучок последовательно перемещается по объекту;

Широкопольное просвечивание – объект облучается широким пучком, а изображение регистрируется двумерным детектором.

Области применения рентгеновской интроскопии в таможенном контроле:

- осмотр багажа и ручной клади (рентгенотелевизионные интроскопы);
- осмотр крупногабаритных грузов и автотранспорта (инспекционно-досмотровые комплексы);
- осмотр людей (микродозовые сканеры);
- идентификация веществ методом рентгенофлуорес-

центного анализа;

- выявление тайников и сокрытых вложений в конструктивных полостях.

Помимо таможенной сферы, интроскопия широко применяется в медицине (рентгенодиагностика), промышленной дефектоскопии (контроль сварных швов, литья), строительстве, археологии и других областях.

1.1.7. Типовое устройство интроскопа и технология сканирования объекта

Типовое устройство рентгеновского интроскопа

Любая система рентгеновской интроскопии включает следующие основные компоненты:

- **Источник рентгеновского излучения** – как правило, рентгеновская трубка с системой питания и управления. В современных установках используются импульсные или постоянно-потенциальные источники с возможностью регулировки анодного напряжения и тока.

- **Система коллимации** – набор свинцовых пластин и щелей, формирующих необходимую геометрию пучка (верный луч, узкий луч и т.д.).

- **Детекторная система** – устройство для регистрации прошедшего или рассеянного излучения. Может быть выполнена в виде:

- Линейки детекторов (для сканирующих систем);
- Двумерной матрицы детекторов (для широкопольных систем);

– Радиационно-оптического преобразователя с телевизионной камерой.

– **Механизм перемещения** (для сканирующих систем) – обеспечивает синхронизированное перемещение пучка и объекта или последовательное сканирование объекта.

– **Система сбора и обработки данных** – включает аналого-цифровые преобразователи, блоки памяти, компьютеры со специализированным программным обеспечением.

– **Система отображения** – монитор для вывода изображения оператору.

Технология сканирования объекта

Процесс формирования рентгеновского изображения в современных таможенных интроскопах может быть реализован различными способами. Рассмотрим наиболее распространённые технологии.

Для досмотра крупногабаритных грузов и автотранспорта (ИДК) типична следующая схема:

– объект контроля (автомобиль, контейнер) въезжает в портал или проезжает мимо стационарной установки.

– источник излучения формирует веерообразный пучок, коллимированный в вертикальной плоскости.

– пучок последовательно просвечивает объект по мере его движения через зону контроля.

– прошедшее излучение регистрируется линейкой детекторов, расположенных напротив источника.

– сигналы с детекторов оцифровываются и программно «сшиваются» в двумерное изображение всего объекта.

Для досмотра багажа и ручной клади используются, как правило, рентгентелевизионные установки конвейерного типа, где объект перемещается внутри защитной камеры, а изображение формируется в реальном времени.

Для досмотра людей применяются микродозовые сканирующие системы, реализующие принцип сканирования плоским веерообразным лучом. Примером может служить разработанная фирмой Адани система рентгеновского контроля «Контур», которая работает следующим образом:

- человек располагается в зоне сканирования;
- веерообразный пучок рентгеновского излучения последовательно (строка за строкой) сканирует объект;
- детекторы регистрируют прошедшее или рассеянное излучение;
- после окончания сканирования (обычно за 3—5 секунд) на экране дисплея формируется полное изображение человека, позволяющее выявить предметы, скрытые под одеждой.

Ключевые характеристики процесса сканирования:

Разрешающая способность – минимальный размер детали, различимой на изображении (для «Контур» – 1,5×1,5 мм);

Скорость сканирования – линейная скорость переме-

щения пучка (до 40 см/с);

Пропускная способность – количество объектов, досматриваемых за единицу времени (до 3 чел./мин);

Дозовая нагрузка – эффективная доза, получаемая объектом за один досмотр (для систем досмотра людей – не более 0,3 мкЗв, что эквивалентно 10% суточной фоновой дозы).

Важной особенностью современных интроскопов является наличие **системы разделения материалов по эффективному атомному номеру**, использующей двухэнергетические методы сканирования, что позволяет условно окрашивать на экране оператора органические вещества (в оранжево-коричневые тона), неорганические (в сине-зелёные) и металлы (в тёмно-синие), что существенно облегчает идентификацию подозрительных предметов.

Патентные исследования показывают, что развитие технологий сканирования идёт по пути совершенствования методов двустороннего сканирования, использования защитных экранов для подавления перекрёстных засветок, а также применения дифференциальных дискриминаторов и блоков запоминания для улучшения качества изображения объектов сложной конфигурации.

1.1.8. Двухракурсные интроскопы и КТ-интроскопы

Развитие технологий неинтрузивного контроля закономерно привело к появлению систем, способных формировать более информативные изображения, чем классическая

однопроекционная рентгенография. К числу таких систем относятся двухракursные интроскопы и компьютерные томографы, представляющие собой качественно новые уровни диагностики внутренней структуры объектов.

Двухракursные интроскопы

Принципиальным ограничением традиционных однопроекционных интроскопов является то, что трехмерный объект «схлопывается» в двумерное изображение, что приводит к эффекту суперпозиции – наложению теней от разных предметов, расположенных на разной глубине вдоль оси просвечивания. В результате оператор не может однозначно определить взаимное расположение предметов, а некоторые объекты могут быть полностью скрыты за более плотными.

Двухракursные (бипланарные) интроскопы решают эту проблему путем формирования двух изображений объекта в ортогональных проекциях – как правило, горизонтальной и вертикальной. Техническая реализация может быть различной:

Двухтрубчатые системы – используются два источника рентгеновского излучения и две линейки детекторов, расположенные под углом 90° друг к другу.

Одновременное сканирование – объект просвечивается одновременно двумя веерными пучками, формируя два изображения, которые отображаются на отдельных мониторах или совмещаются программно.

Последовательное сканирование – объект сканирует-

ся дважды (или используются два прохода), но для таможенных целей предпочтительнее одномоментное получение двух проекций для сохранения пропускной способности.

Ключевые преимущества двухракурсных систем:

– **Устранение эффекта суперпозиции** – предметы, перекрывающие друг друга в одной проекции, могут быть разделены в другой, что существенно повышает вероятность обнаружения опасных объектов и контрабанды, расположенных в перекрывающихся зонах.

– **Определение пространственного положения** – по двум ортогональным проекциям можно с высокой точностью определить координаты подозрительного предмета внутри объекта контроля, что критически важно при планировании последующего ручного досмотра.

– **Повышение надежности идентификации** – двухракурсное сканирование позволяет более точно оценить форму предмета, которая в одной проекции может быть искажена.

– **Эффективность для тяжелых грузов** – как показывает практика эксплуатации порталных ИДК с двумя ракурсами (боковым и вертикальным), вертикальное просвечивание дает существенные преимущества при досмотре грузов высокой плотности (строительные материалы, рулоны, паллеты), поскольку высота таких грузов в кузове (около 1,5 м) меньше ширины кузова (2,5 м), что обеспечивает лучшее прохождение излучения.

Современные двухракursные интроскопы, такие как NUSTECH CX6040D или порталные комплексы «Портал 9232» производства «Диагностика-М», демонстрируют высокую эффективность в таможенной практике. Они способны формировать цветные или черно-белые изображения с разделением материалов по эффективному атомному номеру (не менее трех групп веществ) и могут оснащаться системами автоматического обнаружения наркотических и взрывчатых веществ. Пропускная способность таких комплексов для автотранспорта достигает 120 единиц крупногабаритных и 180 единиц легковых автомобилей в час при движении через зону контроля со скоростью 5—10 км/ч.

Компьютерные томографы (КТ-интроскопы)

Наиболее совершенным методом рентгеновской интроскопии на сегодняшний день является компьютерная томография. Если двухракursные системы дают две проекции, то компьютерный томограф формирует множество проекций под разными углами и на их основе реконструирует полноценное трехмерное изображение объекта.

Принцип работы КТ-интроскопа заключается в следующем:

- Объект контроля (или источник с детекторами) вращается вокруг своей оси, либо используется кольцевая матрица детекторов с вращающимся веерным пучком.
- регистрируются тысячи теневых проекций под различными углами;

- сложные математические алгоритмы (обратное проецирование с фильтрацией, итеративные методы реконструкции) восстанавливают трехмерное распределение коэффициента ослабления в каждом элементарном объеме (вокселе) объекта;

- полученный 3D-массив данных может быть представлен в виде произвольных сечений, объемных моделей или классических двумерных проекций с возможностью вращения.

В последние годы наблюдается активное внедрение КТ-технологий в системы досмотра. Управление транспортной безопасности США (TSA) с 2024 года осуществляет планомерную установку КТ-сканеров нового поколения в контрольно-пропускных пунктах аэропортов. Ключевые преимущества КТ-интроскопов в таможенном контексте:

- **Полное устранение эффекта суперпозиции** – трехмерное изображение позволяет рассматривать объект с любой стороны, что исключает маскировку запрещенных предметов за другими объектами.

- **Точная оценка плотности и эффективного атомного номера** – томографические данные позволяют более точно классифицировать материалы по их физическим характеристикам.

- **Автоматическое обнаружение угроз** – современные КТ-системы оснащаются алгоритмами машинного обучения, способными автоматически идентифицировать взрывчатые вещества, наркотики и другие опасные предметы на основе

их трехмерной формы и плотности.

– **Упрощение процедуры досмотра для пассажиров** – при использовании КТ-сканеров для ручной клади пассажирам разрешается оставлять в сумках электронику и жидкости, что ускоряет прохождение контроля.

Важное отличие таможенных КТ-интроскопов от медицинских томографов заключается в конструкции защиты. Досмотровые томографы имеют значительно более мощное экранирование – защитой покрыта почти вся зона сканирования, включая ленту транспортера, тогда как в медицине стол пациента не экранируется, что обеспечивает минимальные уровни излучения в зоне нахождения персонала. Доза излучения рядом с такими устройствами согласно федеральным нормам ограничена значением $1,3 \times 10^{-7}$ Кл/кг на расстоянии 5 см от устройства, а фактические измеренные уровни значительно ниже – около $2,1 \times 10^{-11}$ Кл/кг за один цикл сканирования.

Перспективным направлением является разработка высокоэнергетических КТ-систем для досмотра крупногабаритных грузов. Европейский проект MULTISCAN 3D (2021—2025 гг.) исследует возможность создания 3D-рентгеновского томографа на основе лазерно-плазменных ускорителей для инспекции крупногабаритных контейнеров, совместимого с требованиями быстрых таможенных процессов. Такие системы позволят преодолеть ограничения современных методов планарного сканирования, которые уже не в полной

мере отвечают вызовам, связанным с растущим разнообразием материалов и способов сокрытия контрабанды.

1.1.9. Особенности проникающего сканирования и сканирования методом регистрации обратно рассеянного излучения

Два основных физических принципа, лежащих в основе рентгеновской интроскопии – регистрация прошедшего излучения (трансмиссионный метод) и регистрация обратно рассеянного излучения (метод обратного рассеяния) – имеют принципиальные различия, определяющие области их применения и требования к обеспечению безопасности.

Проникающее (трансмиссионное) сканирование

Как подробно рассматривалось ранее, при трансмиссионном сканировании источник и детектор располагаются по разные стороны объекта. Изображение формируется за счет различной степени ослабления излучения при прохождении через материалы разной плотности и атомного состава.

Ключевые особенности:

- **чувствительность к плотным материалам** – трансмиссионный метод наилучшим образом выявляет предметы из металлов и других материалов с высоким атомным номером, а также позволяет оценить общую заполненность объекта;

- **оценка толщины и плотности** – степень ослабления излучения пропорциональна интегральной плотности на пу-

ти луча, что дает информацию о массе и толщине просвеченных материалов;

– **двухэнергетический режим** – современные трансмиссионные системы используют два уровня энергии излучения для разделения материалов по эффективному атомному номеру, окрашивая органику, неорганику и металлы в разные цвета;

– **высокая проникающая способность** – для мощных систем (линейные ускорители) возможен контроль объектов с толщиной стали до 320—400 мм.

Ограничения:

– требуется двусторонний доступ к объекту (размещение детекторов с противоположной стороны);

– слабая чувствительность к органическим материалам малой плотности на фоне плотных предметов;

– эффект суперпозиции (наложения теней) частично компенсируется двухракурсными и томографическими системами.

Сканирование методом обратного рассеяния

Принципиально иной подход реализуется в системах обратного рассеяния, где источник и детекторы расположены с одной стороны объекта. Регистрируется излучение, испытавшее комптоновское рассеяние в материале и вернувшееся в направлении, близком к направлению первичного пучка [рассмотрено в предыдущем разделе, посвященном ИДК обратного рассеяния].

Ключевые особенности:

– **Высокая чувствительность к органике** – вероятность комптоновского рассеяния максимальна для материалов с низким атомным номером, что позволяет с исключительной контрастностью выявлять наркотические средства, взрывчатые вещества, табачные изделия, валюту и другие органические контрабандные товары.

– **Односторонний доступ** – возможность проведения досмотра при доступе только с одной стороны объекта делает технологию незаменимой для контроля крупногабаритных объектов, стационарно установленных конструкций, стен, дверей, а также в ситуациях, когда доступ к обратной стороне невозможен.

– **Выявление приповерхностных предметов** – метод наиболее эффективен для обнаружения предметов, расположенных вблизи поверхности объекта (тайники в дверных панелях, пустотелых элементах каркаса, шинах, под обшивкой).

– **Мобильность** – существуют компактные портативные версии систем обратного рассеяния, позволяющие проводить досмотр в труднодоступных местах и полевых условиях.

Ограничения:

– ограниченная глубина анализа – эффективная глубина, с которой регистрируется обратно рассеянное излучение, составляет несколько сантиметров (зависит от плотности материала);

- сложность интерпретации изображений – изображения обратного рассеяния менее привычны для операторов и требуют специальной подготовки;
- более высокие уровни рассеянного излучения в зоне нахождения персонала, что требует особого внимания к радиационной защите.

Сравнительный анализ и комбинированное применение

В современной таможенной практике наблюдается тенденция к созданию комбинированных систем, объединяющих оба метода. Такие гибридные комплексы позволяют:

- получать одновременно трансмиссионное изображение (для оценки общей структуры и выявления плотных включений) и изображение обратного рассеяния (для обнаружения органики в приповерхностных слоях);
- сопоставлять два типа изображений для более надежной идентификации подозрительных областей;
- компенсировать недостатки одного метода преимуществами другого.

Примером может служить мобильный ИДК нового поколения на базе автомобиля КАМАЗ, представленный «Росэлектроникой» в 2020 году, алгоритм которого способен автоматически «вычитать» стенки контейнера, чтобы исключить возможность «закладок» в металлическом корпусе, что подразумевает использование, в том числе, методов обратного рассеяния для контроля приповерхностных слоев.

Актуальность для радиационной безопасности

С точки зрения обеспечения радиационной безопасности принципиально важно понимать различия в формировании радиационной обстановки при работе этих двух типов систем:

Трансмиссионные системы – основная опасность связана с прошедшим через объект излучением, которое может создавать высокие мощности дозы за объектом. Однако при правильной организации зон доступа и наличии защитных ограждений персонал находится вне прямого пучка. Дополнительный вклад дает рассеянное от объекта и окружающих предметов излучение.

Системы обратного рассеяния – значительная часть рассеянного излучения направлена в сторону оператора и окружающего пространства, что создает специфическую радиационную обстановку, при которой уровни излучения в зоне нахождения персонала могут быть выше, чем у традиционных систем. Особого внимания требует защита хрусталиков глаз, щитовидной железы и кожи.

КТ-системы – при вращающейся геометрии сканирования рассеянное излучение распределяется более равномерно по всем направлениям, но благодаря усиленному экранированию рабочей зоны уровни облучения персонала минимальны.

Для должностных лиц, ответственных за организацию радиационной безопасности, важно при планировании разме-

щения оборудования и организации рабочих мест учитывать эти особенности и применять соответствующие меры защиты, включая индивидуальный дозиметрический контроль с учетом специфики каждого метода сканирования.

1.1.10. Использование рентгеновских интроскопов в целях таможенного контроля

Применение рентгеновской интроскопии в таможенном деле занимает особое место среди методов неинтрузивного контроля, поскольку именно эта технология позволяет в кратчайшие сроки получать достоверную информацию о содержимом объектов контроля без их вскрытия и разгрузки. Значение интроскопии для таможенной практики трудно переоценить – она стала тем инструментом, который качественно изменил саму философию досмотра, превратив его из трудоемкой процедуры физического обследования в высокотехнологичный аналитический процесс.

В соответствии с рекомендациями Всемирной таможенной организации, закрепленными в Рамочных стандартах безопасности, использование технологий неинтрузивного контроля признается важнейшим фактором упрощения процедур торговли при одновременном повышении эффективности контрольных мероприятий. Рентгеновские интроскопы позволяют таможенным органам оперативно подтверждать или опровергать результаты оценки рисков, что значительно сокращает количество нецелесообразных физических досмотров и, как следствие, снижает временные из-

держки участников внешнеэкономической деятельности.

В практической деятельности таможенных органов рентгеновские интроскопы решают широкий спектр задач. Они применяются для обнаружения наркотических средств, взрывчатых веществ, оружия, контрабандных товаров, предметов, запрещенных к перемещению через границу, а также для выявления тайников и сокрытых вложений в конструктивных полостях транспортных средств и грузов. Возможность обнаруживать предметы размером в несколько сантиметров в многометровых контейнерах или железнодорожных вагонах делает интроскопию незаменимым инструментом в борьбе с трансграничной преступностью.

1.1.11. Перечень технических средств таможенного контроля, содержащих генерирующие источники ионизирующего излучения

Современный арсенал технических средств таможенного контроля, относящихся к классу источников ионизирующего излучения генерирующих, отличается большим разнообразием как по конструктивному исполнению, так и по функциональному назначению. Все эти устройства объединяет общий принцип действия – генерация рентгеновского излучения за счет ускорения электронов и их взаимодействия с веществом анода, однако условия эксплуатации, требования к безопасности и методики применения каждого типа техники имеют свою специфику.

Наиболее многочисленную группу составляют **рентгено-**

телевизионные установки для досмотра багажа и ручной клади – интроскопы конвейерного типа, которые можно встретить практически в каждом аэропорту, на вокзалах и в пунктах пропуска через государственную границу. Эти устройства представляют собой защищенную камеру с движущейся лентой, внутри которой расположены рентгеновская трубка и детекторная система. Объект контроля перемещается по конвейеру, просвечивается веерным пучком излучения, а прошедшее излучение регистрируется линейкой детекторов, формируя на экране оператора теневое изображение содержимого. Современные модели, такие как «Сапфир-ИР6550» производства холдинга «Швабе», способны сканировать отправления весом до 160 кг за одну операцию и обладают функциями автоматической сигнализации при обнаружении материалов высокой плотности.

Для досмотра крупногабаритных грузов, автотранспорта, железнодорожных вагонов, авиационных и морских контейнеров применяются **инспекционно-досмотровые комплексы (ИДК)**, представляющие собой принципиально иной класс оборудования. В зависимости от условий эксплуатации ИДК могут быть стационарными, размещаемыми в специально оборудованных боксах на бетонных фундаментах, мобильными, смонтированными на шасси грузовых автомобилей или трейлеров, и порталными, через которые транспортные средства проезжают в процессе движения. В качестве источников излучения в ИДК используют-

ся как рентгеновские аппараты, так и линейные ускорители электронов – так называемые «Линотроны» с энергией излучения до 9 МэВ, обеспечивающие проникающую способность, достаточную для контроля содержимого заполненных металлических контейнеров.

Отдельную категорию составляют **системы досмотра транспорта комбинированного типа**, объединяющие технологии проникающего излучения и обратного рассеяния. Такие комплексы, например, оборудование серии Rapiscan Eagle, позволяют одновременно получать трансмиссионные изображения для выявления плотных включений и изображения обратного рассеяния для обнаружения органических веществ в приповерхностных слоях. Технология CabScan, реализованная в некоторых моделях, обеспечивает сканирование кабины водителя на пониженной мощности излучения с автоматическим переключением на более высокую энергию при досмотре грузового отсека, что демонстрирует дифференцированный подход к обеспечению безопасности.

Для досмотра труднодоступных мест и выявления тайников в конструктивных полостях транспортных средств предназначены **портативные системы обратного рассеяния**, такие как MINI Z или отечественный Феникс. Данные миниатюрные беспроводные аппараты массой всего 4,2 кг позволяют оператору сканировать скрытые полости автомобиля, шины, отсеки грузовых контейнеров и получать изоб-

ражение на дисплее планшета, обнаруживая взрывоопасные предметы и запрещенные органические вещества, включая наркотики и табачные изделия.

Важное место в номенклатуре занимают **рентгеновские сканеры для досмотра людей**, работающие на принципе микродозового сканирования, а также **рентгенофлуоресцентные анализаторы**, используемые для идентификации химического состава веществ. Последние, хотя и создают значительно меньшие уровни излучения, также относятся к классу генерирующих источников и требуют соблюдения соответствующих мер радиационной безопасности.

1.1.12. Особенности проведения сканирования объектов различными техническими средствами

Процесс сканирования объектов с применением разных типов рентгеновской техники имеет свою специфику, обусловленную как конструктивными особенностями оборудования, так и характером досматриваемых объектов. Понимание этих особенностей необходимо должностным лицам для эффективного применения технических средств и правильной организации мер безопасности.

При работе с **конвейерными интроскопами для багажа** объект контроля перемещается внутри защитной камеры, полностью экранирующей излучение. Оператор находится в зоне, где уровни излучения не превышают фоновых значений, при условии исправности защитных штор и блокировок. Основная задача должностного лица в данном слу-

чае сводится к правильной интерпретации получаемых изображений с учетом цветового кодирования материалов – органические вещества отображаются в оранжево-коричневой гамме, неорганические в сине-зеленой, а материалы смешанного состава в зеленых тонах. Важно понимать, что качество изображения зависит от правильности укладки объектов на ленте и исключения зон перекрытия, которые могут маскировать потенциально опасные предметы.

Инспекционно-досмотровые комплексы для крупногабаритных грузов функционируют в ином режиме. При стационарном исполнении все элементы комплекса размещаются в кондиционируемых боксах на бетонных фундаментах, а досматриваемое транспортное средство проезжает через зону контроля со скоростью 5—10 км/ч. В мобильных вариантах излучатель и детекторная система смонтированы на транспортной базе и разворачиваются на месте эксплуатации. Особенность сканирования в ИДК заключается в том, что изображение формируется последовательно, строка за строкой, по мере движения объекта относительно измерительного поста. Применяемые твердотельные детекторы обеспечивают пространственное разрешение 1—2 мм, что позволяет выявлять предметы минимальных размеров даже в полностью загруженных контейнерах. Важной особенностью современных ИДК является возможность двухпроекционного сканирования, когда объект просвечивается одновременно в горизонтальной и вертикальной плоскостях, что

позволяет практически полностью исключить эффект суперпозиции и точно определять местоположение подозрительных предметов.

Сканирование с использованием **систем обратного рассеяния** имеет принципиально иную геометрию. Поскольку источник и детекторы расположены с одной стороны, оператор может работать с объектом, не имея доступа к его обратной стороне, что особенно ценно при досмотре стационарно установленных конструкций или в полевых условиях. Однако, как отмечалось ранее, такая схема формирует специфическую радиационную обстановку с повышенными уровнями рассеянного излучения вблизи оператора. Портативные системы MINI Z, например, требуют от должностного лица особой внимательности при выборе позиции сканирования и строгого соблюдения временных режимов работы.

Комбинированные системы, объединяющие оба метода, позволяют проводить многоракурсное сканирование за один проход объекта. Транспортное средство движется через портал, где последовательно или одновременно облучается пучками, формирующими как трансмиссионные изображения, так и изображения обратного рассеяния, что дает возможность оператору видеть не только общую структуру груза, но и выявлять органические материалы в приповерхностных слоях, например, в дверных панелях или шинах. Пропускная способность таких комплексов может достигать 400 автомобилей в час при досмотре на скорости до 60 км/

ч, что особенно важно для пунктов пропуска с высокой интенсивностью движения.

Особого внимания заслуживает организация сканирования **железнодорожного транспорта**. Здесь используются специализированные порталные системы, через которые состав проходит со скоростью 5—10 км/ч. Системы снабжаются счетчиками вагонов, что позволяет вести выборочный контроль любых грузов, перевозимых в поезде. Более того, современные разработки предусматривают возможность проверки не только всего состава, но и отдельных вагонов с помощью специальных переносных устройств сканирования, что расширяет гибкость применения.

Завершая рассмотрение физических основ рентгеновской интроскопии, необходимо подчеркнуть, что эффективное применение всех перечисленных технических средств невозможно без глубокого понимания тех процессов, которые были изложены в данном разделе. Знание природы рентгеновского излучения, принципов формирования изображений, особенностей различных методов сканирования и типов оборудования составляет фундамент профессиональной компетенции должностных лиц, ответственных за организацию таможенного контроля. Именно на данном фундаменте базируются как навыки правильной интерпретации получаемых изображений, так и осознанное обеспечение радиационной безопасности при работе с генерирующими источниками ионизирующего излучения.

1.2. Характеристика ДРТ и РСЧ как источников рентгеновского излучения, требующих выполнения мер по радиационной безопасности

Досмотровая рентгентелевизионная техника (ДРТ) представляет собой наиболее многочисленную и широко применяемую группу технических средств таможенного контроля, относящихся к генерирующим источникам ионизирующего излучения. В соответствии с принятой в нормативных документах терминологией, такие устройства классифицируются как рентгеновские установки для досмотра багажа и товаров (РУДБТ). Именно эти установки являются основным инструментом неинтрузивного досмотра ручной клади, багажа, почтовых отправлений и различных товаров, перемещаемых через таможенную границу. Понимание их устройства, принципов действия и особенностей формирования излучения служит необходимым условием для осознанного применения мер радиационной безопасности как при повседневной эксплуатации, так и при организации таможенного контроля в пунктах пропуска.

1.2.1. Виды РУДБТ и их применение в таможенном контроле

Санитарно-эпидемиологические правила и нормы Сан-

ПиН 2.6.4115—25 [14], утвержденные постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27.03.2025 №6, вводят четкую классификацию рентгеновских установок для досмотра багажа и товаров. Согласно пункту 5 главы V данного документа, РУДБТ подразделяются на два типа в зависимости от способа перемещения объекта контроля относительно источника излучения. К первому типу относятся установки с движущимся объектом контроля, где предметы перемещаются конвейерной лентой внутри защитной камеры, а рентгеновский излучатель и детекторная система остаются неподвижными. Второй тип объединяет установки с неподвижным объектом контроля, в которых досматриваемый предмет помещается в камеру и остается неподвижным в процессе сканирования, а излучатель либо перемещается вокруг него, либо формирует широкий пучок, охватывающий весь объект одновременно.

В практической деятельности таможенных органов наибольшее распространение получили РУДБТ первого типа – конвейерные интроскопы. Они устанавливаются в зонах таможенного контроля аэропортов, железнодорожных вокзалов, автомобильных пунктов пропуска и в отделениях почтовой связи. Эти устройства позволяют в непрерывном режиме проводить досмотр багажа и ручной клади пассажиров, а также мелких грузовых отправок, обеспечивая высокую пропускную способность. Вторым типом РУДБТ применя-

ется в тех случаях, когда требуется более детальное исследование объектов повышенной важности либо когда габариты или особенности упаковки не позволяют использовать конвейерную ленту. Такие установки часто используются для досмотра дипломатической почты, ценных грузов, а также в экспертно-криминалистических подразделениях.

Приказ Министерства финансов Российской Федерации от 21 февраля 2024 г. №33н «Об утверждении перечня и порядка применения технических средств таможенного контроля» [9] включает рентгентелевизионную досмотровую технику в число основных средств, используемых должностными лицами при осуществлении таможенного контроля. В перечне указаны как стационарные, так и переносные рентгеновские установки, предназначенные для досмотра багажа и товаров, что подтверждает их ключевую роль в современной таможенной практике.

1.2.2. Основные блоки и узлы, принцип работы

Независимо от типа, любая РУДБТ состоит из нескольких обязательных функциональных элементов, каждый из которых играет определенную роль в формировании теневого рентгеновского изображения и обеспечении безопасности персонала и окружающих [28].

Центральным элементом любой установки является рентгеновский излучатель, представляющий собой рентгеновскую трубку, помещенную в защитный кожух с масляным или воздушным охлаждением. Рентгеновская трубка гене-

рирует излучение при торможении ускоренных электрическим полем электронов на аноде. Анодное напряжение в таких трубках обычно составляет от 100 до 160 кВ для стандартных багажных интроскопов, что обеспечивает достаточную проникающую способность для просвечивания типичных предметов багажа. Высоковольтный генератор преобразует сетевое напряжение в постоянное высокое напряжение, подаваемое на электроды трубки, а система управления позволяет регулировать анодное напряжение и ток трубки в зависимости от плотности и размеров досматриваемого объекта.

Излучение, выходящее из рентгеновской трубки, формируется с помощью коллиматора – устройства из свинца или другого материала с высоким атомным номером, создающего узкий веерообразный пучок, распространяющийся в одной плоскости. Такая геометрия пучка необходима для получения четкого изображения и минимизации рассеянного излучения. В установках первого типа веерный пучок располагается перпендикулярно направлению движения конвейерной ленты и пересекает зону контроля по всей ширине туннеля.

Приемная система состоит из линейки детекторов, расположенных напротив излучателя за противоположной стенкой туннеля. Детекторы преобразуют прошедшее через объект рентгеновское излучение в электрические сигналы. Современные интроскопы используют твердотельные детекто-

ры на основе сцинтилляционных материалов (например, йодида цезия) в сочетании с фотодиодами, что обеспечивает высокую чувствительность и быстродействие. В двухэнергетических системах применяются детекторы, чувствительные к разным диапазонам энергий, что позволяет разделять материалы по их эффективному атомному номеру и окрашивать органику, неорганику и металлы в различные цвета на экране оператора.

Механизм перемещения объекта в установках первого типа представлен конвейерной лентой, которая протягивает багаж через зону контроля с постоянной скоростью. Электродвигатель с редуктором обеспечивает плавный ход, а датчики положения фиксируют момент входа и выхода объекта. В установках второго типа вместо конвейера может использоваться поворотный стол или механизм, перемещающий излучатель вокруг объекта.

Система сбора и обработки данных включает в себя электронные платы, аналого-цифровые преобразователи, специализированные процессоры и компьютер с программным обеспечением. Сигналы от каждого детектора оцифровываются, обрабатываются и синтезируются в двумерное изображение, которое выводится на монитор оператора. Современное программное обеспечение позволяет масштабировать изображение, изменять контрастность, применять фильтры и автоматически выделять подозрительные области.

Важнейшим компонентом любой РУДБТ является си-

стема обеспечения радиационной безопасности. Конструкция установки включает стационарную радиационную защиту – свинцовые или стальные экраны, которыми облицованы стенки досмотровой камеры. Входное и выходное отверстия туннеля перекрываются эластичными свинецсодержащими шторками, которые препятствуют выходу излучения наружу при прохождении объекта. Кроме того, установки оснащаются системой блокировок, исключающих генерацию излучения при открытых защитных дверцах или снятых панелях, а также световой и звуковой сигнализацией, информирующей о включении рентгеновского излучения.

Принцип работы РУДБТ первого типа заключается в следующем. При включении установки рентгеновская трубка начинает генерировать веерный пучок излучения. Объект контроля, помещенный на конвейерную ленту, движется через зону контроля. По мере прохождения объекта различные его участки ослабляют излучение в разной степени в зависимости от плотности и атомного состава материалов. Детекторы непрерывно регистрируют интенсивность прошедшего излучения, и на основе этих данных компьютер строит изображение, где более плотные участки выглядят темнее. Поскольку сканирование происходит непрерывно при движении ленты, каждый элемент объекта отображается последовательно, формируя полное изображение после выхода из туннеля.

В установках второго типа объект остается неподвижным,

а излучатель и детекторная система либо сканируют его узким пучком, перемещаясь вдоль объекта, либо объект просвечивается широким пучком и регистрируется двумерной матрицей детекторов. Второй вариант обеспечивает более быстрое получение изображения, но требует более сложной и дорогой детекторной системы.

1.2.3. Энергия излучения и ее значение

Энергетические характеристики рентгеновского излучения, создаваемого РУДБТ, определяются анодным напряжением рентгеновской трубки. Для типичных багажных интроскопов максимальное анодное напряжение лежит в диапазоне 100—160 кВ, что соответствует максимальной энергии фотонов до 160 кэВ, чего достаточно для просвечивания большинства предметов багажа, включая плотные материалы, такие как металлы, но недостаточно для проникновения сквозь толстые стальные стенки контейнеров, для чего применяются инспекционно-досмотровые комплексы с ускорителями электронов на энергии в мегаэлектронвольтном диапазоне.

Энергия излучения влияет на проникающую способность и качество получаемого изображения. Более высокое напряжение позволяет лучше видеть объекты за плотными экранами, но снижает контрастность для слабопоглощающих материалов, таких как органика. Поэтому в современных установках часто используется двухэнергетический режим, когда трубка работает в импульсном режиме с чередованием

высокого и низкого напряжения, либо применяются детекторы, способные различать фотоны разных энергий, что позволяет одновременно получать информацию и о плотности, и об атомном номере вещества.

Согласно требованиям, СанПиН 2.6.4115—25 [14], при эксплуатации РУДБТ мощность амбиентного эквивалента дозы рентгеновского излучения на расстоянии 0,1 м от внешней поверхности досмотровой камеры не должна превышать 2,5 мкЗв/ч. Данное жесткое ограничение достигается за счет конструкции защитного кожуха и блокировок. Мощность дозы на постоянных рабочих местах лиц, не отнесенных к персоналу группы А или Б, не должна превышать 0,5 мкЗв/ч, что обычно выполняется при правильном размещении оборудования и соблюдении зон безопасности.

Поскольку РУДБТ относятся к генерирующим источникам, их излучение существует только в период генерации. При выключении питания рентгеновская трубка перестает испускать рентгеновские лучи практически мгновенно, что является важным преимуществом с точки зрения безопасности. Однако в процессе работы возможно образование небольшого количества озона и оксидов азота под действием ионизирующего излучения, поэтому в помещениях, где установлены мощные или постоянно работающие установки, должна предусматриваться вентиляция.

1.2.4. Обеспечение радиационной безопасности при эксплуатации РУДБТ

Эксплуатация рентгеновских установок для досмотра багажа и товаров требует выполнения целого комплекса организационных и технических мер, направленных на защиту персонала, пассажиров и окружающей среды от необоснованного облучения. Помимо конструктивных особенностей самих установок, важную роль играют правильная организация рабочих мест, проведение регулярного радиационного контроля и обучение персонала.

В соответствии с пунктами 94—101 главы V СанПиН 2.6.4115—25 [14], при эксплуатации РУДБТ необходимо обеспечить исправность систем блокировки, исключающих генерацию излучения при открытой досмотровой камере или остановке конвейера. На входе и выходе из досмотровой камеры должны быть установлены эластичные защитные шторки или дверцы, обеспечивающие мощность дозы на расстоянии 0,1 м от их поверхности не более 2,5 мкЗв/ч. Радиационный контроль таких установок должен проводиться не реже одного раза в год, а также после каждого ремонта, влияющего на радиационную безопасность. В ходе контроля измеряется мощность дозы на расстоянии 0,1 м от наружной поверхности установки и на постоянных рабочих местах, расположенных вблизи.

Важно подчеркнуть, что должностные лица таможенных органов, работающие с РУДБТ, как правило, не относятся к категории персонала группы А, если уровни излучения на их рабочих местах не превышают установленных для на-

селения значений. Тем не менее, они должны проходить инструктаж по радиационной безопасности, знать правила эксплуатации конкретного оборудования и уметь действовать в нештатных ситуациях. Конструкция современных интроскопов практически исключает возможность облучения оператора при соблюдении правил эксплуатации, однако пренебрежение требованиями, например, попытка извлечь застрявший багаж при включенной генерации, может привести к опасному облучению.

Таким образом, знание устройства, принципа действия и энергетических характеристик рентгеновских установок для досмотра багажа и товаров является неотъемлемой частью профессиональной компетенции должностного лица таможенного органа. Только понимание физических процессов, происходящих в этих приборах, позволяет осознанно применять меры защиты и обеспечивать безопасность при выполнении служебных обязанностей.

1.2.5. Элементы конструкции ДРТ, обеспечивающие радиационную безопасность персонала и окружающих

Рассмотрение физических основ рентгеновской интроскопии и общего устройства досмотровой рентгенотелевизионной техники было бы неполным без детального анализа тех конструктивных решений, которые превращают потенциально опасное оборудование в безопасный инструмент повседневной работы. Безопасность персонала, пассажиров

и окружающих при эксплуатации РУДБТ обеспечивается не каким-то одним устройством, а целостной системой инженерно-технических средств, действующих по принципу эшелонированной защиты. Каждый элемент данной системы выполняет свою функцию, а их совокупность гарантирует, что даже при возникновении нештатной ситуации уровни облучения не превысят установленных нормативов.

В основе обеспечения радиационной безопасности лежит фундаментальное разделение мер защиты на два направления: защита от прямого пучка излучения и защита от излучения рассеянного. Прямой пучок, формируемый рентгеновской трубкой и коллиматором, обладает максимальной интенсивностью и представляет наибольшую опасность при прямом попадании на человека. Рассеянное излучение возникает при взаимодействии первичного пучка с досматриваемым объектом, стенками камеры и окружающими предметами; его интенсивность значительно ниже, но именно оно создает общий радиационный фон в помещении и требует не менее серьезного внимания при проектировании защиты.

Защитный корпус и стационарные экраны

Первым и наиболее важным барьером на пути излучения служит защитный корпус досмотровой установки. Конструктивно РУДБТ выполняется таким образом, что рентгеновская трубка размещается внутри прочного металлического кожуха, который снаружи, как правило, не выглядит чем-то особенным, однако его внутренняя поверхность или специ-

альные полости содержат слои материалов с высоким атомным номером, преимущественно свинца или его сплавов. Выбор свинца обусловлен его высокой плотностью и способностью эффективно поглощать рентгеновское излучение в том энергетическом диапазоне, который характерен для багажных интроскопов.

Стенки досмотровой камеры, через которую проходит конвейерная лента, также имеют многослойную конструкцию, включающую помимо несущих элементов дополнительные защитные экраны. Толщина и конфигурация данной защиты рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить выполнение жесткого требования СанПиН 2.6.4115—25 [14]: мощность амбиентного эквивалента дозы на расстоянии 0,1 м от внешней поверхности установки не должна превышать 2,5 мкЗв/ч, что означает, что даже при непрерывной работе в течение всего рабочего дня человек, находящийся в непосредственной близости от аппарата, получит дозу, не превышающую установленные для населения значения.

Важно понимать, что защитный корпус ослабляет не только прямое излучение, но и ту его часть, которая рассеивается внутри камеры от досматриваемых предметов и элементов конструкции. Без надлежащего экранирования рассеянное излучение могло бы проникать наружу через технологические отверстия и зазоры, создавая повышенный фон в зоне нахождения оператора. Поэтому при проектировании осо-

бое внимание уделяется местам ввода конвейерной ленты, соединениям панелей и дверцам для технического обслуживания.

Система коллимации пучка

Коллиматор представляет собой устройство из материала с высоким атомным номером, обычно свинца или вольфрама, в котором выполнено отверстие строго заданной геометрии, формирующее рабочий пучок излучения. В рентгеновских установках для досмотра багажа используется веерообразный пучок, коллимированный таким образом, чтобы его толщина в плоскости сканирования составляла всего несколько миллиметров при ширине, перекрывающей весь туннель. Такая геометрия позволяет получать четкое изображение при минимальной ширине пучка и, следовательно, при минимальном рассеянии.

Коллиматор выполняет одновременно две функции, имеющие прямое отношение к радиационной безопасности. Во-первых, он ограничивает область прямого облучения строго пределами досмотровой камеры, не позволяя пучку выходить за ее границы. Во-вторых, уменьшая поперечное сечение пучка, коллиматор пропорционально снижает количество рассеянного излучения, возникающего при взаимодействии с объектом контроля, поскольку площадь, с которой происходит рассеяние, оказывается минимально необходимой для формирования изображения. Специализированная литература по неразрушающему контролю подтвер-

ждает, что использование коллиматора позволяет не только повысить контраст получаемого изображения, но и существенно сократить размеры зоны с повышенной мощностью дозы вокруг работающей установки, что напрямую снижает потенциальную дозовую нагрузку на персонал.

В современных РУДБТ коллиматор часто выполняется регулируемым, с возможностью изменения раскрытия щелей в соответствии с размерами досматриваемого объекта. Однако в любом случае конструкция исключает возможность направления пучка за пределы защитной камеры.

Эластичные защитные шторы

Входное и выходное отверстия туннеля досмотровой установки, через которые движется конвейерная лента, являются технологически необходимыми элементами, которые, тем не менее, создают потенциальный канал для выхода излучения. Для его перекрытия применяются эластичные защитные шторы, изготавливаемые из резины или пластика с равномерно распределенным в материале свинцовым наполнителем. Эти шторы представляют собой несколько слоев полос, свободно свисающих сверху и частично перекрывающих друг друга наподобие жалюзи, что позволяет досматриваемым предметам беспрепятственно проходить через туннель, но при этом эффективно задерживает рассеянное и ослабленное прямое излучение.

Согласно требованиям пункта 97 главы V СанПиН 2.6.4115—25 [14], мощность дозы на расстоянии 0,1 м

от поверхности защитных шторок при закрытом положении не должна превышать тех же $2,5 \text{ мкЗв/ч}$, что и для остальных поверхностей установки, что достигается как за счет свинец-содержащего материала самих шторок, так и за счет их многорядной конструкции, при которой стыки между отдельными полосами перекрываются соседними рядами, исключая прямое «просвечивание» через зазоры.

Важно отметить, что эффективность шторок в значительной степени зависит от их технического состояния. Со временем под воздействием постоянного трения проходящего багажа края шторок могут истираться, а сами полосы деформироваться, что приводит к образованию щелей. Поэтому периодический осмотр и своевременная замена шторок являются важными элементами обеспечения радиационной безопасности.

Система блокировок и сигнализации

Никакая пассивная защита не будет эффективной, если не исключена возможность доступа человека в зону генерации излучения. Для этого все современные РУДБТ оснащаются системой блокировок, которая представляет собой совокупность электрических и механических устройств, контролирующих положение защитных дверц, съемных панелей и состояние защитных шторок.

Как указывается в описаниях подобных систем, конструкция блокировки должна исключать возможность генерации рентгеновского излучения при снятых или неправиль-

но установленных защитных блоках, а также при открытой досмотровой камере. В установках с движущимся объектом блокировка также должна отключать генерацию при остановке конвейера, чтобы исключить ситуацию, когда неподвижный объект длительное время облучается в одной позиции.

Принципиальным требованием, закрепленным в пункте 94 главы V СанПиН 2.6.4115—25 [14], является невозможность отключения систем блокировки без нарушения пломб изготовителя или организации, осуществляющей техническое обслуживание, что исключает случайное или преднамеренное отключение защиты неквалифицированным персоналом.

Дополняет систему блокировок световая и звуковая сигнализация. На пульте оператора и, как правило, на корпусе установки имеются световые индикаторы, четко показывающие, включена ли генерация излучения. Во многих моделях при включении рентгеновского излучения загорается предупреждающее табло «Не входить!» или аналогичное, а в зоне загрузки багажа может подаваться звуковой сигнал.

Радиационная защита рабочего места оператора

Хотя современные РУДБТ спроектированы таким образом, что рабочее место оператора находится в зоне с фоновыми уровнями излучения, конструкцией дополнительно предусматриваются меры по защите оператора от того незначительного рассеянного излучения, которое может прони-

кать наружу. Пульт управления, как правило, размещается за дополнительной защитной ширмой или стойкой, либо в отдельном помещении. Само по себе расположение оператора сбоку от входного отверстия туннеля, а не напротив него, уже снижает облучение, поскольку интенсивность рассеянного излучения максимальна в направлении, близком к направлению первичного пучка.

Кроме того, смотровые окна, если они предусмотрены конструкцией для наблюдения за процессом досмотра, выполняются из свинцового стекла, ослабляющего излучение до безопасного уровня. В тех случаях, когда по условиям работы необходимо находиться в непосредственной близости от установки, например, при проведении технического обслуживания, персонал должен использовать индивидуальные средства защиты, однако в штатном режиме работы оператора необходимость в этом отсутствует.

Комплексный подход к обеспечению безопасности

Рассмотренные элементы конструкции действуют не изолированно, а как единая система. Защитный корпус и экраны создают основной барьер, коллиматор минимизирует образование рассеянного излучения, шторы перекрывают технологические отверстия, а блокировки гарантируют, что ни один из этих элементов не может быть отключен или обойден без остановки генерации. Именно такое сочетание инженерных решений позволяет обеспечить уровень облучения персонала и окружающих, не превышающий установленных

нормативов, и сделать применение РУДБТ безопасным при условии соблюдения правил эксплуатации.

Важно подчеркнуть, что ответственность за поддержание этих систем в исправном состоянии лежит на эксплуатирующей организации. Регулярный радиационный контроль, проводимый в соответствии с пунктом 99 СанПиН 2.6.4115—25 [14], призван подтверждать, что ослабляющие свойства защиты не ухудшились со временем, а системы блокировки сохраняют работоспособность. Только при выполнении этих условий можно гарантировать, что все конструктивные элементы продолжают выполнять свои функции в полном объеме.

Требования по безопасности, изложенные в руководстве по эксплуатации, и расположение кнопок аварийного выключения

Рассмотрение конструктивных элементов, обеспечивающих радиационную безопасность, было бы неполным без обращения к документации, которая регламентирует правильную эксплуатацию этих систем. Руководство по эксплуатации (инструкция по эксплуатации) каждой модели рентгеновской установки для досмотра багажа и товаров является основным документом, определяющим порядок безопасной работы, обязанности оператора и действия в нештатных ситуациях. Данный документ разрабатывается изготовителем в соответствии с требованиями технических регламентов и санитарных правил и должен находиться на каждом ра-

бочем месте, а его содержание в обязательном порядке доводится до сведения персонала при проведении инструктажа.

В руководстве по эксплуатации подробно описываются все этапы работы с установкой, начиная от включения и заканчивая завершением смены, причем особое внимание уделяется именно вопросам безопасности. Как правило, в нем указывается, что перед началом работы оператор обязан убедиться в исправности всех систем, включая визуальный контроль состояния защитных шторок, целостность корпуса и наличие пломб на узлах блокировок. Описывается порядок включения, при котором сначала подается питание на системы управления, затем запускается конвейер, и только после этого включается высокое напряжение, генерирующее рентгеновское излучение. При этом руководство подчеркивает, что включение генерации должно сопровождаться соответствующими световыми и звуковыми сигналами, на которые оператор обязан обращать внимание.

Важнейший раздел руководства посвящен действиям при возникновении нештатных ситуаций, таких как остановка конвейера, застревание багажа, неисправность блокировок или появление посторонних лиц в опасной зоне. В нем четко прописывается запрет на любые попытки вмешательства в работу установки, особенно на попытки извлечь застрявший предмет при включенной генерации. Описывается алгоритм действий: необходимо немедленно отключить генерацию с помощью штатных средств управления или кноп-

ки аварийной остановки и лишь после этого, убедившись по индикации, что излучение отсутствует, предпринимать какие-либо действия. Особо подчеркивается, что открытие защитных дверц или снятие панелей разрешается только после полного обесточивания установки.

Регулярность проверок систем безопасности также фиксируется в руководстве по эксплуатации. Обычно предписывается ежесменная проверка работоспособности световой и звуковой сигнализации, а также периодическая (например, ежеквартальная или ежегодная) проверка эффективности защитных шторок и систем блокировки специалистами по радиационной безопасности или представителями сервисной организации. Все эти требования напрямую вытекают из пунктов 94—101 главы V СанПиН 2.6.4115—25 [14], которые устанавливают обязательные нормы для всех РУД-БТ.

Отдельного внимания заслуживает такой элемент управления безопасностью, как кнопка аварийного выключения (аварийного останова). Данное устройство является последним рубежом защиты, позволяющим оператору или любому другому лицу мгновенно прекратить генерацию излучения в случае возникновения опасности, которую автоматика не смогла предотвратить или которая развивается слишком быстро. Кнопка аварийного останова представляет собой орган ручного управления, выполненный, как правило, в виде грибовидного толкателя красного цвета, расположенного

на видном и легкодоступном месте. Согласно требованиям электробезопасности, такая кнопка должна быть самоблокирующейся, то есть после нажатия она фиксируется в отключенном состоянии и возврат в рабочее положение возможен только путем принудительного поворота или вытягивания, что исключает случайное включение.

В типовой конструкции РУДБТ предусматривается размещение как минимум одной кнопки аварийного останова на пульте оператора, чтобы он мог немедленно отключить установку, не покидая рабочего места. Однако для обеспечения безопасности при нахождении персонала в разных частях помещения часто устанавливаются дополнительные кнопки. Например, одна кнопка может располагаться непосредственно на корпусе установки вблизи входного отверстия туннеля, а другая – у выхода, что позволяет любому должностному лицу таможенных органов, заметившему опасную ситуацию, быстро остановить генерацию, не тратя время на поиск пульта.

Важно отметить, что кнопка аварийного останова действует независимо от основной системы управления и блокировок. Ее нажатие приводит к непосредственному разрыву цепей питания высокого напряжения и остановке конвейера, минуя все промежуточные логические схемы. Тем самым гарантируется, что даже при отказе программного обеспечения или электроники, аварийное отключение будет выполнено аппаратно. После срабатывания аварийной кнопки

для возобновления работы необходимо не только вернуть ее в исходное положение, но и, как правило, выполнить процедуру сброса аварийного сигнала на пульте управления, что предотвращает автоматический запуск после случайного отпущивания кнопки.

Местоположение кнопок аварийного останова и их маркировка должны соответствовать требованиям не только руководства по эксплуатации, но и общих стандартов безопасности. Обычно они выделяются ярким цветом, часто красным на желтом или белом фоне, и снабжаются надписью «Аварийный стоп» или общепринятым символом. В зоне видимости кнопок не должно быть посторонних предметов, затрудняющих доступ к ним. Все должностные лица таможенных органов, допущенные к работе на установке, должны быть не только проинструктированы о местонахождении этих кнопок, но и периодически тренироваться в их использовании в ходе учебных тревог.

Таким образом, руководство по эксплуатации служит настольной книгой оператора, детально описывающей безопасные приемы работы, а кнопки аварийного выключения являются тем надежным и простым инструментом, который позволяет в критической ситуации мгновенно предотвратить возможное облучение. Знание и неукоснительное соблюдение требований эксплуатационной документации, а также четкое представление о расположении и принципе действия средств аварийной остановки – неотъемлемая часть профес-

сиональной подготовки любого должностного лица, работающего с рентгеновской досмотровой техникой.

1.2.6. Виды рентгеновских сканеров человека и их применение в таможенном контроле

Рентгеновские сканеры для персонального досмотра людей (РСЧ) представляют собой особый класс технических средств таможенного контроля, предназначенный для обнаружения предметов, скрытых под одеждой человека, а также в естественных полостях тела [25]. В отличие от досмотровой рентгенотелевизионной техники для багажа, где доза облучения объекта не играет определяющей роли, при создании РСЧ главным требованием является обеспечение предельно низких уровней облучения при сохранении достаточной обнаружительной способности. Именно поэтому такие установки называют микродозовыми или ультранизкодозовыми системами [20].

Все рентгеновские сканеры для персонального досмотра людей подразделяются на два основных типа в зависимости от физического принципа формирования изображения. К первому типу относятся установки, сканирующие человека узким веерным пучком рентгеновского излучения с регистрацией излучения, прошедшего через тело человека. Такие сканеры работают по трансмиссионному принципу, аналогичному тому, что используется в медицинской рентгенографии. Ко второму типу относятся установки, осуществляющие двумерное сканирование человека игольчатым пучком

рентгеновского излучения с регистрацией излучения, отраженного от тела человека, то есть методом обратного рассеяния [30].

Трансмиссионные сканеры обеспечивают получение изображения, на котором хорошо видны плотные предметы, включая металлические объекты, керамику, а также предметы, скрытые внутри тела. Однако они дают меньше информации о распределении органических материалов малой плотности на поверхности тела. Сканеры обратного рассеяния, напротив, обладают высокой чувствительностью к органическим веществам, таким как наркотики, взрывчатка, бумажные деньги, но имеют ограниченную способность выявлять предметы за плотными участками тела [33].

Существуют также комбинированные системы, объединяющие оба метода. Например, двухпроекционный сканер «Контур» позволяет получать одновременно два изображения: одно в полный рост человека (трансмиссионное), а второе – изображение зоны брюшной полости с повышенной детализацией, что существенно расширяет возможности обнаружения небольших объектов, включая проглоченные контейнеры с наркотиками, драгоценные камни и металлы.

В практике таможенного контроля рентгеновские сканеры человека применяются для решения широкого круга задач. Прежде всего, это выявление контрабанды наркотических средств, которые злоумышленники пытаются провезти, скрывая их под одеждой или внутри тела. Сканеры эффек-

тивно обнаруживают также ювелирные изделия, драгоценные камни, крупные суммы наличных денег, оружие, взрывчатые вещества и другие предметы, запрещенные к перемещению через границу. Известны случаи, когда при досмотре с использованием рентгеновских сканеров в аэропорту Шереметьево у пассажиров обнаруживали тысячи единиц ювелирных изделий общим весом более 13 кг, а также драгоценные камни общей массой почти 4 тысячи карат.

Особую ценность представляют РСЧ для выявления предметов, спрятанных в естественных полостях тела. Мобильные телефоны, сим-карты, контейнеры с наркотиками – все эти объекты, содержащие металлические элементы или обладающие характерной формой, уверенно идентифицируются на рентгеновских изображениях. В пенитенциарных учреждениях такие сканеры стали незаменимым инструментом предотвращения проноса запрещенных предметов.

1.2.7. Основные блоки и узлы, принцип работы рентгеновских сканеров человека

Конструкция рентгеновского сканера для персонального досмотра человека представляет собой сложный комплекс, включающий несколько основных функциональных элементов. В типовом исполнении, характерном для систем типа «Сибскан» или «Контур», установка состоит из двух вертикальных стоек или шкафов, размещенных на некотором расстоянии друг от друга. В одной стойке располагается рентгеновский излучатель с системой коллимации, в другой – при-

емная система (детекторы). Пространство между стойками является зоной сканирования, куда помещается досматриваемый человек.

Рентгеновский излучатель в таких установках представляет собой маломощную рентгеновскую трубку с анодным напряжением, как правило, не превышающим 160 кВ для трансмиссионных систем и несколько меньшим для систем обратного рассеяния. Особенностью конструкции является формирование чрезвычайно узкого пучка излучения. В системе «Сибскан» используется плоский веерообразный луч толщиной около 1,5 мм, формируемый специальной системой коллиматоров. В сканере «Контур» ширина пучка не превышает 2 мм, что позволяет минимизировать дозовую нагрузку на досматриваемого человека.

Принцип работы основан на сканировании человека узким пучком, который перемещается вдоль тела. В зависимости от конструктивного решения, сканирование может осуществляться двумя способами. В первом варианте излучатель и детекторная система синхронно перемещаются вдоль неподвижно стоящего человека. Так реализована работа сканера «Сибскан», где механическая система обеспечивает вертикальное перемещение со скоростью до 40 см/с. Во втором варианте, примененном в сканере «Контур», излучатель и детектор остаются неподвижными, а сканирование происходит за счет перемещения человека на специальной движущейся платформе. В любом случае обеспечивает-

ся последовательное просвечивание всего тела.

Детекторная система в современных РСЧ представляет собой линейку высокочувствительных полупроводниковых сцинтилляционных детекторов, расположенных вертикально. В трансмиссионных системах детекторы регистрируют излучение, прошедшее через тело человека и ослабленное в различной степени разными тканями и предметами. В системах обратного рассеяния детекторы располагаются с той же стороны, что и излучатель, и улавливают отраженное от тела и скрытых предметов излучение. В двухпроекционных системах может использоваться комбинация обоих типов детекторов.

Сигналы с детекторов оцифровываются и поступают в компьютер, где специальное программное обеспечение синтезирует из последовательных строк сканирования полноценное двумерное изображение. Получение изображения происходит практически в реальном времени. Так, в системе «Сибскан» после окончания сканирования, занимающего не более 5 секунд, снимок сразу появляется на экране дисплея. Низкий уровень геометрических искажений и высокое пространственное разрешение (до $1,5 \times 1,5$ мм в системе «Сибскан» и до 2,5 мм в сканере «Контур») позволяют оператору уверенно идентифицировать подозрительные предметы.

Важным элементом конструкции является система обеспечения безопасности. В соответствии с требованиями, РСЧ

оснащаются световой и звуковой сигнализацией, информирующей о включении генерации излучения. Устройство пульта управления должно исключать возможность несанкционированного включения, например, с помощью замкового устройства или ввода специального пароля. Обязательным является наличие блокировок, исключающих возможность генерации излучения при открытой досмотровой камере или при любых неисправностях, влияющих на облучение людей.

1.2.8. Энергия излучения и дозовые характеристики

Энергетические характеристики рентгеновского излучения, создаваемого сканерами для персонального досмотра, подбираются таким образом, чтобы обеспечить оптимальный баланс между проникающей способностью и безопасностью. Анодное напряжение рентгеновской трубки в различных моделях может варьироваться, но в целом находится в диапазоне, достаточном для просвечивания тканей человека и выявления скрытых предметов.

Главным параметром, характеризующим безопасность РСЧ, является индивидуальная эффективная доза, получаемая человеком за одно сканирование. Действовавшие санитарные правила СанПиН 2.6.1.3106—13 устанавливали, что сканеры, обеспечивающие дозу не более 0,3 мкЗв за одно сканирование, могут использоваться для персонального досмотра любыми организациями, имеющими соответствующую лицензию. Данное значение выбрано не случайно – оно

составляет примерно 10% от суточной фоновой дозы, получаемой человеком от естественных источников излучения на поверхности Земли.

Современные микродозовые сканеры уверенно укладываются в данное требование. Так, система «Сибскан» обеспечивает дозу около 0,3 мкЗв за один досмотр. Сканер «Контур» имеет полностью настраиваемую дозу в диапазоне от 0,10 до 4,5 мкЗв, при этом в однопроекционном режиме типовое значение составляет 0,25 мкЗв, а в двухпроекционном – около 2,0 мкЗв. Даже в последнем случае доза остается значительно ниже установленного предела годовой эффективной дозы для населения, который составляет 1 мЗв (1000 мкЗв) в год.

Важно отметить, что для обеспечения безопасности лиц, которые могут многократно проходить сканирование (например, сотрудники служб безопасности или часто летающие пассажиры), санитарными правилами установлен дополнительный предел: годовая эффективная доза облучения критической группы населения за счет любого разрешенного использования РСЧ не должна превышать 0,3 мЗв, что означает, что даже при регулярном досмотре накопленная доза не превысит допустимого уровня.

Энергия излучения также определяет проникающую способность сканера. Для трансмиссионных систем важным параметром является способность обнаруживать предметы за плотными тканями. Сканер «Контур», например, обеспе-

чивает проникающую способность до 34 мм по стали, что вполне достаточно для выявления металлических предметов, скрытых за мягкими тканями. Системы обратного рассеяния, использующие меньшие энергии, эффективны для выявления органических материалов на поверхности тела.

Принципиальное значение имеет то обстоятельство, что все современные РСЧ относятся к генерирующим источникам ионизирующего излучения, что означает, что излучение существует только в процессе сканирования и мгновенно прекращается при его завершении или при срабатывании систем блокировки. В выключенном состоянии такие установки не представляют никакой радиационной опасности.

Соблюдение дозовых пределов и требований к конструкции обеспечивается проведением регулярного радиационного контроля. В соответствии с санитарными правилами, перед началом работы персонал обязан проверять соответствие дозы за одно сканирование требованиям технической документации. Кроме того, осуществляется периодический контроль мощности амбиентного эквивалента дозы на расстоянии 10 см от внешней поверхности сканера, которая не должна превышать 1 мкЗв/ч при любом допустимом режиме работы.

Таким образом, знание видов, устройства и энергетических характеристик рентгеновских сканеров для персонального досмотра людей является необходимым условием их грамотной эксплуатации. Понимание того, как формирует-

ся изображение, от чего зависит дозовая нагрузка и какие конструктивные решения обеспечивают безопасность, позволяет должностным лицам таможенных органов эффективно применять эти технические средства при неукоснительном соблюдении принципа радиационной безопасности.

1.2.9. Элементы конструкции рентгеновских сканеров человека, обеспечивающие радиационную безопасность сканируемых лиц, персонала и окружающих

При разработке рентгеновских сканеров для персонального досмотра людей вопросы радиационной безопасности приобретают особую значимость, поскольку объектом контроля здесь выступает непосредственно человек. В отличие от досмотровой техники для багажа, где допустимы существенно более высокие уровни облучения, конструкция РСЧ подчиняется главному принципу: обеспечение необходимой обнаружительной способности при минимально возможном воздействии на организм. Достижение данной цели обеспечивается целым комплексом инженерно-технических решений, которые можно разделить на несколько взаимосвязанных групп: средства минимизации дозы облучения сканируемого лица, средства внешней защиты окружающих и персонала, системы блокировок и сигнализации.

Международный стандарт IEC 62463:2024, являющийся основополагающим документом в области радиационной защиты при использовании рентгеновских сканеров для до-

смотр людей, устанавливает единые требования ко всем типам таких систем, независимо от применяемого физического принципа формирования изображения. Данный стандарт охватывает три категории лиц, чья защита должна обеспечиваться конструкцией: непосредственно сканируемые люди, лица, находящиеся вблизи оборудования, и операторы. Примечательно, что в новой редакции стандарта классификация систем изменена: вместо деления по типу технологии (трансмиссия или обратное рассеяние) введена классификация, основанная на уровне дозы и применяемых административных мерах контроля, что подчеркивает, что безопасность определяется не столько типом сканера, сколько его конкретными дозовыми характеристиками и конструктивными особенностями.

1.2.10. Минимизация дозы облучения сканируемого лица

Главным отличием РСЧ от других рентгеновских установок является то, что излучение воздействует непосредственно на тело человека. Поэтому конструкция сканера должна обеспечивать предельно низкую дозу облучения при сохранении требуемого качества изображения. Как отмечалось ранее, современные микродозовые сканеры обеспечивают дозу порядка 0,25—0,3 мкЗв за одно сканирование, что составляет примерно 10% от суточной фоновой дозы, что достигается совокупностью нескольких конструктивных решений.

Прежде всего, используется маломощная рентгеновская трубка, работающая в импульсном режиме с очень низким анодным током. В отличие от медицинских рентгеновских аппаратов, где требуется высокое качество изображения для диагностики, для задач обнаружения контрабанды достаточно меньшей детализации, что позволяет существенно снизить мощность излучения.

Ключевую роль играет система коллимации, формирующая чрезвычайно узкий пучок излучения. В сканерах типа «Сибскан» используется плоский веерообразный луч толщиной около 1,5 мм, в сканере «Контур» ширина пучка не превышает 2 мм, что означает, что в каждый момент времени облучению подвергается лишь узкая полоска тела, а не вся его поверхность. При сканировании пучок последовательно перемещается вдоль тела, и любая точка поверхности облучается лишь в течение долей секунды. Такой метод сканирования позволяет минимизировать интегральную дозу при сохранении возможности получения полноценного изображения всего тела.

Важным элементом является конструкция самого рентгеновского излучателя. Он должен обеспечивать минимальную утечку излучения во всех направлениях, кроме рабочего пучка. Согласно требованиям, радиационный выход за пределами полезного пучка должен быть сведен к практически фоновым значениям. В трансмиссионных системах дополнительное ослабление неиспользуемого излучения обеспечива-

ется конструкцией штатива и защитных кожухов.

В системах обратного рассеяния, где детекторы расположены с той же стороны, что и излучатель, особое значение приобретает форма пучка. Использование игольчатого пучка, сканирующего объект по двум координатам, позволяет минимизировать площадь облучения в каждый момент времени и, соответственно, снизить дозу.

1.2.11. Защита окружающих и персонала от внешнего облучения

Хотя сам сканируемый человек получает минимальную дозу, основная задача конструкторов – не допустить облучения лиц, не участвующих в досмотре, и самого оператора. Для этого применяются различные средства внешней защиты, которые можно разделить на стационарные (встроенные в конструкцию сканера) и дополнительные (защитные кабины, ограждения).

В базовой комплектации любой сертифицированный РСЧ имеет встроенную радиационную защиту, обеспечивающую выполнение требования о мощности амбиентного эквивалента дозы на расстоянии 0,1 м от внешней поверхности сканера не более 1 мкЗв/ч при любом допустимом режиме работы, что достигается за счет экранирования корпуса материалами с высоким атомным номером, как правило, свинцом или его сплавами. Толщина и конфигурация защиты рассчитываются таким образом, чтобы ослабить как прямое излучение (в тех направлениях, где оно может выходить за пре-

делу рабочей зоны), так и рассеянное от тела сканируемого и элементов конструкции.

Однако в реальных условиях эксплуатации, особенно в местах с высокой проходимостью, например в аэропортах или на пунктах пропуска, даже такого уровня ослабления может быть недостаточно, поскольку люди могут находиться в непосредственной близости от сканера постоянно. Для таких случаев разработаны специальные защитные кабины, представляющие собой внешнее ограждение, полностью изолирующее зону сканирования от окружающего пространства. Компания LINEV Systems, например, предлагает рентгенозащитную кабину для своих сканеров CONPASS и CONPASS SMART, которая позволяет минимизировать зону радиационной безопасности и размещать оборудование даже в местах с ограниченным пространством.

Защитная кабина оснащается передними и задними раздвижными дверями, что обеспечивает удобство прохода сканируемых лиц и может использоваться в различных операционных сценариях. Конструкция кабины обеспечивает свинцовый эквивалент, достаточный для того, чтобы операторы и посторонние лица могли находиться в непосредственной близости от сканера без какого-либо радиационного воздействия, что соответствует требованиям американского национального стандарта ANSI/HPS 43.17—2009. Важной опцией являются рентгенозащитные смотровые окна, позволяющие оператору наблюдать за поведением сканируемого че-

ловека на протяжении всего процесса досмотра. Такие окна изготавливаются из специального свинцового стекла, ослабляющего излучение до безопасного уровня при сохранении прозрачности.

Системы блокировок и сигнализации

Никакая пассивная защита не будет эффективной, если не исключена возможность случайного или преднамеренного облучения людей. Конструкция любого РСЧ в обязательном порядке включает несколько независимых систем блокировки и сигнализации, которые обеспечивают безопасность во всех режимах работы.

Главным элементом являются блокировки дверей. В сканерах, оснащенных защитными кабинами, двери оборудуются электромеханическими замками и датчиками положения, которые исключают возможность включения генерации излучения при открытых дверях. Более того, если дверь открывается во время работы, блокировка должна обеспечивать немедленное прекращение генерации, причем время срабатывания должно быть достаточно малым, чтобы исключить облучение даже при случайном входе человека в зону сканирования.

Помимо блокировок дверей, в конструкцию закладываются блокировки, исключающие возможность включения генерации при снятых или неправильно установленных защитных панелях, а также при любых неисправностях, влияющих на облучение людей. Эти блокировки, как правило,

опломбируются, и их отключение невозможно без нарушения пломбы изготовителя или сервисной организации.

Устройство пульта управления должно исключать возможность несанкционированного включения сканера лицом, не имеющим допуска. Обычно это реализуется с помощью ключ-марки или ввода специального пароля. Кроме того, на пульте предусматривается кнопка аварийного останова, позволяющая оператору мгновенно прекратить генерацию в любой нештатной ситуации.

Световая и звуковая сигнализация является обязательным атрибутом любого РСЧ. В процессе сканирования должны включаться предупреждающие световые табло (например, «Не входить!»), хорошо видимые со всех подходов к сканеру, а также подаваться звуковой сигнал, информирующий о начале и окончании облучения. В защитных кабинах может использоваться дополнительная сигнализация внутри кабины, предупреждающая сканируемого о процессе.

Особенности защиты для систем обратного рассеяния

Системы, работающие по принципу обратного рассеяния, имеют специфические особенности формирования радиационной обстановки, которые учитываются при проектировании защиты. Поскольку детекторы и излучатель расположены с одной стороны, значительная часть рассеянного излучения направлена в сторону оператора и окружающего пространства, что требует более тщательного экранирования

не только прямого пучка, но и направлений возможного выхода рассеянного излучения.

В таких системах особое внимание уделяется защите оператора, который при определенных конфигурациях может находиться относительно недалеко от зоны сканирования. Пульт управления обычно размещается за дополнительной защитной ширмой или в отдельном помещении. Кроме того, применяются специальные алгоритмы сканирования, при которых мощность излучения автоматически снижается до минимума, необходимого для получения изображения.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.