

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
Направление подготовки 12.03.01 «Приборостроение»
Отделение контроля и диагностики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Контроль полых и заполненных аммиачными солями резервуаров с помощью цифровой радиографии

УДК – 620.179.152:658.562.47:621.642:661.52:

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5А	Хоназаров Анваржон Ганижон угли		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов Сергей Павлович	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Креницына Зоя Васильевна	К.Т.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Гуляев Милий Всеволодович			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Мойзес Борис Борисович	К.Т.Н.		

Планируемые результаты освоения

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР
Р1	Работать индивидуально и в коллективе по междисциплинарной тематике, внедрять в практическую деятельность инновационные подходы для достижения конкретных результатов, обеспечивать корпоративные интересы и соблюдать корпоративную этику	<p>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-3; ОПК-4, 8) CDIO Syllabus (2.3, 3.1, 3.2, 4.7, 4.8) Критерий 5 АИОР (п. 1.6, 2.3, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI <u>Требования профессиональных стандартов</u> 19.016. Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов №1161н (рег. № 418 от 26.12.14) 19.026. Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса №156н (рег. №436 от 3.12.15) 19.032. Специалист по диагностике газотранспортного оборудования №1125н (рег. №800 от 24.12.15) 29.004. «Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптотехники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов» № 1141н (рег. №40836 от 28.01.16) 29.006. Специалист по проектированию систем в корпусе №519н (рег. №850 от 15.09.16) 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции №46271 (рег. №31 от 21.03.17) 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам № 31692 (рег. № от 21.03.14) 40.053. Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса №864н (рег. №34867 от 24.11.14) 40.108. Специалист по неразрушающему контролю №976н (рег. №658 от 3.12.15) 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики №181н (рег. № 961 от 15.02.17)</p>
Р2	Применять основные законы и положения естественных наук и математики, экономических и гуманитарных наук знаний с учетом социальных и культурных аспектов инженерной деятельности при соблюдении требований охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности для ведения полноценной профессиональной деятельности	<p>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-7, 8; ОПК-1, 3, 10) CDIO Syllabus (1.1., 2.5) Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.3, 2.5, 4.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI <u>Требования профессиональных стандартов</u> 19.016. Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов №1161н (рег. № 418 от 26.12.14) 19.026. Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса №156н (рег. №436 от 3.12.15) 19.032. Специалист по диагностике газотранспортного оборудования №1125н (рег. №800 от 24.12.15) 29.004. «Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптотехники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов» № 1141н (рег. №40836 от 28.01.16) 29.006. Специалист по проектированию систем в корпусе №519н (рег. №850 от 15.09.16) 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции №46271 (рег. №31 от 21.03.17) 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам № 31692 (рег. № от 21.03.14) 40.053. Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса №864н (рег. №34867 от 24.11.14) 40.108. Специалист по неразрушающему контролю №976н (рег. №658 от 3.12.15) 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики №181н (рег. № 961 от 15.02.17)</p>
Р3	Осуществлять коммуникацию в профессиональной среде, в обществе, в т.ч. межкультурном уровне и на иностранном языке	<p>Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-4, 5, ОПК-8, ПК-17) CDIO Syllabus (3.2) Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI <u>Требования профессиональных стандартов</u> 19.016. Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов №1161н (рег. № 418 от 26.12.14) 19.026. Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса №156н (рег. №436 от 3.12.15) 19.032. Специалист по диагностике газотранспортного оборудования №1125н (рег. №800 от 24.12.15) 29.004. «Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптотехники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов» № 1141н (рег. №40836 от 28.01.16) 29.006. Специалист по проектированию систем в корпусе №519н (рег. №850 от 15.09.16)</p>

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР
		15.09.16) 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции №46271 (рег. №31 от 21.03.17) 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам № 31692 (рег. № от 21.03.14) 40.053. Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса №864н (рег. №34867 от 24.11.14) 40.108. Специалист по неразрушающему контролю №976н (рег. №658 от 3.12.15) 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики №181н (рег. № 961 от 15.02.17)
P4	Самообучаться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-6) CDIO Syllabus (2.4) Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI <u>Требования профессиональных стандартов</u> 19.016. Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов №1161н (рег. № 418 от 26.12.14) 19.026. Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса №156н (рег. №436 от 3.12.15) 19.032. Специалист по диагностике газотранспортного оборудования №1125н (рег. №800 от 24.12.15) 29.004. «Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов» № 1141н (рег. №40836 от 28.01.16) 29.006. Специалист по проектированию систем в корпусе №519н (рег. №850 от 15.09.16) 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции №46271 (рег. №31 от 21.03.17) 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам № 31692 (рег. № от 21.03.14) 40.053. Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса №864н (рег. №34867 от 24.11.14) 40.108. Специалист по неразрушающему контролю №976н (рег. №658 от 3.12.15) 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики №181н (рег. № 961 от 15.02.17)
P5	Собирать, хранить и обрабатывать информацию, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности при соблюдении основных требований информационной безопасности	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, ОПК-2, 5-9) Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI <u>Требования профессиональных стандартов</u> 19.016. Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов №1161н (рег. № 418 от 26.12.14) 19.026. Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса №156н (рег. №436 от 3.12.15) 19.032. Специалист по диагностике газотранспортного оборудования №1125н (рег. №800 от 24.12.15) 29.004. «Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов» № 1141н (рег. №40836 от 28.01.16) 29.006. Специалист по проектированию систем в корпусе №519н (рег. №850 от 15.09.16) 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции №46271 (рег. №31 от 21.03.17) 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам № 31692 (рег. № от 21.03.14) 40.053. Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса №864н (рег. №34867 от 24.11.14) 40.108. Специалист по неразрушающему контролю №976н (рег. №658 от 3.12.15) 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики №181н (рег. № 961 от 15.02.17)
P6	Планировать и проводить теоретические и экспериментальные исследования, анализировать и	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, ОПК-5, 6, ПК-1-4). CDIO Syllabus (2.1, 2.2, 2.3, 2.4) Критерий 5 АИОР (п. 1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI <u>Требования профессиональных стандартов</u>

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР
	обрабатывать их результаты с использованием инновационных методов моделирования и компьютерных сетевых технологий	19.016. Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов №1161н (рег. № 418 от 26.12.14) 19.026. Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса №156н (рег. №436 от 3.12.15) 19.032. Специалист по диагностике газотранспортного оборудования №1125н (рег. №800 от 24.12.15) 29.004. «Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов» № 1141н (рег. №40836 от 28.01.16) 29.006. Специалист по проектированию систем в корпусе №519н (рег. №850 от 15.09.16) 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции №46271 (рег. №31 от 21.03.17) 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам № 31692 (рег. № от 21.03.14) 40.053. Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса №864н (рег. №34867 от 24.11.14) 40.108. Специалист по неразрушающему контролю №976н (рег. №658 от 3.12.15) 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики №181н (рег. № 961 от 15.02.17)
Р7	Проектировать, конструировать системы, приборы, детали и узлы с учетом обеспечения технологичности конструкции с учетом возможных рисков	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2, ПК-1-6, 8) CDIO Syllabus (1.2., 1.3, 2.4, 4.1, 4.4) Критерий 5 АИОР (п. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI <u>Требования профессиональных стандартов</u> 19.016. Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов №1161н (рег. № 418 от 26.12.14) 19.026. Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса №156н (рег. №436 от 3.12.15) 19.032. Специалист по диагностике газотранспортного оборудования №1125н (рег. №800 от 24.12.15) 29.004. «Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов» № 1141н (рег. №40836 от 28.01.16) 29.006. Специалист по проектированию систем в корпусе №519н (рег. №850 от 15.09.16) 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции №46271 (рег. №31 от 21.03.17) 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам № 31692 (рег. № от 21.03.14) 40.053. Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса №864н (рег. №34867 от 24.11.14) 40.108. Специалист по неразрушающему контролю №976н (рег. №658 от 3.12.15) 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики №181н (рег. № 961 от 15.02.17)
Р8	Проводить мероприятия комплексной подготовки производства в сфере профессиональной деятельности с использованием ресурсоэффективных технологий	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-4, ПК-8-18) CDIO Syllabus (2.4, 4.2, 4.3, 4.5) Критерий 5 АИОР (п. 1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI <u>Требования профессиональных стандартов</u> 19.016. Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов №1161н (рег. № 418 от 26.12.14) 19.026. Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса №156н (рег. №436 от 3.12.15) 19.032. Специалист по диагностике газотранспортного оборудования №1125н (рег. №800 от 24.12.15) 29.004. «Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов» № 1141н (рег. №40836 от 28.01.16) 29.006. Специалист по проектированию систем в корпусе №519н (рег. №850 от 15.09.16) 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции №46271 (рег. №31 от 21.03.17) 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР
		разработкам № 31692 (рег. № от 21.03.14) 40.053. Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса №864н (рег. №34867 от 24.11.14) 40.108. Специалист по неразрушающему контролю №976н (рег. №658 от 3.12.15) 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики №181н (рег. № 961 от 15.02.17)
Р9	Обеспечивать эксплуатацию и обслуживание информационно-измерительных средств, приборов контроля качества и диагностики	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2, ПК-7, 19-23) CDIO Syllabus (4.6.) Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI <u>Требования профессиональных стандартов</u> 19.016. Специалист по диагностике линейной части магистральных газопроводов №1161н (рег. № 418 от 26.12.14) 19.026. Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса №156н (рег. №436 от 3.12.15) 19.032. Специалист по диагностике газотранспортного оборудования №1125н (рег. №800 от 24.12.15) 29.004. «Специалист в области проектирования и сопровождения производства оптоэлектроники, оптических и оптико-электронных приборов и комплексов» № 1141н (рег. №40836 от 28.01.16) 29.006. Специалист по проектированию систем в корпусе №519н (рег. №850 от 15.09.16) 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции №46271 (рег. №31 от 21.03.17) 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам № 31692 (рег. № от 21.03.14) 40.053. Специалист по организации постпродажного обслуживания и сервиса №864н (рег. №34867 от 24.11.14) 40.108. Специалист по неразрушающему контролю №976н (рег. №658 от 3.12.15) 40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики №181н (рег. № 961 от 15.02.17)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 12.03.01 «Приборостроение»
 Отделение контроля и диагностики

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

 (Подпись) _____ (Дата) Мойзес Б.Б.

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы
<small>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</small>

Студенту:

Группа	ФИО
1Б5А	Хоназарову Анваржону Ганижону угли

Тема работы:

Контроль полых и заполненных аммиачными солями резервуаров с помощью цифровой радиографии	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	3499/С от 06.05.2019
Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2019

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объект исследований – полые и заполненные аммиачными солями резервуаров. Предмет исследования – методы цифровой радиографии. Цель работы – обоснование возможности контроля полых и заполненных аммиачными солями резервуаров методом цифровой радиографии.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи: <ul style="list-style-type: none"> – адаптировать математическую модель формирования цифровых радиографических изображений крупногабаритных объектов применительно к контролю полых и заполненных аммиачными солями резервуаров; – на основе предложенной математической модели разработать алгоритм и программу имитационного моделирования для получения реалистичных цифровых радиографических изображений объектов исследования; – разработать методику оценки ожидаемой производительности контроля; – сформулировать рекомендации по выбору схемы сканирования полых и заполненных аммиачными солями резервуаров методом

	цифровой радиографии и предложения для рационального подбора элементов соответствующих систем.
Перечень графического материала	1. Схемы 2. Изображения 3. Графики
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	Креницына Зоя Васильевна
Социальная ответственность	Гуляев Милий Всеволодович

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов Сергей Павлович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5А	Хоназаров Анваржон Ганижон угли		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1Б5А	Хоназарову Анваржону Ганижону угли

Школа	ИШНКБ	Отделение	ОКД
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	12.03.01 «Приборостроение»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	НИ проводится лаборатории ИДК-1,18/2 корпуса. ОДК, ИШНКБ, ТПУ. В работе над проектом задействованы 2 человека: научный руководитель и студент-дипломник
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»; Минимальный размер оплаты труда в 2018 году составляет 9750 рублей.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления по страховым взносам – 27,1% от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	- Потенциальные потребители результатов НИ; - Анализ конкурентных технических решений.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	- Определение трудоемкости выполнения работ; - Расчет материальных затрат НИ; - Основная и дополнительная зарплата исполнителей темы; - Отчисления во внебюджетные фонды; - Накладные расходы.
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	- Расчет уравнений эффективности НИ; - Расчет уравнений сравнительной эффективности НИ.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Матрица SWOT
2. Альтернативы проведения НИ
3. График проведения и бюджет НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	12.03.19
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Криницына Зоя Васильевна	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5А	Хоназаров Анваржон Ганижон угли		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1Б5А	Хоназарову Анваржону Ганижону угли

Школа	ИШНКБ	Отделение	ОКД
Уровень образования	Бакалавриат	Направление	12.03.01 «Приборостроение»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения.	Контроль полых и заполненных аммиачными солями резервуаров с помощью цифровой радиографии. Объектом исследования является контроль резервуара для хранения жидкого аммиака. Областью применения является радиационный метод неразрушающего контроля (дефектоскопия). Лаборатория РКНЛ РКД ИШНКБ (18/2 корпус, помещение ИДК-1).
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	Рассмотреть специальные правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
2. Производственная безопасность 2.1. Анализ потенциально возможных вредных и опасных факторов проектируемой 2.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	<ul style="list-style-type: none"> – повышенный уровень шума на рабочем месте; – неудовлетворительное освещение; – неудовлетворительный микроклимат; – повышенный уровень электромагнитного излучения (ЭМИ); – ионизирующее излучение (ИИ); – электробезопасность
3. Экологическая безопасность	<ul style="list-style-type: none"> – анализ влияния объекта исследования на окружающую среду; – анализ влияния процесса исследования на окружающую среду;
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> – анализ возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС – пожар; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий; – Пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Гуляев Милий Всеволодович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б5А	Хоназаров Анваржон Ганижон угли		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа неразрушающего контроля и безопасности
 Направление подготовки 12.03.01 «Приборостроение»
 Уровень образования Бакалавриат
 Отделение контроля и диагностики
 Период выполнения осенний / весенний семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела / вид работы	Максимальный балл раздела
25.02.2019	Адаптированная математическая модель формирования цифровых радиографических изображений крупногабаритных объектов применительно к контролю полых и заполненных аммиачными солями резервуаров	30
15.04.2019	Объект контроля и выбор основных параметров системы цифровой радиографии	10
10.05.2019	Имитационное моделирование цифровых радиографических изображений ёмкостей для хранения жидкого аммиака и его солей	10
31.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	10
31.05.2019	Социальная ответственность	20
25.05.2019	Заключение	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ведущий научный сотрудник РКНЛ РКД	Осипов Сергей Павлович	к.т.н.		24.09.2019

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Мойзес Борис Борисович	к.т.н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 103 с., 9 рис., 33 табл., 65 источник, 1 прил.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, тормозное излучение, цифровая радиография, крупногабаритные резервуары, сталь, аммиачные соли.

Объект исследования – полые и заполненные аммиачными солями резервуары.

Предмет исследования – методы цифровой радиографии.

Цель работы – обоснование возможности контроля полых и заполненных аммиачными солями резервуаров с помощью цифровой радиографии.

Адаптирована математическая модель формирования цифровых радиографических изображений крупногабаритных объектов применительно к контролю полых и заполненных аммиачными солями резервуаров. На основе предложенной математической модели разработан алгоритм и программа имитационного моделирования, позволяющие получить реалистичные цифровые радиографические изображения объектов исследования.

Экономическая эффективность и значимость работы заключается в разработке подхода к научному обоснованию возможности проектирования систем цифровой радиографии применительно к контролю полых и заполненных аммиачными солями резервуаров.

Практическая значимость работы заключается в том, что адаптированная математическая модель, алгоритм и программа имитационного моделирования могут быть использованы для обоснования технической реализуемости задачи проектирования систем цифровой радиографии для контроля полых и заполненных аммиачными солями резервуаров.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий, соединения сварные, радиографический метод. – М.: Стандартинформ, 2008. –19 с.
2. ГОСТ 17038.–79. Детекторы ионизирующих излучений сцинтилляционные. Метод измерения спектрометрической постоянной фотоэлектронного умножителя, используемого для определения сцинтилляционных параметров детекторов.
3. ОАО «Газпром» Стандарт Организации «Газораспределительные системы. Методика проведения рентгенографического контроля сварных соединений стальных газопроводов с применением метода цифровой рентгенографии», СТО Газпром 2–2.3–561–2011.
4. ISO 14096-1-2005. Non-destructive testing –Qualification of radiographic film digitisation systems –Part 1: Definitions,quantitative measurements of image quality parameters, standard reference film and qualitative control.
5. ISO 14096-2-2005. Non-destructive testing –Qualification of radiographic film digitisation systems – Part 2: Minimum requirements.
6. EN 14096-1: 2003–08–00 Non-destructive testing –Qualification of radiographic film digitisation systems – Part 1: Definitions, quantitative measurements of image quality parameters, standard reference film and qualitative control; German version EN 14096-1:2003 S-16-188.
7. EN 14096–:2003–08–00 Non-destructive testing –Qualification of radiographic film digitisation systems – Part 2: Minimum requirements; German version EN 14096-2:2003 S-16-189.
8. ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. – М.: Стандартинформ, 2007. –16 с.
9. Международный стандарт ISO/FDIS17636-2 Non-destructive testing of welds – Radiographic testing – Part2: X-and gamma–ray techniques with digital detectors. 2013–01–15.

10. ГОСТ ISO 17636–1–2017 Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 1. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением пленки. – Стандартинформ, 2018. – 36 с.

11. ГОСТ ISO 17636–2–2017 Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 2. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением цифровых детекторов. – Стандартинформ, 2018. – 54 с.

12. МЭК 60522:1999 Определение собственной фильтрации рентгеновского излучателя.

13. ГОСТ 20337–74 Приборы рентгеновские. Термины и определения.

14. ГОСТ 22091.14–86 Приборы рентгеновские. Метод измерения плотности потока энергии (плотности потока фотонов) рентгеновского излучения.

15. СанПиН 2.6.1.2523–09 "Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009".

Обозначения и сокращения

Сокращения

ЦР – цифровая радиография

ОК – объект контроля

ИРИ – источник рентгеновского излучения

ИТИ – источник тормозного излучения

РРИ – регистратор рентгеновского излучения

РТИ – регистратор тормозного излучения

РЧП – радиационно-чувствительный преобразователь

КД – комбинированный детектор

ДПП – детектор прямого преобразования

ПР – пространственное разрешение

ЭР – эффективность регистрации

РК – радиационный контраст

ФП – фотопреобразователь (фотоприёмник)

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ОСШ – отношение сигнал/шум

ПК – производительность контроля

МКО – массовый коэффициент ослабления излучения

ЛКО – линейный коэффициент ослабления излучения

СанПиН – санитарные нормы и правила

НРБ – нормы радиационной безопасности

ПСС – проникающая способность по стали

УВИ – угол выхода излучения

РФП – размер фокусного пятна

Обозначения

E_{max} – максимальная энергия рентгеновского излучения, кэВ

E – энергия рентгеновского (гамма-) фотона

$f(E, E_{max})$ – энергетический спектр рентгеновского излучения

F – фокусное расстояние

k_x – радиационный контраст

SNR – отношение сигнал/шум

ρ – плотность материала

Z – эффективный атомный номер

H – толщина ОК

ρH – массовая толщина ОК

m – МКО материала ОК

μ_d – ЛКО излучения материалом РЧП

r_x – пространственное разрешение

Z_d – эффективный атомный номер РЧП КД или ДПП

h_d – толщина РЧП

$\varepsilon(E, h_d)$ – энергетическая зависимость ЭР рентгеновского (тормозного)

излучения

Оглавление

Введение.....	19
1 Обзор литературы	23
1.1 От классической радиологии к цифровой радиологии	23
1.2 Классификация методов и систем цифровой радиологии.....	25
1.2.1 Классификация систем цифровой радиологии по источникам фотонного излучения.....	25
1.2.2 Классификация систем цифровой радиологии по регистраторам фотонного излучения.....	31
1.3 О цели и задачи исследований.....	33
2 Адаптированная математическая модель формирования цифровых радиографических изображений крупногабаритных объектов применительно к контролю полых и заполненных аммиачными солями резервуаров	34
2.1 Блок описания исходных параметров системы цифровой радиологии ...	35
2.2 Конечные характеристики систем цифровой радиологии	38
2.3 Блок формирования предварительной информации по ослаблению и регистрации гамма-излучения	38
2.4 Блок формирования аналоговых (виртуальных) радиографических изображений объекта контроля	41
2.5 Блок оцифровки аналоговых (виртуальных) радиографических изображений объекта контроля	43
2.6 Зашумление аналоговых (виртуальных) радиографических изображений	44
2.7 Предварительная обработка первичных цифровых радиографических изображений	47
2.8 Визуализация цифровых радиографических изображений.....	48
3 Объект контроля и выбор основных параметров системы цифровой радиологии.....	50
3.1 Описание объекта контроля.....	50
3.2 Выбор основных параметров системы цифровой радиологии	52
3.2.1 Выбор схемы сканирования.....	52

3.2.2	Выбор параметров геометрической схемы контроля	53
3.2.3	Выбор максимальной энергии источника излучения	55
3.2.4	Выбор параметров регистраторов тормозного излучения	57
4	Имитационное моделирование цифровых радиографических изображений ёмкостей для хранения жидкого аммиака и его солей	59
4.1	Примеры моделирования	59
4.2	Оценка производительности контроля	61
5	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	63
5.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований	63
5.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования	63
5.1.2	Анализ конкурентных технических решений.....	64
5.1.3	SWOT-анализ	65
5.2	Планирование работ по научно-техническому исследованию	67
5.2.1	Структура работ в рамках научного исследования	67
5.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ.....	68
5.2.3	Разработка графика проведения научного исследования.....	68
5.2.4	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	70
5.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	77
6	Социальная ответственность.....	80
6.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	80
6.1.1	Организационные мероприятия	80
6.1.2	Организация рабочей зоны инженера разработчика.....	81
6.2	Производственная безопасность	81
6.2.1	Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	81

6.2.2 Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	82
6.3 Экологическая безопасность.....	91
6.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	91
6.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.....	92
6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	92
6.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС	92
6.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС	93
Заключение	96
Список использованных источников	97
Приложения А	103

Введение

В нефтехимической, химической, горно-перерабатывающей и прочих отраслях промышленности, на железнодорожном, автомобильном и морском транспорте широко применяются ёмкости (резервуары) объёмом до 50 м³ для хранения жидких и сыпучих материалов, которые несут значимую химическую, пожарную опасность. Многие из таких материалов являются потенциально взрывоопасными. Описанные резервуары предназначены для длительной эксплуатации с сохранением высокого уровня безопасности, поэтому подобные объекты подлежат обязательному контролю в процессе изготовления и эксплуатации. Для контроля таких объектов применяются различные методы неразрушающих испытаний [1–5].

Анализируемые объекты относятся к классу крупногабаритных объектов. В последние годы существенно расширились практические приложения в области цифровой радиографии (ЦР). Одно из перспективных направлений связано с радиографическим контролем крупногабаритных объектов, которые ранее считались непригодными к контролю. Резервуары объёмом до 50 м³ также относятся к таким изделиям. Возможность применения методов цифровой радиографии для испытания подобных объектов обусловлена появлением на рынке научного оборудования высокоинтенсивных и высокоэнергетических источников рентгеновского излучения (ИРИ) и источников тормозного излучения (ИТИ) с малым излучающим пятном (микрофокусные трубки) и высокоэффективных регистраторов рентгеновского излучения (РРИ) и регистраторов тормозного излучений (РТИ) с размером апертуры 1 мм и менее. Следует также отметить существенные изменения в точной механике и робототехнике, приведшие к появлению высокоточных систем перемещения ОК относительно ИРИ (ИТИ) и РРИ (РТИ).

Базовой основой проектирования систем цифровой радиографии (СЦР) на настоящий момент времени являются методы математического и имитационного моделирования, позволяющие оценить предельные

возможности исследуемого метода с вариацией всех возможных параметров СЦР. Целью имитационного моделирования является научное обоснование возможности решения задачи проектирования систем цифровой радиографии, в том числе и применительно к исследуемым объектам контроля.

Вышесказанное свидетельствует в пользу **актуальности темы** выпускной квалификационной работы, что подтверждается ростом количества публикаций, посвящённых вопросам выбора и оценки параметров систем цифровой радиографии применительно к крупногабаритным полым и заполненным оболочечным объектам, а также заинтересованностью в проведении исследований некоторых промышленных предприятий.

Объект исследований – полые и заполненные аммиачными солями резервуары.

Предмет исследования – методы цифровой радиографии.

Цель работы – обоснование возможности контроля полых и заполненных аммиачными солями резервуаров методом цифровой радиографии.

Для достижения поставленной цели следует решить **следующие задачи**:

– адаптировать математическую модель формирования цифровых радиографических изображений крупногабаритных объектов применительно к контролю полых и заполненных аммиачными солями резервуаров;

– на основе предложенной математической модели разработать алгоритм и программу имитационного моделирования для получения реалистичных цифровых радиографических изображений объектов исследования;

– разработать методику оценки ожидаемой производительности контроля;

– сформулировать рекомендации по выбору схемы сканирования полых и заполненных аммиачными солями резервуаров методом цифровой

радиографии и предложения для рационального подбора элементов соответствующих систем.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались основы теории взаимодействия гамма-излучения с веществом с привлечением численных методов, методов математического и имитационного моделирования; методов статистической обработки результатов натуральных и вычислительных экспериментов.

Научная новизна сводится к:

- адаптации математической модели формирования цифровых радиографических изображений крупногабаритных объектов применительно к контролю полых и заполненных аммиачными солями резервуаров;

- к разработке алгоритма и программы имитационного моделирования реалистичных цифровых радиографических изображений полых и заполненных аммиачными солями резервуаров;

- разработке методики оценки производительности контроля;

- рекомендациям по выбору схемы сканирования полых и заполненных аммиачными солями резервуаров методом цифровой радиографии и предложениям по рациональному подбора элементов соответствующих систем.

Практическая значимость результатов выпускной квалификационной работы заключается в том, что адаптированная математическая модель, алгоритм и программа имитационного моделирования могут быть использованы для обоснования технической реализуемости задачи проектирования систем цифровой радиографии для контроля полых и заполненных аммиачными солями резервуаров.

Результаты проведённых исследований реализованы: в математической модели, алгоритме и программе для имитации цифровых радиографических изображений полых и заполненных аммиачными солями резервуаров; в разработке методики оценки производительности контроля; в рекомендациях по выбору схемы сканирования полых и заполненных

аммиачными солями резервуаров методом цифровой радиографии и предложениях по рациональному подбора элементов соответствующих систем.

Апробация работы. Основные положения выпускной квалификационной работы обсуждались на отчетах по УИРС отделения контроля и диагностики ИШ НКБ в 2018 – 2019 годах.

На защиту выносятся:

– адаптированная математическая модель формирования цифровых радиографических изображений полых и заполненных аммиачными солями резервуаров;

– алгоритм и программа имитационного моделирования реалистичных цифровых радиографических изображений полых и заполненных аммиачными солями резервуаров;

– методика оценки производительности контроля;

– рекомендации и предложения по выбору схемы сканирования и элементов систем цифровой радиографии для контроля полых и заполненных аммиачными солями резервуаров.

1 Обзор литературы

1.1 От классической радиографии к цифровой радиографии

Первый этап развития радиографии (рентгенографии) продлился с открытия в 1895 году Вильгельмом Конрадом Рентгеном X-лучей почти век [6–9]. Всё это время практически единственным широко распространённым регистратором рентгеновского излучения (РРИ) являлась рентгеновская плёнка. Радиографию с использованием в качестве РРИ рентгеновской плёнки можно называть классической радиографией. К 50-м – 60-м годам XX века классическую радиографию в ряде медицинских и промышленных приложений несколько потеснила интроскопия на основе сцинтилляционных экранов. Сформированные на таких экранах световые изображения фиксировались фотоплёнкой либо выводились на телевизионный экран. Классическая радиография в совокупности с упомянутыми разновидностями интроскопии объединяются в аналоговую радиографию. Интроскопия отличалась от классической радиографии отходом от серебряных технологий регистрации рентгеновского излучения, оставаясь, по-прежнему, методом визуализации. Появление РРИ на основе единичных и многоканальных комбинированных детекторов (КД), а затем и детекторов прямого преобразования (ДПП), и сопряжение их с аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) привели к появлению различных реализаций цифровой радиографии (ЦР) и компьютерной томографии (КТ) [10–17]. Отметим, что в комбинированном детекторе трансформация поглощённой энергии ионизирующего излучения (ПЭ) в электрическую энергию происходит в два этапа. На первом этапе в сцинтилляционном радиационно-чувствительном преобразователе (РЧП) поглощённая энергия превращается в энергию светового излучения, а на втором этапе свет регистрируется фотоприёмником (ФП), на выходе которого формируется электрический аналоговый сигнал (АС), поступающий на вход АЦП с преобразованием его (АС) в цифровой сигнал (ЦС). В РЧП детектора прямого преобразования

поглощённая энергия ионизирующего излучения преобразуется без промежуточных стадий в непосредственно электрический заряд, с последующим снятием его и преобразованием АС в ЦС.

Трансформация классической (плёночной) радиографии в цифровую радиографию привела к уменьшению расхода в неразрушающем контроле дефицитного серебра, уменьшению экологической нагрузки, улучшению условий труда персонала. Исключение процессов обработки рентгеновской плёнки из процесса технологии контроля позволило повысить производительность контроля с сохранением достаточного высокого его качества. Применение цифровых технологий явилось основой широкого распространения современных достижений прикладной математики и теории обработки сигналов и изображений в радиационных методах контроля различных технических изделий ответственного назначения [18–20]. Одновременное продолжающееся совершенствование ИРИ (ИТИ), РРИ (РТИ), механических систем точного позиционирования, алгоритмов и методов формирования и обработки радиографической информации остаётся базой для дальнейшего развития методов цифровой радиографии и компьютерной томографии. Быстрыми темпами расширяется область приложений различных реализаций ЦР не только в сторону классических задач дефектоскопии, связанных с визуализацией внутренней структуры ОК, но и в сторону решения измерительных задач (измерение плотности, толщины, пористости, концентраций, эффективного атомного номера) в различных отраслях науки, техники, транспорта, в том числе, и в материаловедении. В последние годы существенно расширяется и номенклатура объектов контроля от миллиметрового и субмиллиметрового диапазона до сотен миллиметров по стали. Ранее многие из таких объектов считались непригодными контролю.

Таким образом, развитие методов и средств ЦР и КТ приводит к совершенствованию технологических процессов материалов и изделий на всех стадиях их производства и эксплуатации, повышению уровней долговечности, отказоустойчивости и безопасности разнообразных технических объектов.

1.2 Классификация методов и систем цифровой радиографии

Существует несколько подходов к классификации методов и систем цифровой радиографии.

Первый из подходов к классификации СЦР связан с источниками фотонного излучения (гамма-, рентгеновское и тормозное излучение).

1.2.1 Классификация систем цифровой радиографии по источникам фотонного излучения

В системах цифровой радиографии применяют следующие источники фотонного излучения: природные и техногенные радионуклиды – источники гамма-излучения с линейчатым энергетическим спектром (δ -функции или взвешенные суммы δ -функций) [21–23]; рентгеновские аппараты – источники рентгеновского излучения с непрерывным энергетическим спектром (гладкие функции или взвешенные суммы гладких функций и δ -функций), максимальные энергии рентгеновского излучения E_{\max} от 20 кэВ до 850 кэВ (коммерческие версии от 50 кэВ до 450 кэВ) [24–26]; бетатроны, линейные ускорители электронов – источники тормозного излучения с максимальной энергией E_{\max} от 1 МэВ до 10 МэВ [27–29].

Остановимся на описании источников фотонного излучения, применяемых в ЦР и КТ подробнее.

Гамма-излучение. Энергетический спектр природных и техногенных источников гамма-излучения $f(E)$ в общем виде описывается формулой

$$f(E) = \sum_{i=1}^{i_0} \alpha_i \delta(E - E_i), \quad \sum_{i=1}^{i_0} \alpha_i = 1. \quad (1.1)$$

Энергии E_i , $i=1 \dots i_0$, в (1.1) часто называют моно-линиями.

Помимо энергий источники гамма-излучения характеризуются [30–32] постоянной распада (периодом полураспада), удельной радиоактивностью (количество излучаемых фотонов в единицу времени одной единицей массы излучающего вещества). В промышленности, как правило, применяются

долгоживущие изотопы с высокой удельной радиоактивностью. Первая характеристика позволяет использовать источники без частой их замены, а вторая связана с необходимостью обеспечения высокой производительности контроля для малых размеров источника излучения.

В таблице 1.1 приведены характеристики некоторых долгоживущих источников гамма-излучения.

Таблица 1.1 – Характеристики долгоживущих источников гамма-излучения

Радионуклид	Период полураспада	Удельная активность Бк/мг	Энергии E_i , их доля α_i
Cs-137	30 лет	$3,2 \times 10^9$	661 кэВ – 100 %
Co-60	5,27 года		1,17 МэВ – 50 % 1,33 МэВ – 50 %
Am-241	432,6 года		59,5 кэВ – 100 %
Ir-192	74 суток		468 кэВ – 33 % 317 кэВ – 67 %

В настоящее время наблюдается возрождение интереса к источникам гамма-излучения, как к источникам фотонов в системах ЦР и КТ. К достоинствам источников гамма-излучения следует отнести их стабильность (стабильное изменение свойств). С этой позиции можно отнести гамма-изотопы к источникам непрерывного действия, обладающими свойством стационарности, то есть способностью излучать одно и то же количество фотонов в единицу времени.

Рентгеновское излучение. Выделяют два типа источников рентгеновского, отличающихся по режиму излучения – ИРИ непрерывного действия и импульсные ИРИ. Более эффективными и качественными ИРИ с точки зрения размера излучающей поверхности (фокусного пятна) стабильности параметров, как правило, являются источники с непрерывным режимом действия. Среди недостатков таких ИРИ следует отметить недостаточно высокую плотность потока частиц. Повышение плотности потока фотонов ограничивается малым вкладом (долей) преобразования потока ускоренных электронов при торможении в рентгеновское излучение в общий процесс взаимодействия электронов с веществом. По аналогии с другими

способами преобразования различных видов энергии в вид, интересующий потребителя, отмеченная доля может быть названа коэффициентом полезного действия (КПД). Этот КПД численно равен отношению интегральной энергии рентгеновских фотонов к электрической энергии, затраченной на их (фотонов) производство. Отмеченный КПД не превышает, в лучшем случае, первых единиц процентов. Проблема состоит в том, что оставшаяся часть энергии превращается в тепловую. Одной из побудительных причин появления и растущего использования импульсных ИРИ в различных отраслях промышленности является необходимость соблюдения разумного компромисса между высокой интенсивностью потока излучения и возможностью отвода излишков тепла. К импульсным ИРИ в случае их применения в высокопроизводительных системах ЦР и КТ выдвигаются высокие требования к стабильности параметров ИРИ от импульса к импульсу, особенно при выполнении формулы

$$1 \text{ импульс} \rightarrow 1 \text{ кадр} . \quad (1.2)$$

В (1.2) под кадром понимается единичное цифровое радиографическое изображение (строка) в ЦР или проекция в КТ.

Выделение словесного ограничения в виде формулы (1.2) связано с его особой значимостью для задач, связанных с применением импульсных ИРИ, так как именно эта формула позволяет определить производительность контроля и практическую необходимость повышения интенсивности источников рентгеновского излучения, сохраняя уровень частоты следования импульсов излучения.

Отметим, что вызывает искреннее недоумение и сожаление нежелание производителей ИРИ указывать в качестве характеристики источников излучения интенсивность потока фотонов, которая является значимым параметром для сравнения ИРИ на стадии выбора элементов систем ЦР и КТ при их (систем) проектировании.

В мире существует огромное количество производителей ИРИ непрерывного действия и импульсных ИРИ. Соответствующие рентгеновские аппараты отличаются по максимальной энергии, интенсивности, массе и т.п.

В таблице 1.2 приведена таблица ИРИ непрерывного действия [33]

Таблица 1.2 – Источники рентгеновского излучения непрерывного действия [33]

Изготовитель, страна	Модель	Технические параметры								
		U, кВ	Ток, мА	РФП, мм	УВИ, градус	ПСС, мм	Масса, кг		Габариты, мм	
							МБ	Пульг	МБ	пульг
ОАО «Мосрентген», Россия	YUZA-100/10H (РАП-100М-10H)	12–100	0,5–10	1,4×1,4	40	10	12	17,5	145×205×390	215×275×420
	YUZA-100/10H (РАП-100М-10H)	12–100	0,5–10	1,3×3,0	40×360	8	12	17,5	145×205×390	215×275×420
	YUZA-160/5 (РАП-160М-5)	30–160	0,5–5	1,2×1,2	40	18	18	17,5	150×240×385	215×275×420
	YUZA-200/5 (РАП-200М-5)	40–200	0,5–5	2,0×2,0	40	25	22	15	170×270×475	145×350×410
RICH. SEIFERT, Германия	ERESCO 42 MF (200 MF)	20–200	0,5–10	1,5	40×60	42	24	13	III 160	244×319×390
	ERESCO 42 MFW	20–200	0,5–10	1,5	40×60	42	21	13	III 160	244×319×390
	ERESCO 36 MFC-W	20–200	0,5–10	1,5	38×360	36	24	13	III 160	244×319×390
	ERESCO 32 MFC	20–275	0,5–10	0,3×3	38×360	32	24	13	III 186	244×319×390
	ERESCO 60 MF	20–275	0,5–10	1,5	40×60	60	40	13	III 186	244×319×390
	ERESCO 65 MF	20–300	0,5–10	1,5	40×60	65	42	13	III 186	244×319×390
GILARDONI, Италия	GXL 208 D	200	8	2,3×2,3	50	35	26	26	III 229×610	280×350×514
	GXL 306 D	300	6	3,0×3,0	50	55	41	26	III 263×780	280×350×514
	GXL 205 PO	200	5	III 4	360×45	28	26	26	III 229×610	280×350×514
	GXL 305 PO	300	5	III 5	360×45	50	41	26	III 263×780	280×350×514
	GXL 375 D	370	5	3×3	50	70	43	26	III 295×910	280×350×514
ANDREX, Дания	SMART – 160W	10–160	0,5–6,0	0,4×0,4	40	26	22,6	11	III 295×606	153×323×465
	SMART – 200	60–200	0,5–4,5	1,6×1,6	40×55	38	26	11	III 295×670	154×323×465
	SMART – 200E	60–200	0,5–4,5	1,6×1,6	40	39	23	10,5	III 284×665	166×352×444
	SMART – 200PC	50–200	0,5–4,5	0,4×0,4	40×360	35	32,5	11	III 295×648	154×323×465
	SMART – 225	70–225	0,5–4,0	1,6×1,6	40×55	45	27	11	III 295×705	153×323×465
	SMART – 300	90–300	0,5–3,0	1,6×1,6	40×55	56	29	11	III 295×751	154×323×465
ICM, Бельгия	SITE-X C1603	50–160	1,0–3,0	III 4×0,5	40×360	10	8	1	III 124×530	26×100×211
	SITE-X C2254	80–225	1,0–4,0	III 5×0,5	40×360	39	25	14	III 248×697	157×355×520
	SITE-X C2257	80–225	1,0–7,0	III 5×0,5	40×360	44	25	14	III 346×771	157×355×520
	SITE-X D2258	80–225	1,0–8,0	2,5×2,5	40×60	45	26	14	III 346×771	157×355×520
	SITE-X C3003	100–300	1,0–3,0	III 5×0,5	40×360	55	27	14	III 248×757	157×355×520
	SITE-X C3005	100–300	1,0–5,0	III 5×0,5	40×360	60	27	14	III 346×831	157×355×520
	SITE-X D3006	100–300	1,0 ч 6,0	2,5×2,5	40×60	63	28	14	III 346×831	157×355×520
BALTEAU, Бельгия, Франция	GFD-165	160	3/5	1,5×1,5	55	18	14	23	III 269×628	273×236×570
	GFC-165	160	3/5	III 4×0,5	40×360	14	14,3	23	III 269×628	273×236×570
	GFD-208	200	5/8	2,5×2,5	60	35	26	23	III 275×723	273×236×570
	GFC-205	200	3/8	III 5×1,2	40×360	25	28	23	III 275×751	273×236×570
	GFD-306	300	4/6	3,2×3,2	60	56	36	23	III 310×823	273×236×570
	GFC-305	300	3/5	III 5×1,3	40×360	48	36	23	III 310×839	273×236×570
Lord, США	LPX 160	5–160	0,1–5,0	1,5×1,5	40 (360)	14	13	15,3	III 184×724	323×267×445
	LPX 160	10–200	1,0–10,0	1,5×1,5	40×60 (360)	25	16,6	15,3	III 213×673	323×267×445
PANTAK, США	100GS-B	20–100	5	1,0×1,0		5	21,5	22	572×262×262	425×395×245
	200EG-SP2	90–200	3	2,0×2,0		20	15,5	17	535×196×196	355×345×240
	200EG-B1-C	120–200	5	1,0×0,5	24×360	32	21	22	630×262×262	420×395×245
	200EG-S3	70–200	5	2,0×2,0		25	21	17	607×262×262	355×345×240
	200EG-B2-F	160–250	5	1,0×2,4	25×360	43	33	22	692×320×320	420×395×245
	250EG-S3	110–250	5	2,0×2,0		48	29	17	632×320×320	355×345×240
	300EG-B2-F	200–300	5	1,0×2,5	25×360	55	54	25	785×350×350	420×395×245
	3000EG-S3	160–300	5	2,5×2,5		60	38,5	25	737×320×320	420×395×245

Из анализа данных, приведённых в таблице 1.2, следует ограниченность ИРИ непрерывного действия по максимальной энергии, приводящие к ограничению максимальных просвечиваемых толщин стали.

В таблице 1.3 [34] приведены технические характеристики импульсных рентгеновских аппаратов отечественного производства.

Таблица 1.3 – Технические характеристики импульсных рентгеновских аппаратов отечественного производства [34]

Модель	Технические параметры				
	Анодное напряжение, кВ	РФП, мм	ПСС, мм	Масса излучателя, кг	Габариты излучателя, мм
ШМЕЛЬ-250	250	2,0	45	8,4	451×112×226
ШМЕЛЬ-350	350	2,0	54	10,2	481×124×220
САРМА-01	150	2,5	20	2,5	300×70×70
САРМА-02	200	2,5	30	2,5	300×70×70
САРМА-03	300	3,0	50	2,5	500×90×130
САРМА-04	500	3,0	85	6,0	620×350×700

Более подробные характеристики ИРИ приведены на сайтах производителей соответствующего оборудования.

Тормозное излучение. Деление фотонного излучения на рентгеновское и тормозное является условным. Рентгеновские и тормозные фотоны образуются в процессе торможения ускоренных электронов в материале мишени. Различие заключается в максимальных энергиях. Тормозное излучение называют высокоэнергетическим рентгеновским излучением ($E_{\max} > 1$ МэВ).

В настоящее время в качестве ИТИ в промышленных приложениях ЦР и КТ, а также в досмотровом контроле, применяются линейные ускорители электронов (линатроны) и бетатроны. Эти источники являются импульсными. Бетатроны, в свою очередь, делят на малогабаритные бетатроны и высокоэнергетические бетатроны. В настоящее время максимальные энергии ИТИ ограничиваются $E_{\max} = 10$ МэВ, но встречаются упоминания и о применении ИТИ с большими уровнями максимальных энергий. Отличие бетатронов от линейных ускорителей заключается в траектории ускоряемых электронов (окружность – прямая линия).

В таблице 1.4 [35] приведены технические характеристики малогабаритных бетатронов производства НИ ТПУ.

Таблица 1.4 – Технические характеристики малогабаритных бетатронов производства НИ ТПУ [35]

Параметры	МИБ-2,5	МИБ-5	МИБ-7,5	МИБ-9
Энергия тормозного излучения, МэВ	1 – 2,5	2 – 5	2 – 7,5	2 – 9
Пиковая мощность дозы на расстоянии 1 м от излучателя, сГр / мин	2	4	7,5	20
Частота следования импульсов, Гц	400	400	300	400
Потребляемая мощность, кВА	2	3	3	5
Масса излучателя, кг	57	80	115	150
Общий вес, кг	120	180	220	260
Размер фокусного пятна, мм	0,25×2	0,25×2	0,25×2	0,25×2
Максимальная контролируемая толщина (из стали), мм	150	200	270	330
Габариты излучателя, мм	Ø320×220	Ø360×230	Ø380×315	Ø450×340
Угол луча в вертикальной плоскости, град	60	52	52	60

Большая часть линейных ускорителей электронов имеет размеры, которые несопоставимы с размерами малогабаритных бетатронов. Ряд исследовательских групп проводит исследования, связанные с уменьшением габаритов линейных ускорителей. В таблице 1.5 [36] приведены технические характеристики линейных ускорителей для радиографии производства МГУ.

Таблица 1.5 – Технические характеристики линейных ускорителей для радиографии производства МГУ [36]

Параметры			
Энергия тормозного излучения, МэВ	3 – 6	3 – 8	5 – 10
Пиковая мощность дозы на расстоянии 1 м от излучателя, Гр/мин	1–10	1–10	2–40
Частота следования импульсов, Гц	50–400	50–400	50–400
Масса излучателя, кг	1130	1130	1125
Размер фокусного пятна, мм	1–1,5	1–1,5	1–1,5

Из сопоставления данных, приведённых в таблицах 1.4 и 1.5, можно сделать вывод о превышении мощности дозы линейных ускорителей относительно малогабаритных бетатронов в десятки (сотни) раз. Выше отмечено, что при работе ускорителя в режиме (1.2) повышение интенсивности ИТИ не приводит к повышению производительности.

1.2.2 Классификация систем цифровой радиографии по регистраторам фотонного излучения

В работе [37] рассмотрен ряд вопросов, связанных с критериями сравнения различных модификаций методов цифровой радиографии. В этой статье подчёркивается, что на качество контроля существенным образом влияют регистраторы рентгеновского излучения. Этой же концепции и придерживаются авторы [38].

К основным параметрам [37, 38], характеризующим СЦР, относятся радиационный контраст k_x , уровень шумов n_x , геометрическое разрешение r_x , производительность контроля P_x , смещения информативных параметров u_x . Эти параметры являются критериями сравнения различных модификаций СЦР.

Среди всей совокупности РРИ, используемых для формирования цифровых радиографических изображений, выделяют следующие системы:

- сканирование рентгеновских плёнок (СРП) специализированным сканером, позволяет кратно увеличить информационную способность аналоговых радиографических изображений за счёт расширения диапазона различаемых полутонов и возможности применения математических методов обработки полученной цифровой информации;

- использование в качестве РРИ фосфорных запоминающих пластин (ФЗП);

- использование в РРИ монокристаллических или поликристаллических экранов с переносом оптического изображения оптическим объективом и фиксацией перенесённого изображения (ФПИ) матрицей фотоприёмников;

- сканирование ОК узким (веерообразным) пучком рентгеновского изображения с регистрацией его (пучка) линейным матричным регистратором (ЛМР) РРИ или линейным полосковым регистратором (ЛПР);

- использование в качестве РРИ монокристаллических и поликристаллических экранов, сопряжённых с матрицами фотоприёмников (ФП), такие РРИ называют плоскими панельными регистраторами (ППР);

– использование в качестве РРИ матричных регистраторов (MP), каждый элемент которых является обособленным друг от друга, в качестве элементов MP могут выступать комбинированные детекторы (КД) и детекторы прямого преобразования (ДПП).

В перечисленном выше списке для идентификации конкретной реализации СЦР используется соответствующая аббревиатура, выделенная шрифтом красного цвета.

В [37, 38] проведено сравнение основных реализаций СЦР по отмеченным выше классифицирующим критериям.

В таблице 1.6 приведена оценка эффективности СЦР по следующим параметрам: радиационному контрасту k_X ; уровню шумов n_X ; геометрическому разрешению r_X , производительности контроля P_X , смещению информативных параметров u_X . Оценка приведена по достаточно грубой шкале – (+!; +; ±, –, –!). Эта шкала удобна для сравнения СЦР на стадии их проектирования.

Таблица 1.6 – Оценка эффективности систем цифровой радиографии

Параметры СЦР	Реализации СЦ						
	СРП	ФЗП	ФПИ	ЛМР	ЛПР	ППР	MP
k_X	–	±	+	+!	+!	±	±
n_X	–	±	+	+	+	±	±
r_X	+!	+!	+	–	–	+	+
P_X	–!	±	+!	–!	–!	+!	+!
u_X	–!	–!	–!	+!	+!	–!	–!

Результаты, приведённые в таблице 1.6, отличаются некоторой степенью условности, так как конечный потребитель волен выбрать какой параметр будет превалирующим, а каким, по мнению потребителя, можно пренебречь.

Выбор той или иной реализации СЦР с соответствующим конкретным выбором источника и регистратора рентгеновского излучения определяется задачей проектирования, то есть объектом исследований и требуемыми (заданными заказчиком) параметрами систем цифровой радиографии и возможными дополнительными ограничениями, например, ужесточение требований к радиационной безопасности.

1.3 О цели и задачи исследований

В рассматриваемой выпускной квалификационной работе объектом исследований являются полые и заполненные аммиачными солями резервуаров. Эти объекты исследований ранее считались непригодными к контролю методом цифровой радиографии.

Отсюда можно сформулировать цель исследований – обосновать возможность контроля полых и заполненных аммиачными солями резервуаров методом цифровой радиографии.

В литературе известны математические модели систем цифровой радиографии [39, 40] применительно к некоторым объектам. Суть в том, что разработать универсальную математическую модель обобщённой системы цифровой радиографии невозможно, поэтому для любого объекта эта модель должна быть специфичной.

Из вышесказанного следует, что для достижения отмеченной выше цели следует решить ряд задач:

- адаптировать математическую модель формирования цифровых радиографических изображений крупногабаритных объектов применительно к контролю полых и заполненных аммиачными солями резервуаров;
- на основе предложенной математической модели разработать алгоритм и программу имитационного моделирования для получения реалистичных цифровых радиографических изображений объектов исследования;
- разработать методику оценки ожидаемой производительности контроля;
- сформулировать рекомендации по выбору схемы сканирования полых и заполненных аммиачными солями резервуаров методом цифровой радиографии и предложения для рационального подбора элементов соответствующих систем.

2 Адаптированная математическая модель формирования цифровых радиографических изображений крупногабаритных объектов применительно к контролю полых и заполненных аммиачными солями резервуаров

Любая математическая модель систем ЦР или КТ состоит из нескольких блоков. К таким блокам относится, прежде всего, описание входных и выходных данных, описание структуры модели системы цифровой радиологии (СЦР), математической модели формирования цифровых радиографических изображений и алгоритмов формирования, трансформации и обработки цифровых радиографических изображений. Используем модель узкого веерного пучка для источника тормозного (рентгеновского) излучения. На практике такая модель пучка достигается в том случае, если расстояния от источника тормозного (рентгеновского) излучения до объекта контроля и регистратора тормозного (рентгеновского) значительны по сравнению с размером регистратора излучения. На практике ограничение пучка тормозного (рентгеновского) излучения достигается применением щелевой коллимации ИТИ (ИРИ) и (или) РТИ (РРИ) [41–43]. Исходя из такой модели пучка излучения уместно применение линейных регистраторов тормозного (рентгеновского) излучения. Здесь род линейными регистраторами понимаются РТИ (РРИ), центры единичных радиационно-чувствительных преобразователей которых расположены на некоторой линии, не обязательно прямой. В ряде случаев могут быть использованы узкие матричные регистраторы излучения, один из поперечных размеров которых существенно меньше второго размера.

В качестве базовой модели системы цифровой радиологии будет использована математическая модель формирования цифровых радиографических изображений [38–40], адаптация которой будет произведена на основе специфичной информации о форме, размерах, структуре и материалах объекта контроля. Объектами контроля являются

крупногабаритные ёмкости для хранения особо-опасных химических веществ (жидкостей, взвесей и смесей). Форма таких объектов близка к форме цистерн.

2.1 Блок описания исходных параметров системы цифровой радиографии

В предыдущем разделе отмечено, что к исходным данным системы цифровой радиографии можно отнести: параметры источника тормозного (рентгеновского) излучения; форма, внутренняя структура, материал и размеры объекта контроля; материал и размеры элементарных чувствительных объёмов радиационно-чувствительных преобразователей; поперечные размеры элементарного фотопреобразователя, разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Здесь определение «элементарный» соотносится с формированием одной точки цифрового радиографического изображения – единичного пикселя.

Источник тормозного (рентгеновского) излучения характеризуют совокупность следующих параметров:

- режим функционирования источника излучения – непрерывного действия или импульсный;
- ν – частота следования импульсов в Гц для импульсного режима излучения фотонов
- E_{\max} – максимальная энергия тормозного (рентгеновского) излучения;
- $E_{\min}, E_{\text{ном}}$ – пределы регулирования максимальной энергии E_{\max} ИТИ (ИРИ) от минимального значения до предельного номинального;
- $f(E, E_{\max})$ – исходный числовой энергетический спектр источника тормозного (рентгеновского) излучения, здесь под числовым энергетическим спектром понимается плотность распределения случайной величины (СВ), в качестве которой выступает энергия фотона E , это означает, что

$$\int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) dE = 1, \quad (2.1)$$

соблюдение равенства (2.1) (при необходимости выполняется нормировка) позволяет упростить понимание результатов математического (имитационного) моделирования и их интерпретацию;

– n_0 – поток рентгеновского излучения, то есть количество фотонов, падающих на единицу площади, расположенной на некотором заданном расстоянии от источника ИТИ (ИРИ) центральной точки тормозного (рентгеновского) излучателя от точки детектирования, в единицу времени;

– Z_f , ρ_f , h_f – эффективный атомный номер, плотность материала и толщина предварительного фильтра.

Введение предварительной фильтрации тормозного (рентгеновского) излучения на практике приводит к ужесточению энергетического спектра и, следовательно, к уменьшению систематической погрешности, обусловленной полихроматическим характером числового энергетического спектра излучения, а при расчётах – к повышению точности вычисления интегралов в математической модели системы ЦР.

Объект контроля (ОК) в математической модели формирования цифровых радиографических изображений в обязательном порядке рассматривается как элемент системы цифровой радиографии и описывается рядом важных параметров:

– односвязным пространственным телом V , то есть совокупности точек с координатами $(x,y,z) \in \mathcal{R}^3$ для описания пространственной формы объекта контроля, в пространстве введена неподвижная декартова система координат, связанная с ОК;

– плоским телом S , которое в рассматриваемом случае представляет собой естественную геометрическую проекцию трёхмерного тела V (ОК) на некоторую виртуальную поверхность, сопоставляемую с формируемым цифровым радиографическим изображением;

– распределениями плотности $\rho(x,y,z)$ материала объекта контроля и эффективного атомного номера материала $Z(x,y,z)$ по объёму объекта, то есть по всей совокупности точек (x,y,z) из V ;

– максимальными толщинами A , B и H объекта контроля в направлении распространения рентгеновского излучения и в плоскости, перпендикулярной отмеченному направлению.

Выдвижение требования к объекту контроля занимать односвязную область не является обязательным, но существенно упрощает описание объекта в разрабатываемой математической модели и в соответствующем алгоритме имитационного (численного) моделирования.

Системы регистрации тормозного (рентгеновского) излучения характеризует следующий ряд параметров:

– вид детекторов регистратора (комбинированный детектор или детектор прямого преобразования), который определяется наличием или отсутствием оптической и (или) радиационной связи элементарных чувствительных объёмов радиационно-чувствительных преобразователей;

– режим регистрации тормозных (рентгеновских) фотонов – интегральный или счётный (реализации – собственно счётный, временная реализация, спектрометрическая реализация);

– Z_d , ρ_d , h_d – эффективный атомный номер, плотность материала радиационно-чувствительного преобразователя в г/см^3 и толщина его единичного (элементарного) объёма, отвечающего за формирование единичной точки (пикселя) цифрового радиографического изображения, в сантиметрах;

– $a_d \times b_d$ – поперечные размеры элементарного фотооптического преобразователя для комбинированных детекторов РТИ (РРИ) или размеры единичного детектора прямого преобразования в миллиметрах;

– $A \times B$ – физические размеры радиографического изображения в миллиметрах;

– k_{ADC} – разрядность АЦП;

– C_{ADC} – коэффициент защиты от превышения цифрового сигнала (ЦС) максимального значения $ЦС_{\max}$

$$ЦС < ЦС_{\max} = 2^{k_{ADC}} - 1. \quad (2.2)$$

Следует отметить, что размеры цифрового радиографического изображения в пикселях $M \times N$ связаны с поперечными размерами элементарного фотооптического преобразователя для комбинированных детекторов РТИ (РРИ) или размерами единичного детектора прямого преобразования и физическим размером радиографического изображения $A \times B$ простейшими соотношениями

$$M = A/a_d, N = B/b_d. \quad (2.3)$$

2.2 Конечные характеристики систем цифровой радиографии

Выше отмечено, что основными потребительскими характеристиками систем ЦР являются:

k_X – радиационный контраст от заданного дефекта;

r_X – пространственное разрешение в мм;

T_X – время формирования радиографического изображения.

Конечные потребители проектируемых систем цифровой радиографии выдвигают ограничительные требования к характеристикам СЦР, которые описываются неравенствами

$$\begin{aligned} k_X &< k_{X \text{ lim}} \\ r_X &< r_{X \text{ lim}} \\ T_X &< T_{X \text{ lim}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

В ограничениях (2.4) индекс «lim» указывает на потребительские требования.

2.3 Блок формирования предварительной информации по ослаблению и регистрации гамма-излучения

К предварительной информации по ослаблению и регистрации гамма-излучения веществами относится ряд энергетических зависимостей, основными из которых являются зависимости массового коэффициента ослабления (МКО) m и массового коэффициента поглощения (МКП) излучения $m_{\text{аб}}$ от энергии фотонов E . В некоторых библиотеках по ослаблению гамма-излучения

веществом, например, [31] приводится информация, которую сложно использовать для непосредственного моделирования и разработки алгоритмов и программ симуляции систем цифровой радиографии. В таких библиотеках приводятся табулированные зависимости полных и парциальных (соответствующих конкретному виду взаимодействия) сечений взаимодействия гамма-излучения с веществом $\sigma(E)$. Отмеченные зависимости должны быть переведены в энергетические зависимости МКО и МКП.

Блок формирования предварительной информации по ослаблению и регистрации гамма-излучения состоит из нескольких основных этапов.

Этап первый. Существуют два варианта описания материала испытуемого объекта. Эти варианты связаны с ответом на вопрос, из скольких химических веществ состоит материал ОК?

В первом варианте материал объекта контроля является химическим веществом (оксид, соль, основание и т.п.), и он образуется из нескольких химических элементов. Пусть Z_1, Z_2, \dots, Z_n и M_1, M_2, \dots, M_n атомные номера и молярные массы соответствующих веществу объекта контроля химических элементов, а $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – соответствующие массовые доли элементов в молекуле; ρ – плотность материала (вещества) ОК. Тогда формулы связи массовых коэффициентов ослабления m и поглощения m_{ab} излучения материалом ОК и сечений взаимодействия гамма-излучения с веществом σ и σ_{ab} имеют вид

$$m_i = \frac{\sum_{k=1}^n \sigma_{ki} N_A \alpha_k}{\sum_{k=1}^n \alpha_k M_k}, \quad (2.5)$$

$$m_{abi} = \frac{\sum_{k=1}^n \sigma_{abki} N_A \alpha_k}{\sum_{k=1}^n \alpha_k M_k}$$

здесь индекс i соответствует энергии E_i – таблицы энергий, а индекс k химическому элементу.

Во втором варианте материал является сложным материалом (сплав, смесь, раствор и т.п.), то есть состоит из нескольких химических веществ. На первом промежуточном этапе вычисляется таблица массовых коэффициентов ослабления m_{ji} , $j=1 \dots n$, и поглощения $m_{ab\ ji}$, $j=1 \dots n$, гамма-излучения для всех химических веществ сложного материала, а на втором промежуточном этапе формируются таблицы для конечного материала

$$\begin{aligned} m_i &= \sum_{j=1}^n m_{ji} w_j \\ m_{abi} &= \sum_{j=1}^n m_{ab\ ji} w_j \end{aligned} \quad (2.6)$$

здесь w_j – массовая доля j -го вещества.

Этап второй. На вход второго этапа блока формирования предварительной информации по ослаблению гамма-излучения поступает таблица энергий E_i и таблицы МКО для материалов фильтра m_{fi} , контролируемого объекта $m_{TO\ i}$ и материала детектора m_{di} . Помимо отмеченных таблиц поступает и дополнительная таблица, касающаяся материала РЧП единичного детектора РРИ (РТИ), – таблица МКП $m_{ab\ d\ i}$. Второй этап предназначен для построения интерполяций энергетических зависимостей МКО фотонного излучения для материалов фильтра $m_f(E)$, ОК $m_{TO}(E)$ и радиационно-чувствительного преобразователя единичного детектора $m_d(E)$ и МКП фотонного излучения для материала РЧП детектора $m_{ab\ d}(E)$. Для интерполяции может быть использована полиномиальная интерполяция или сплайн-интерполяция. Вначале вычисляются коэффициенты интерполяции для всех четырёх зависимостей, а затем задаются все четыре соответствующие интерполяционные зависимости.

Этап третий. К третьему этапу блока формирования предварительной информации относится задание числового энергетического спектра источника рентгеновского (тормозного) излучения $f(E, E_{max})$. Для описания энергетических спектров ИРИ (ИТИ) используются формулы Крамерса, Шиффа или их

модификации [44, 45]. Числовые энергетические спектры модифицируются введением предварительного фильтра

$$f^*(E, E_{\max}) = \frac{f(E, E_{\max}) e^{-m_f(E)\rho_f h_f}}{\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) e^{-m_f(E)\rho_f h_f} dE}, \quad (2.7)$$

здесь и далее E_{\min} – минимальный порог энергии при вычислениях интегралов, обычно $E_{\min}=5 - 10$ кэВ. Нормировка (2.1) необходима для исследования трансформации анализируемой случайной величины (энергии фотонов). Для оценки производительности контроля её применять некорректно, так как введение предварительного фильтра является негативным фактором и приводит к ухудшению производительности контроля.

Этап четвёртый. На этом этапе вводится энергетическая зависимость эффективности регистрации $\varepsilon(E)$

$$\varepsilon(E) = 1 - e^{-m_d(E)\rho_d h_d}. \quad (2.8)$$

Этап пятый. Задаётся функция, описывающая зависимость среднего значения поглощённой энергии зарегистрированного фотона $E_{ab}(E)$. Эта функция необходима для интегрального режима регистрации рентгеновского (тормозного) излучения. Она имеет вид

$$E_{ab}(E) = E \frac{m_{abd}(E)}{m_d(E)}. \quad (2.9)$$

Отметим, что описание (2.9) является лишь первым приближением, так как функция $E_{ab}(E)$ зависит от размеров РЧП РРИ (РТИ) и их типа и конструкции. Отмеченного первого приближения достаточно на начальной стадии проектирования систем ЦР и КТ.

2.4 Блок формирования аналоговых (виртуальных) радиографических изображений объекта контроля

Основным приложением систем цифровой радиографии продолжает оставаться дефектоскопия, то есть обнаружение дефектов. Важным направлением также является визуализация внутренней структуры сложного

объекта. В этом направлении выделяют промышленные приложения, например, контроль сборки и приложения, связанные с обеспечением экономической, транспортной и государственной безопасности, например, рентгеновский (инспекционный) досмотровый контроль.

Отметим, что сложность математической модели формирования цифровых радиографических изображений испытуемых объектов определяется, не в последнюю очередь, сложностью пространственной структуры самого ОК.

Аналоговое радиографическое изображение **I** в случае использования РРИ (РТИ) на основе комбинированных детекторов представляет собой дискретное двумерное распределение яркости светового излучения на входе системы фотоприёмников. Применительно к РРИ (РТИ) на основе детекторов прямого преобразования можно говорить о виртуальном радиографическом изображении – распределении электрических зарядов. Для удобства свяжем номер строки i радиографического изображения **I** с осью x , а номер столбца j – с осью y . Вся световая (электрическая) энергия, соответствующая прямоугольной площадке с размерами $a_d \times b_d$, ассоциируется с центральной точкой этого прямоугольника. Ось z совпадает с направлением распространения рентгеновского (тормозного) излучения.

При описании процесса формирования виртуальных радиографических изображений исходят из допущения о пропорциональности световой (электрической) энергии поглощённой энергии рентгеновского (тормозного) излучения. Обозначим символом C отмеченный коэффициент пропорциональности. С учётом этого допущения «яркость» аналогового (виртуального) радиографического изображения в точке с координатами (x, y) оценивается по формуле

$$I(x, y) = C n_0 t a_d b_d \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} f^*(E, E_{\max}) E_{ab}(E) e^{-Y(E, x, y)} \varepsilon(E) dE. \quad (2.10)$$

В формуле (2.10) $Y(E, x, y)$ представляет собой толщину объекта контроля в длинах свободного пробега (д.с.п.) для фотонного излучения с энергией E по

лучу, соединяющему центр излучающей поверхности источника рентгеновского (тормозного) излучения с точкой детектирования $D=(x,y)$

$$Y(E, x, y) = \int_{H_1(x,y)}^{H_2(x,y)} m(E, Z(x, y, h)) \rho(x, y, h) dh. \quad (2.11)$$

здесь $Z(x,y,h)$, $\rho(x,y,h)$ – распределения эффективного атомного номера и плотности материала ОК по указанному выше лучу; $H_1(x,y)$, $H_2(x,y)$ – функции, определяющие лобовую и задние поверхности испытуемого объекта. Для плоскопараллельного пучка излучения координата h совпадает с координатой z декартовой системы координат OXYZ.

Отметим физическое толкование совокупности сигналов $Y(E,x,y)$ – Y . Множество Y представляет собой сдвиговый (по одной из координат) набор проекций в КТ для одного ракурса.

2.5 Блок оцифровки аналоговых (виртуальных) радиографических изображений объекта контроля

На первом этапе блока оцифровки аналоговых (виртуальных) радиографических изображений объекта контроля оценивается длина интервала, эквивалентного цифровой единице. Этот интервал называется интервалом дискретизации.

При оценке интервала дискретизации Δ_1 исходят из того, что максимальный уровень аналогового сигнала достигается в случае отсутствия объекта контроля (измерения по воздуху). В соответствии со сказанным выше, формула для вычисления интервала дискретизации имеет вид

$$\Delta_1 = \frac{C_{n_0} a_d b_d t \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} f^*(E, E_{\max}) E_{ab}(E) \varepsilon(E) dE}{C_{ADC} (2^{k_{ADC}} - 1)}. \quad (2.12)$$

Коэффициент $C_{ADC} > 1$ предназначен для защиты от превышения цифровым сигналом максимального уровня (см. (2.2)) при возможных флуктуациях аналогового (виртуального) сигнала.

Выражение, описывающее преобразование аналоговых сигналов в цифровые сигналы, выглядит следующим образом

$$D(x, y) = \left[\frac{I(x, y)}{\Delta_1} \right], \quad (2.13)$$

здесь $[\arg]$ – целая часть \arg .

Из анализа формул (2.10) и (2.12) можно сделать вывод об объединении нескольких параметров системы цифровой радиографии в один инвариант. Таким инвариантом является число фотонов N_0 , пересекающих фронтальную поверхность элементарного объёма РЧП (отвечающую за формирование одного пикселя цифрового радиографического изображения). Соответствующая формула имеет вид

$$N_0 = n_0 a_d b_d t, \quad (2.14)$$

Применение параметра (16) в практических расчётах позволит повысить их производительность и более детально исследовать влияние других параметров СЦР на её качество.

Совокупность выражений (1.1)–(2.14) представляет собой детерминированную составляющую математической модели формирования цифровых радиографических изображений. Обобщённая математическая модель является неполной, если в ней не учитываются шумы в радиографических изображениях. Ниже приведём модель зашумления аналоговых (виртуальных) радиографических изображений.

2.6 Зашумление аналоговых (виртуальных) радиографических изображений

Известно, что основным физическим фактором, обуславливающим шумы в первичных радиографических изображениях, является статистический характер процессов испускания, взаимодействия с материалом объекта контроля и регистрации рентгеновского (тормозного) излучения.

Для имитационного моделирования (симуляции) радиографических изображений, максимально близких к реальным радиографическим

изображениям, на детерминированное радиографическое изображение I накладываются аддитивные шумы, зависящие от поглощённой в детекторах энергии, и зашумлённые темновые сигналы (сигналы с детекторов РРИ (РТИ) при выключенном источнике излучения) с единичных детекторов РРИ (РТИ). Аналоговые (виртуальные) сигналы, являющиеся основой моделирования зашумлённого радиографического изображения I^* , описываются формулой

$$I^*(x, y) = I(x, y) + f(x, y). \quad (2.15)$$

Все аналоговые (виртуальные) сигналы и их компоненты в выражении (2.15) представляют собой независимые случайные величины. Совокупности слагаемых в (2.8) являются независимыми случайными величинами.

Составляющую виртуального (аналогового) сигнала в (2.15) $I(x, y)$ можно считать средним значением соответствующей случайной величины.

Из анализа реальных цифровых радиографических изображений можно сделать вывод о том, что распределение случайной величины f близко к нормальному распределению (распределение Гаусса). Среднее значение указанной величины составляет единицы процентов от максимального значения цифрового сигнала, относительное же среднеквадратическое отклонение не превосходит 10 % от среднего значения \bar{f} . Общим подходом к моделированию случайных величин, великолепно зарекомендовавшим себя, является метод обратных функций, основанный на аналитической или экспериментальной оценке функции распределения анализируемой случайной величины. Пусть известны параметры СВ – \bar{f} и σ_f , которые представляют собой среднее значение и среднеквадратическое отклонение случайной величины f , тогда формула для единичного розыгрыша анализируемой случайной величины имеет вид

$$f = F^{-1}(\xi)\sigma_f + \bar{f}, \quad (2.16)$$

здесь F – функция распределения нормальной случайной величины; ξ – единичное значение случайной величины, распределённой равномерно на интервале от нуля до единицы. Все современные языки программирования и

системы для математических вычислений имеют функции для розыгрыша таких случайных величин.

Учёт поперечных размеров элементарных чувствительных объёмов регистраторов рентгеновского (тормозного) излучения является затратным по времени процессом, поэтому можно считать регистрируемые аналоговые (виртуальные) сигналы $I(x,y)$ нормально-распределёнными случайными величинами со средними значениями $\overline{I(x,y)}$ и среднеквадратическими отклонениями $\sigma(x,y)$. Средние значения АС вычисляются по формуле (2.10), а среднеквадратические отклонения $\sigma(x,y)$ с помощью выражений

$$\sigma(x,y) = \sqrt{Cn_0abt \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} f^*(E, E_{\max}) E_{ab}^2(E) e^{-Y(E,x,y_i)} \varepsilon(E) dE}. \quad (2.17)$$

Допущение о нормальности функций распределения аналоговых (виртуальных) сигналов связано с тем, что регистрируемые аналоговые сигналы представляют собой суммы большого числа одинаково распределённых случайных величин. В качестве этих случайных величин выступает энергия, переданная фотонами рентгеновского (тормозного) излучения материалу радиационно-чувствительного преобразователя РРИ (РТИ) при условии, что фотоны зарегистрированы.

Обобщённая математическая модель зашумления аналоговых (виртуальных) сигналов $I(x,y)$ описывается выражением, аналогичным (2.16), но со своими собственными параметрами

$$I(x,y) = F^{-1}(\xi)\sigma(x,y) + \overline{I(x,y)}. \quad (2.18)$$

Выражения (2.15)–(2.18) дополняют детерминированную модель формирования цифровых радиографических изображений наложением аддитивного шума и превращают её (математическую модель) в полноценную математическую модель, учитывающую соответствующие шумы.

Сигналы (2.18) после выполнения всех необходимых процедур поступают на блок оцифровки аналоговых сигналов. Результатом оцифровки

всей совокупности АС является исходное (первичное) цифровое радиографическое изображение D .

Полученное цифровое изображение затруднено для полноценного анализа без предварительной обработки. На визуализированном первичном радиографическом изображении будут наблюдаться вертикальные и горизонтальные полосы. Это обусловлено различием коэффициентов преобразования энергии для каналов РРИ (РТИ), уровней темновых сигналов, экспоненциальным характером зависимости цифровых сигналов от массовой толщины объекта контроля ρH . Напомним, что под массовой толщиной ОК понимается произведение плотности материала ОК на толщину объекта.

Отметим, что особо выраженная полосатость первичных цифровых радиографических изображений наблюдается в случае использования в качестве ИРИ (ИТИ) с импульсным режимом излучения, которые не отличаются высокой степенью стабильности параметров излучения от импульса к импульсу.

Первичные цифровые радиографические изображения поступают на блок предварительной обработки, на выходе которого формируются итоговые радиографические изображения.

2.7 Предварительная обработка первичных цифровых радиографических изображений

На вход блока предварительной обработки цифровых радиографических изображений поступает совокупность нескольких типов ЦС: темновые сигналы $D_f(x,y)$; сигналы без ОК (ослабление воздухом) $D_a(x,y)$; сигналы с ОК. Соответственно процедура обработки информации состоит из нескольких этапов, сводящихся к калибровкам по «чёрному» и «по белому» и линеаризации шкалы цифровых сигналов.

На этапе калибровки по «чёрному» вычисляются средние значения оцифрованных темновых сигналов с единичных детекторов РРИ (РТИ) $D_f(x,y)$ и вычитаются из оцифрованных измерительных сигналов $D(x,y)$.

В процедуре калибровки по «белому» откалиброванные по «чёрному» сигналы нормируются на средние значения откалиброванных по «чёрному» сигналов без объекта D_a .

Линеаризация сводится к логарифмированию цифровых сигналов, откалиброванных по «чёрному» и «белому».

Совокупность процедур предварительной обработки первичных цифровых радиографических изображений приводит к оценкам радиационных толщин объекта $Y(x,y)$ по всей совокупности точек (x,y) по соответствующим лучам и описывается выражением

$$Y(x, y) = -\ln \frac{D(x, y) - \overline{D_f}}{\overline{D_a} - \overline{D_f}}. \quad (2.19)$$

Изображение Y можно назвать итоговым цифровым радиографическим изображением, но без визуализации это изображение продолжает оставаться виртуальным изображением, поэтому математическая модель формирования цифровых радиографических изображений должна быть дополнена преобразованием цифрового радиографического изображения Y в оптическое полутоновое изображение P . Приведём краткое описание отмеченной выше процедуры трансформации изображения Y в P .

2.8 Визуализация цифровых радиографических изображений

Процесс отображения «виртуальных» цифровых радиографических изображений объекта контроля принято называть визуализацией. Следует отметить, что в рассматриваемой задаче могут быть визуализированы любые из полученных изображений: исходные; промежуточные; итоговые.

Для получения максимально контрастного оптического изображения на экране видеоконтрольного устройства (монитора компьютера) диапазон изменения сигналов Y растягивается на всё доступное количество полутонов. На практике доступно 256 полутонов от чёрного цвета до белого.

Элементы полутонового изображения P_n вычисляются по формуле

$$P_n(x, y) = \left[\frac{Y(x, y) - \min_{x,y}(Y(x, y))}{\max_{x,y}(Y(x, y)) - \min_{x,y}(Y(x, y))} \times 256 \right]. \quad (2.20)$$

Квадратные скобки в (2.19) означают целую часть. Изображение \mathbf{P}_n можно назвать негативным, так как менее радиационно-прозрачный фрагмент объекта контроля будет выглядеть светлым и наоборот. Для многих людей специфические особенности их зрения позволяют качественно анализировать позитивные изображения \mathbf{P}_p

$$P_p(x, y) = 256 - P_n(x, y). \quad (2.21)$$

Совокупность математических выражений и ограничений (1.1) – (2.21) представляют собой краткое описание обобщённой математической модели применительно к формированию цифровых радиографических изображений объекта контроля с их последующей визуализацией.

3 Объект контроля и выбор основных параметров системы цифровой радиографии

Для промышленности характерны некоторые типы объектов, отличающиеся достаточной простотой формы и однородностью материала. Одним из типов таких объектов являются прокатные, литые и прессованные изделия с плоскопараллельными границами или протяжённые изделия с неизменной формой поперечного сечения. Указанные изделия характерны для многих отраслей промышленности. Примером изделий с плоскопараллельными границами являются, например, листы, бруски и т.п. Другим типом объектов являются изделия близкие к телам вращения. К таким объектам относятся трубы, обечайки, конусные наконечники и переходники; шарообразные объекты и т.п. Исследуемый в выпускной квалификационной работе объект в первом приближении можно считать телом вращения.

3.1 Описание объекта контроля

В качестве объекта контроля была выбрана ёмкость для хранения жидкого аммиака и его солей диаметром $D=3000$ мм длиной $L=11000$ мм и толщиной стенки H . Ёмкость изготовлена из стали Ст4кп (ГОСТ 5235–2005), плотность стали $\rho=7,56$ г/м².

Сталь Ст4кп (ГОСТ 5235-2005) является сталью конструкционной углеродистой обыкновенного качества. В таблице 3.1 приведён состав стали Ст4кп согласно ГОСТ 5235–2005.

Таблица 3.1 – Химический состав стали Ст4кп в %

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
α_i	0,18-0,27	до 0,05	0,4-0,7	до 0,3	до 0,05	до 0,04	до 0,3	до 0,008	до 0,3	до 0,08

Из анализа таблицы 3.1 можно сделать вывод о том, что рассматриваемая сталь содержит до 11 химических элементов. Варьируется количество элементов и их массовая доля.

В практике расчётов и численного (имитационного) моделирования фиксируется набор массовых долей α_i для всех элементов из таблицы 3.1. Формула для расчётов массовой доли железа α_{11} в процентах в указанной стали выглядит следующим образом

$$\alpha_{11} = 100 - \sum_{i=1}^{10} \alpha_i. \quad (3.1)$$

На рисунке 3.1 приведены изображения типичной ёмкости для хранения жидкого аммиака и его солей.

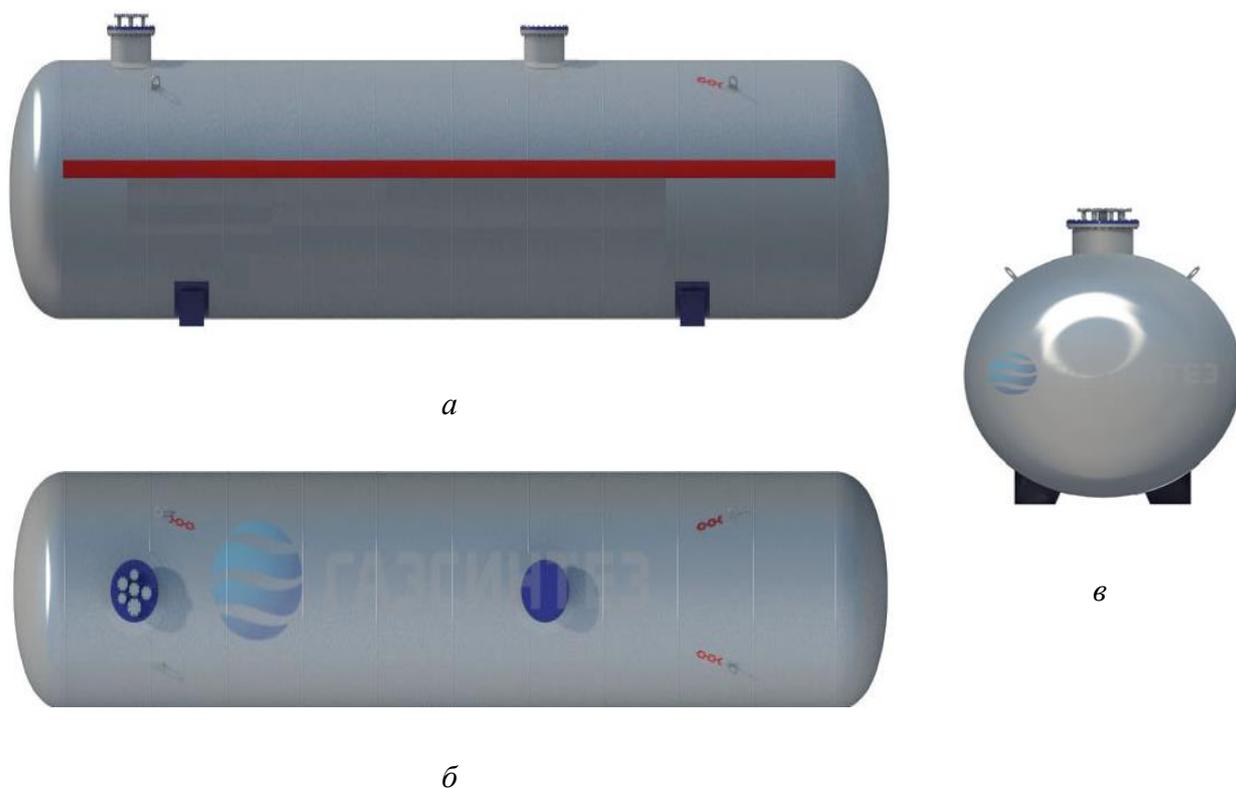


Рисунок 3.1 – Ёмкость для хранения жидкого аммиака и его солей:
а – вид спереди, *б* – вид сверху, *в* – вид сбоку

Из анализа изображений, приведённых на рисунке 3.1 можно считать подтверждённым вывод о допустимости представления ёмкости для хранения жидкого аммиака и его солей в виде тела вращения на стадии проектирования систем цифровой радиографии для их (ёмкостей) контроля.

Приведённая на рисунке ёмкость в первом приближении, которое удобно для численного моделирования, может рассматриваться как результат объединения цилиндра (центральная часть) и двух полусфер (боковые части).

3.2 Выбор основных параметров системы цифровой радиографии

В соответствии со сказанным выше, к основным выбираемым параметрам систем цифровой радиографии применительно к задаче имитационного (численного) моделирования цифровых радиографических изображений анализируемых объектов контроля относятся:

- количество фотонов, падающих на фронтальную поверхность элементарного объёма радиационно-чувствительного преобразователя многоканального регистратора (рентгеновского) тормозного излучения без объекта контроля – N_0 ;
- максимальная энергия рентгеновского излучения E_{\max} ;
- параметры геометрической схемы сканирования;
- материал и размеры элементарных объёмов радиационно-чувствительных преобразователей РРИ (РТИ);
- размерность аналого-цифрового преобразователя k_{ADC} , этот параметр варьируется от 12 до 24.

3.2.1 Выбор схемы сканирования

Объект контроля относится к классу крупногабаритных объектов, для которых схема единовременного формирования цифрового радиографического изображения является технически нереализуемой, так как не существует панельных или матричных РТИ необходимого размера.

Ещё одним ограничением является невозможность помещения ИТИ или РТИ во внутренний объём ОК.

Для подобных ОК наиболее подходит схема сканирования их узким веерным пучком тормозного излучения с регистрацией его линейкой радиометрических детекторов. В случае ограниченного размера линейки не исключён вариант послойного сканирования ОК с последующей сшивкой цифровых радиографических изображений.

Задача существенно упрощается для локального контроля, например, контроля зон сварных швов.

3.2.2 Выбор параметров геометрической схемы контроля

Геометрическую схему контроля характеризуют форма и размеры ОК. В нашем случае радиометрические детекторы целесообразно размещать по дуге окружности с центром в центре излучающей поверхности ИТИ.

На рисунке 2 приведена схема исследуемого объекта контроля с учётом основных точек (областей) контроля и геометрическая схема формирования одной строки радиографического изображения.

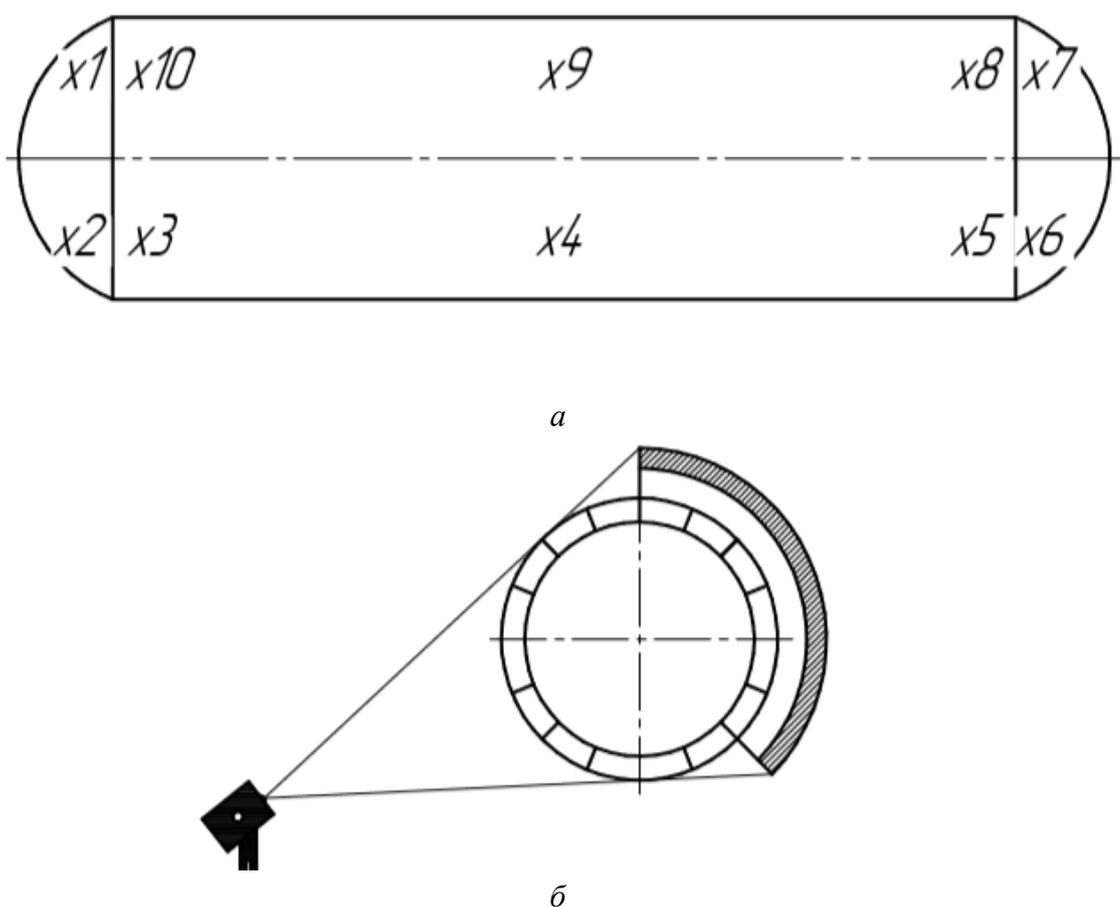


Рисунок 3.2 – Схема объекта контроля – *a* и геометрическая схема формирования одной строки радиографического изображения – *б*

Параметры геометрической схемы формирования цифровых радиографических изображений применительно к рассматриваемому объекту контроля, к которым (параметрам) относится фокусное расстояние F и длина

линейка детекторов L (длина дуги) определяет радиус ОК $R=D/2$. Отметим, что тень ОК не должна полностью покрывать РТИ. Это требование является необходимым для проведения калибровки по «белому».

Формула связи F, L, R выглядит следующим образом

$$L = F\varphi + 2\Delta_L, \varphi = 2\arcsin\left(\frac{R}{F - R - A}\right), \varphi_0 = \frac{L}{F}, \quad (3.2)$$

где Δ_L – размер верхней и нижней частей линейки детекторов, не попадающих в тень ОК; A – минимальное расстояние от ОК до линейки детекторов; φ_0 – половинный угол пучка ИТИ (ИРИ).

В таблице 3.2 приведены результаты измерений толщины стенок ёмкости для хранения жидкого аммиака и аммиачных солей.

Таблица 3.2 – Результаты измерений толщины стенок ёмкости для хранения жидкого аммиака и аммиачных солей

Место замера	№ замера	Толщина, мм	Погрешность прибора, мм	Диаметр резервуара, мм	Проектная толщина, мм
Днище	$x1$	28,0	0,1	3000	28,0
Днище	$x2$	27,9	0,1	3000	28,0
Обечайка	$x3$	25,8	0,1	3000	26,0
Обечайка	$x4$	25,7	0,1	3000	26,0
Обечайка	$x5$	25,7	0,1	3000	26,0
Днище	$x6$	27,7	0,1	3000	28,0
Днище	$x7$	26,8	0,1	3000	28,0
Обечайка	$x8$	25,5	0,1	3000	26,0
Обечайка	$x9$	25,8	0,1	3000	26,0
Обечайка	$x10$	25,7	0,1	3000	26,0

Из анализа данных, приведённых в таблице 3.2, можно сделать вывод о том, что толщина стенки рассматриваемой ёмкости для хранения жидкого аммиака либо его солей H не превосходит 20 мм по стали.

3.2.3 Выбор максимальной энергии источника излучения

Очевидно, что выбор максимальной энергии рентгеновского (тормозного) излучения определяется максимальной толщиной объекта контроля по лучу, который пробегает от первого до последнего детектора линейного регистратора рентгеновского (тормозного) излучения. Пусть x координата детектирующей точки на дуге детекторной линейки, тогда толщина H_x (см рисунок 3.2) находится по формуле

$$H_x = \begin{cases} 0, & |x| > \varphi F \\ 2\sqrt{R^2 - d_x^2}, & \varphi F - H \leq |x| \leq \varphi F \\ 2\left(\sqrt{R^2 - d_x^2} - \sqrt{(R - H)^2 - d_x^2}\right), & 0 \leq |x| \leq \varphi F - H \end{cases}. \quad (3.3)$$

здесь d_x – расстояние от оси ОК до луча, соответствующего координате x . Выражение для вычисления d_x имеет вид

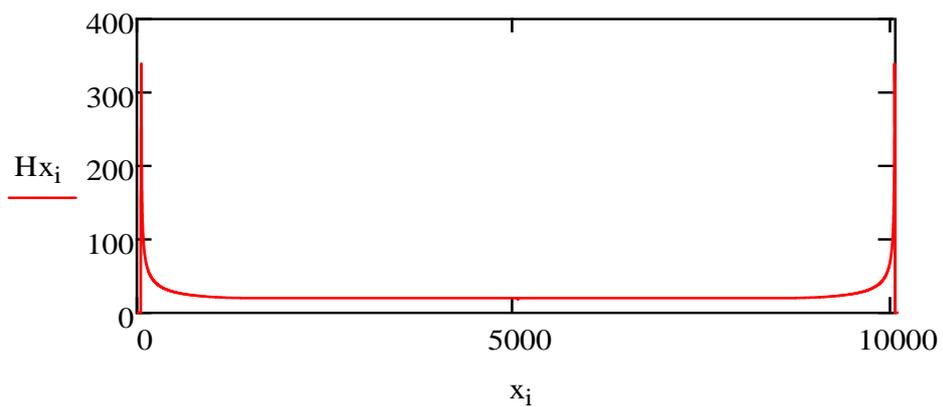
$$d_x = (F - R - A) \sin \frac{x}{F}. \quad (3.4)$$

На рисунке 3.3 приведена зависимость H_x от координаты x для рассматриваемого ОК с детализацией в окрестности стенки.

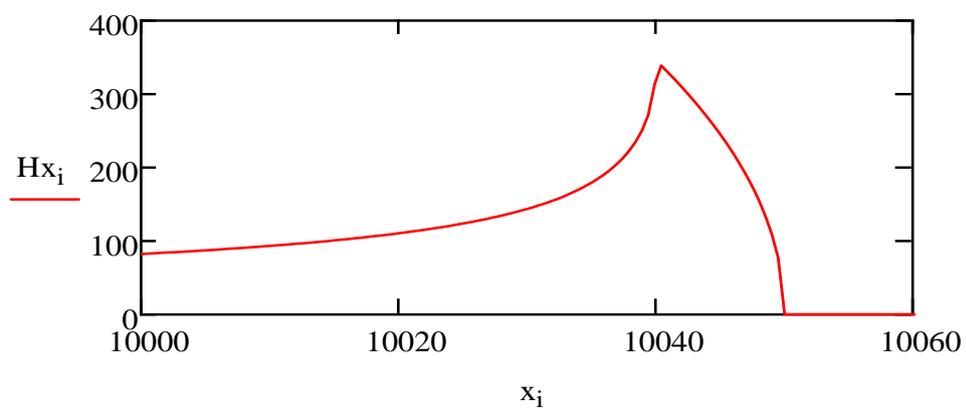
Из анализа данных, представленных на рисунке 3.3, можно сделать вывод, что толщина ОК по лучу изменяется для анализируемой схемы сканирования и гипотетической ёмкости с толщиной стенки 10 мм с полным захватом тени ОК от 20 мм до 340 мм.

Такой диапазон свидетельствует о нерациональности схемы сканирования, альтернативой которой может являться формирование цифровых радиографических изображений зоны интереса сканированием ОК с одновременным взаимным перемещением источника и регистратора излучения, но рассмотрение этого вопроса выходит за рамки рассматриваемого проекта.

Для рассматриваемой схемы сканирования, исходя из отмеченного диапазона изменения толщин, применение бетатрона МИБ-9 производства Томского политехнического университета в качестве источника тормозного излучения является безальтернативным.



a



b

Рисунок 3.3 – Зависимость H_x от координаты x в мм:
a – полная зависимость; *b* – локализация в районе стенки

На рисунке 3.4 приведено изображение бетатрона МИБ-6/9 [46].

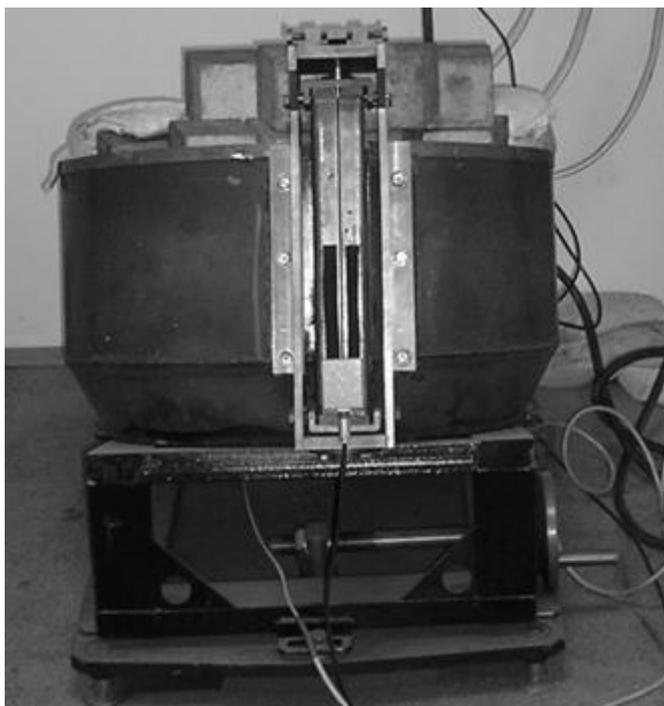


Рисунок 3.4. Бетатрон МИБ-6/9 со щелевым коллиматором [46]

Приведённый на рисунке 3.4 бетатрон оснащён щелевым коллиматором и используемого в комплексах высокоэнергетической цифровой радиографии и в ИДК с функцией распознавания материалов.

3.2.4 Выбор параметров регистраторов тормозного излучения

В настоящее время в качестве радиационно-чувствительных материалов используются сцинтилляционные кристаллы и сцинтилляционная керамика. Наиболее востребованными являются йодид цезия, вольфрамат кадмия, оксисульфид гадолиния. Вольфрамат кадмия отличается высокой плотностью, высоким значением эффективного атомного номера, малым временем послесвечения, поэтому остановим свой выбор именно на этом сцинтилляторе. Размер детекторов в направлении распространения тормозного излучения должен быть как можно большим, чтобы увеличить эффективность регистрации излучения. На практике используются кристаллы толщиной от 30 мм до 35 мм. Поперечные размеры таких кристаллов от 1 мм и выше, меньшие размеры ограничиваются технологией сборки линеек и узких матриц детекторов в регистраторах тормозного излучения.

На рисунке 3.5 общий вид детекторных модулей РТИ [46] с ориентацией на центр фокусного пятна излучателя.



Рисунок 3.5 – Общий вид детекторных модулей РТИ [46]

Модульная архитектура регистраторов тормозного излучения в системах высокоэнергетической томографии позволяет реализовать любую достаточно сложную геометрию пространственного расположения детекторов (прямая линия, прямой угол, дуга окружности).

Относительно выбора разрядности АЦП следует сделать некоторые пояснения. Нижняя граница диапазона разрядности АЦП характерна для систем ЦР, работающих в небольшом диапазоне изменения аналогового сигнала и применяемых для задач, не требующих высокой чувствительности. Верхняя граница диапазона разрядности АЦП применяется для современных высокоточных систем ЦР, используемых не столько в режиме визуализации, сколько в режиме измерений.

Предложенная выше математическая модель формирования цифровых радиографических изображений естественным образом трансформируется в имитационную (численную) модель с последующим переводом её (имитационной модели) в текст (программу), написанный в системе для математических вычислений MathCad.

4 Имитационное моделирование цифровых радиографических изображений ёмкостей для хранения жидкого аммиака и его солей

Был проведён ряд вычислительных экспериментов для формирования радиографических изображений анализируемого объекта контроля. Для этого использовалась адаптация программы для имитационного моделирования цифровых радиографических изображений, написанная на MathCad, применительно к рассматриваемым объектам контроля. Формировались изображения всего ОК и его локальных частей. Необходимость в получении изображений локальных зон вызвана излишним разбросом аналоговых сигналов для ОК в целом.

4.1 Примеры моделирования

Для иллюстрации выбирались ёмкости для хранения жидкого аммиака и его солей с толщиной стенки $H=10$ мм.

Уровень шумов в изображениях определяется уровнем N_0 . Значения N_0 варьировались в диапазоне от 10^3 до 10^6 . В качестве дефекта рассматривались поры размером 2 мм.

На рисунке 4.1 приведено цифровое радиографическое изображение объекта в целом для поперечных размеров единичных детекторов радиационно-чувствительных преобразователей $a=b=1$ мм, разрядности аналого-цифрового преобразователя $l=16$ и $N_0=10^6$. Размеры цифрового радиографического изображения 10057×4201 пикселей.

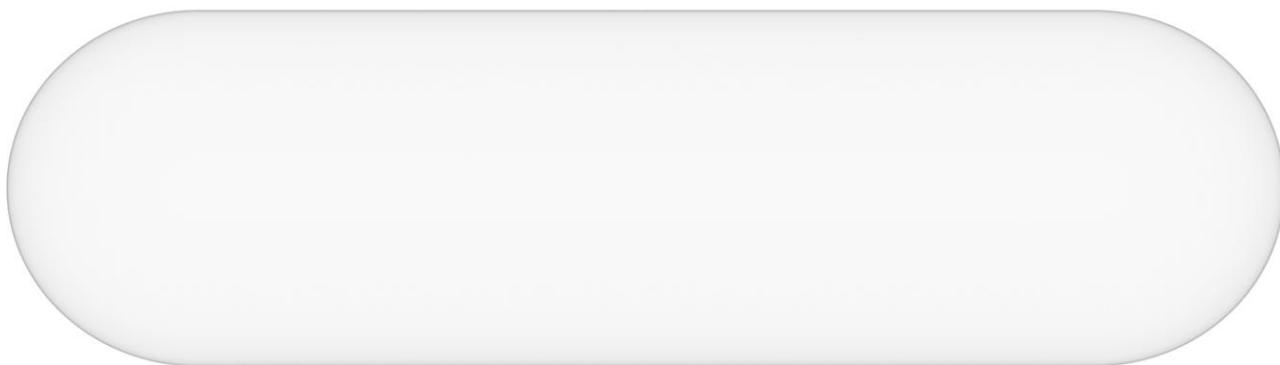


Рисунок 4.1 – Цифровое радиографическое изображение испытываемого объекта

Моделирование изображений подобных размеров сопряжено с определёнными сложностями, связанными с ограничениями на память, заложенную в системе MathCad.

Для оценки производительности вычислений использовалась встроенная в MathCad функция time. Изображение, приведённое на рисунке, сформировано за 20 минут на ноутбуке Asus VivoBook Pro, система Windows 2010 Pro (64), версия Mathcad 15.0.

Для локальных изображений для иллюстрации выбрали размер дефекта $d=2$ мм, $a_d=b_d=0,5$ мм. На рисунке 4.2 приведены цифровые радиографические изображения локальных зон с вариацией N_0 .

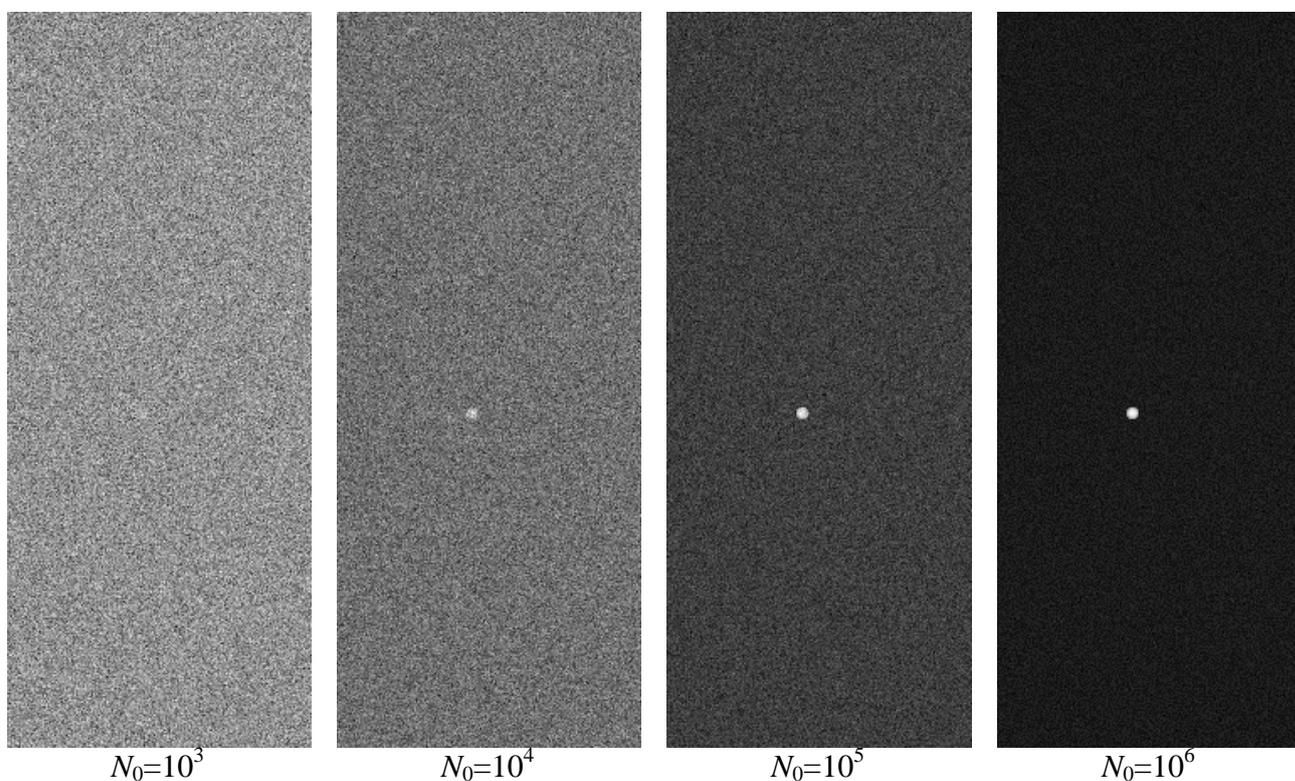


Рисунок 4.2 – Цифровые радиографические изображения локальных зон, $a_d=b_d=0,5$ мм

Из анализа полученных цифровых радиографических изображений можно сделать вывод о существенной значимости параметра N_0 .

Для ответа на вопрос – повысится ли вероятность обнаружения дефектов при уменьшении размера детектора был проведён вычислительный эксперимент для того же дефекта, но с параметрами $a=b=0,25$ мм. На рисунке

4.3 приведены соответствующие цифровые радиографические изображения при условии сохранения удельного значения N_0 (константа на единицу площади).

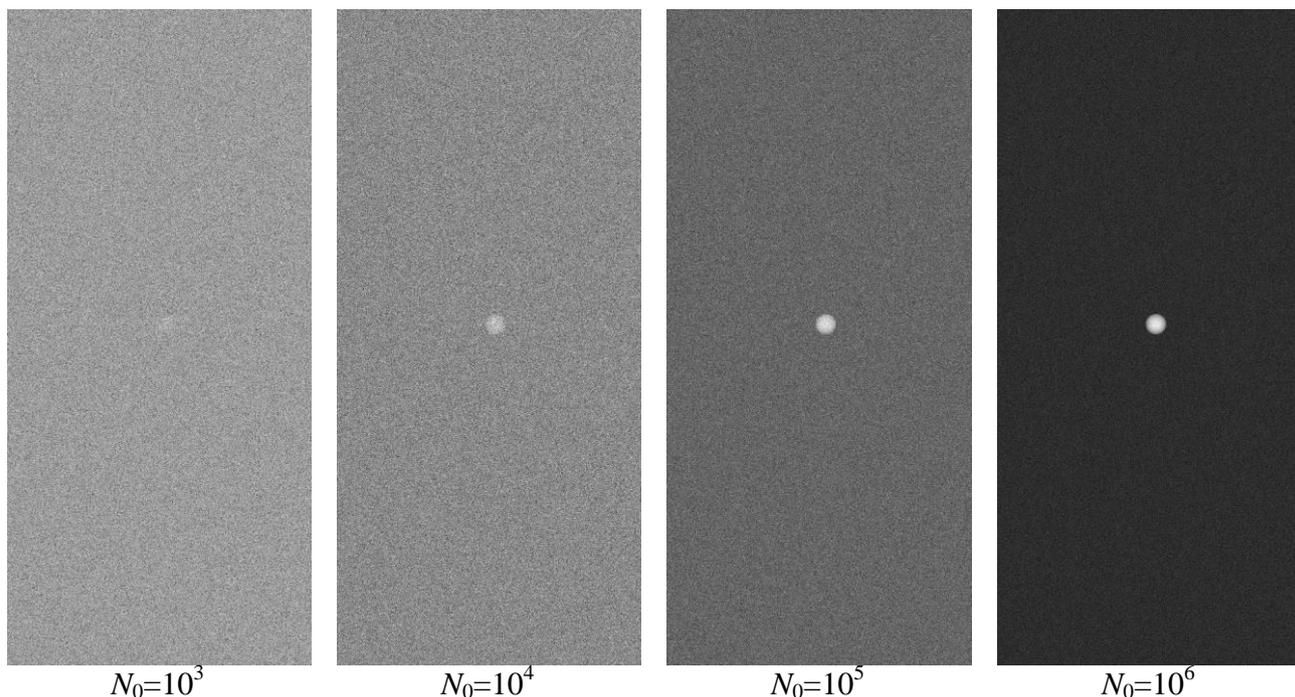


Рисунок 4.3 – Цифровые радиографические изображения локальных зон, $a_d=b_d=0,25$ мм

Сравнение изображений, приведённых на рисунках 4.2 и 4.3, позволяет сделать вывод о некотором увеличении вероятности обнаружения дефектов того же размера при увеличении количества пикселей на изображении дефекта.

4.2 Оценка производительности контроля

Для оценки производительности контроля необходимо знать количество фотонов, пересекающих фронтальную поверхность элементарного объёма радиационно-чувствительного преобразователя РТИ в случае отсутствия объекта за единицу времени, например, за секунду или за один импульс.

Согласно работе [47] на площадку 1 см^2 , расположенную на расстоянии 1 м от излучателя МИБ-9 с мощностью излучения 20 сГр в минуту, падает приблизительно 7×10^5 фотонов от одного импульса излучения. Отсюда следует, что на площадку размером 1 мм^2 , расположенную на расстоянии 6 м, приходится приблизительно 200 фотонов, то есть 8×10^4 фотонов в секунду. Для достижения уровня $N_0=1 \times 10^5$ необходимо приблизительно 1,3 секунды.

Сканирование всего объекта (11000 мм) через 1 мм займёт приблизительно 4 часа. Учитывая высокие риски, связанные с эксплуатацией таких объектов, временные затраты на контроль являются вполне умеренными. Разумеется, что детализации в 1 мм недостаточно, необходимо обнаружение дефектов с размером 0,1–0,2 мм. В этом случае поддержание загрузки радиометрического детектора на уровне $N_0=1\times 10^5$ потребует увеличения временных затрат в 25–100 раз. Отметим, что замена малоинтенсивного ИТИ – МИБ-9 на высокоинтенсивные ИТИ – линейные ускорители фирм VARIAN (США), SIMENS (Германия) или НИИ ЭФА им. Ефремова (г. Санкт-Петербург) нивелирует этот временной ущерб. Отсюда следует, что задача тотального контроля анализируемого объекта за 4 часа является технически реализуемой. Контроль же локальных зон сварных швов повлечёт существенно меньшие временные затраты при должной организации процедуры испытаний.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Данная научно-исследовательская работа направлена на разработку систем технической диагностики и контроля, предназначенных для обнаружения дефектов резервуаров для хранения аммиака и его солей, с помощью метода цифровых радиографических бетатронов МИБ – 9, в лаборатории ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ.

Метод ЦР в различных его реализациях широко применяется: на заводах, производящих металлические конструкции, с целью обнаружения дефектов, на производстве резервуаров и емкостей для инспекции сварных соединений, в автомобильной промышленности для обнаружения дефектов, в досмотровом контроле для обнаружения наркотических вещества и оружия.

Разработка НИР производится группой квалифицированных работников, состоящей из двух человек – руководителя и студента-дипломника.

Выпускная квалификационная работа (ВКР) заключается в обосновании технической возможности проектирования СЦР для контроля полых и заполненных жидким аммиаком или аммиачными солями резервуаров.

Объектом исследования при ее выполнении является контроль резервуара для хранения жидкого аммиака.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НТР, оценка его эффективности, уровня рисков, разработка механизма управления и сопровождения проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- Оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки НТИ;
- Осуществить планирование этапов выполнения исследования;
- Рассчитать бюджет затрат на исследования;
- Произвести оценку научно-технического уровня исследования и оценку рисков.

К НИР относятся работы поискового, теоретического и экспериментального характера, которые выполняются с целью расширения, углубления и систематизации знаний по определенной научной проблеме и создания научного задела.

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Бетатрон являются наиболее компактным и транспортабельным источниками высокоэнергетического излучения и предназначен для неразрушающего контроля качества материалов и изделий больших толщин (например, литья и сварных соединений) как в условиях лаборатории, так и на монтажных площадках, стапелях, при ремонте котельных и энергетических установок, контроле железобетонных опор мостов и других строительных конструкций.

Представленная серия бетатрона МИБ – 9 не имеет мировых аналогов.

Бетатрон прост в обслуживании из-за введения микропроцессорного управления. Он обеспечивает стабильное качество снимков благодаря встроенной и выносной системам дозиметрии пучка. Рассматриваемый бетатрон имеет повышенный уровень надежности за счет разработки быстродействующих эффективных электронных схем защиты силовых цепей и характеризуются более низкой стоимостью по сравнению с другими типами ускорителей.

С помощью бетатрона серии МИБ возможен контроль конструкций из железобетона и кирпича толщиной до 1.5 м, а также стальных изделий толщиной до 300 мм.

Основные характеристики малогабаритного бетатрона производства ТПУ представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные характеристики бетатрона

	Характеристика	Значения
1	Энергия тормозного излучения, МэВ	9
2	Пиковая мощность дозы на расстоянии 1 м от излучателя, сГр / мин	2 – 9
3	Частота следования импульсов, Гц	20
4	Потребляемая мощность, кВА	400
5	Масса излучателя, кг	5
6	Общий вес, кг	150
7	Размер фокусного пятна, мм	260
8	Максимальная контролируемая толщина (из стали), мм	0,25×2
9	Габариты излучателя, мм	330
10	Угол луча в вертикальной плоскости, град	Ø450×340
11	Энергия тормозного излучения, МэВ	60

5.1.3. SWOT-анализ

Произведем также в данном разделе SWOT-анализ НИР. Этот анализ позволит оценить факторы и явления, способствующие или препятствующие продвижению проекта на рынок. В таблице 5.2 описаны сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы реализации НИИ, которые могут появиться в его внешней среде.

Таблица 5.2 – SWOT-анализ НИР

Сильные стороны	Возможности во внешней среде
С1. Данный метод все больше и больше изучается, дорабатывается; С2. Метод, описанный в работе, несет в себе экономичность и ресурсоэффективность; С3. Актуальность метода С4. Наличие опытного руководителя	В1. Нетрудоемкая адаптация научного исследования под иностранные языки; В2. Большой потенциал применения метода в России и других странах;
Слабые стороны	Угрозы внешней среды
Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с данным методом Сл2. Дороговизна данного метода Сл3. Сложное оборудование для проведения эксперимента	У1. Отсутствие спроса на данный метод; У2. Возможность создания более доступного в цене аналогового метода

Далее выявим соответствия сильных и слабых сторон НИ проекта внешним условиям окружающей среды.

В таблицах 5.3–5.4 приведены сильные и слабые стороны проекта.

Таблица 5.3 – Сильные и слабые стороны проекта

Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	Сл1	Сл2	Сл3
	B1	+	–	+	+	0	+	0
	B2	+	+	+	0	0	+	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные сторон и возможности: B1C1C3C4, B2C1C2C3.

Таблица 5.4 – Сильные и слабые стороны проекта

Угрозы		C1	C2	C3	C4	Возможности проекта	Сл1	Сл2	Сл3
	У1	+	+	0	–		–	+	+
	У2	+	0	0	+		0	+	+

В результате совместного анализа приведённых выше таблиц можно отметить следующие коррелирующие сильные стороны и угрозы: У1С1С2, У2С1С4.

Итак, самой большой угрозой для научно-технического проекта является отсутствие платёжеспособного спроса. Также среди угроз можно отметить экономический фактор, то есть исключительную дороговизну метода и средств его реализующих, что может подтолкнуть потребителя к использованию более дешёвых методов, но существенно менее эффективных, и средств неразрушающих испытаний, контроля и диагностики.

Что касается слабых сторон, то для исследуемых методов контроля, испытаний и диагностики, во избежание их влияния (слабых сторон) на качество контроля, требуется привлечь опытных и квалифицированных специалистов, обеспечить обучение нового персонала теории и практическим навыкам, связанным с различными реализациями систем цифровой радиографии и компьютерной томографии.

Вывод. Несмотря на то, что коммерческого потенциала у данного исследования нет, и оно в большей степени олицетворяет теоретическую значимость полученных результатов, результаты научно-технических

исследований актуальны для предприятий химической промышленности в силу их потенциальной опасности.

5.2 Планирование работ по научно-техническому исследованию

5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливаются должности исполнителей.

Работу выполняло 2 человека: Осипов С.П. – руководитель (Р), Хоназаров А.Г. – бакалавр (Б).

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

В таблице 5.5 приведено разделение НИР на этапы.

Таблица 5.5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работы	Исполнитель
Разработка задания на НИР	1	Составление и утверждение задания НИР	Р
Проведение НИР			
Выбор направления исследования	2	Изучение методов цифровой радиографии	Б
	3	Подготовка образцов для эксперимента	Р, Б
	4	Календарное планирование работ	Р, Б
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение экспериментов	Б
	6	Обработка полученных данных	Б
Обобщение и оценка результатов	7	Анализ полученных результатов, выводы	Б
	8	Оценка эффективности полученных результатов	Р, Б
Оформление отчета НИР	9	Составление пояснительной записки	Б

5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Расчет трудоемкости осуществляется опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3 \cdot t_{\text{мин}i} + 2 \cdot t_{\text{макс}i}}{5}, \quad (5.1)$$

где $t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\text{мин}i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\text{макс}i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел. – дн.

Рассчитаем значение ожидаемой трудоёмкости работы:

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (5.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{\text{ож}i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

5.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (5.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения одной работы, календ. дн.;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное время.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (5.4)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности следовательно, рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22$$

тогда длительность этапов в рабочих днях, следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ T_k нужно округлить до целых чисел.

Результаты расчетов приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Временные показатели проведения научного исследования

Работы	Трудоёмкость работ						Исполнители		Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}		Длительность работ в календарных днях, T_{ki}	
	t_{\min} чел-дни		t_{\max} чел-дни		$t_{\text{ож}i}$ чел-дни							
	Р	Б	Р	Б	Р	Б	Р	Б	Р	Б	Р	Б
1	1	0	3	0	2	0	1	0	2	0	3	0
2	3	7	8	7	5	6	1	1	3	3	4	4
3	2	2	4	6	4	2	1	1	2	1	1	1
4	0	7	0	12	0	10	0	1	0	10	0	12
5	0	7	0	14	0	12	0	1	0	12	0	15
6	0	10	0	24	0	13	0	1	0	13	0	16
7	4	12	6	20	4	19	1	1	2	10	3	12
8	0	1	0	8	0	5	0	1	0	5	0	6
9	0	7	0	5	0	3	0	1	0	3	0	4
Итого	10	53	21	96	15	70	4	8	9	57	11	70

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

На основании таблицы 5.6 строится календарный план-график. План-график приведен в таблице 5.7:

Таблица 5.7 – Календарный график проведения НИР

Эт ап	T_{ki}		Январь			Февраль			Март			Апрель			Май		
	Р	Б	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	3	0	■														
2	4	4		■	■												
3	1	1			■												
4	0	12				■	■	■									
5	0	15					■	■	■	■							
6	0	16								■	■	■	■				
7	3	12											■	■	■	■	
8	0	6														■	■
9	0	4															■

■ -Руководитель, ■ - Бакалавр, ■ -Совместная работа

5.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты на научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

Расчет материальных затрат НТИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх } i} \quad (5.5)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх } i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг., руб./м., руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Материальные затраты представлены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Материальные затраты НТИ

Наименование	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Зм), руб.
	Исп.1	Исп.1	Исп.1
Комплектация изделия			
Печатный узел, шт.	1	511	511
Офисные принадлежности			
Бумага для принтера А4, уп.	1	150	150
Картридж для Принтера, шт.	1	500	500
Папка со скоросшивателем, шт.	1	50	50
Итого		1211	1211

Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.

В данную статью включают затраты, связанные с приобретением приборов, стендов, устройств и механизмов, необходимых для проведения работ по теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от цены. Стоимость оборудования, используемого при выполнении НИИ и имеющегося в данной научно-технической организации, учитывается в калькуляции в виде амортизационных отчислений. Результаты расчетов представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ.

№ п/п	Наименование оборудования	Ед. изм	Срок службы, год	Кол-во единиц оборудования	Цена за ед тыс. руб.	Амортизация оборудования за время его использования руб.
1.	Двухэнергетический источник излучения бетатрон МИБ-9	шт	10	1	6 800 000	18630,14
2	Сканирующая линейка ЛД-ВЭ-020430-01-640	шт	10	1	9 000 000	24657,53
3	Ноутбук Sony Vaio VGN-CR31SR/L	шт	15	1	51 000	93,15
Итого						43380,82

Для проведения НИИ требуется с сроком полезного использования каждого вида оборудования:

Двухэнергетический источник излучения бетатрон МИБ-9, Сканирующая линейка ЛД-ВЭ-020430-01-640, – по пятой группе (оборудование испытательное): 10 лет.

Ноутбук Sony Vaio VGN-CR31SR/L - по третьей группе (техника электронно-вычислительная): 15 лет.

Амортизация основных фондов – сумма амортизационных отчислений на полное восстановление основных производственных фондов, вычисленная исходя из их балансовой стоимости и утвержденных норм амортизации. Корректно при расчете затрат учитывать в году приобретения и в последующие годы только ту часть затрат, которая происходит от старения основных фондов.

Рассчитаем амортизацию оборудования техники $I_{ам.обор}$, по следующей формуле

$$I_{ам.обор} = \left(\frac{T_{исп.обор.}}{365} \right) \cdot K_{обор.} \cdot H_a, \quad (5.6)$$

где $T_{исп.обор}$ – время использования оборудования;

365 дней – количество дней в году;

$K_{обор}$ – стоимость оборудования;

H_a – норма амортизации.

$$H_a = \frac{1}{T_{с.с.обор.}}, \quad (5.7)$$

где $T_{с.с.обор.}$ – срок службы оборудования

$$I_{ам.бета.} = \left(\frac{10}{365} \right) \cdot 6800000 \cdot \frac{1}{10} = 18630,14$$

$$I_{ам.лен.} = \left(\frac{10}{365} \right) \cdot 9000000 \cdot \frac{1}{10} = 24657,53$$

$$I_{ам.лен.} = \left(\frac{10}{365} \right) \cdot 51000 \cdot \frac{1}{15} = 93,15$$

$$I_{ам.обор.} = 18630,137 + 24657,534 + 93,151 = 43380,82$$

Основная заработная плата исполнительской темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада. Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату рассчитывается по формуле

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (5.8)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$)

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}, \quad (5.9)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{р}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. в таблице 5.13;

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (5.10)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 56 раб. дня $M = 10,3$ месяца, 6-дневная неделя; при отпуске в 28 раб. дня $M = 11,15$ месяца, 6-дневная неделя.

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. приведен в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Бакалавр
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
выходные дни	44	48
праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
отпуск	56	28
невыходы по болезни	1	1
Действительный годовой фонд рабочего времени	250	274

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot k_{\text{р}} \quad (5.11)$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для г. Томска).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Разряд	$Z_{тс}$, руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	Ассистент	21 760	1,3	28 288	1 165,47	11	12820,17
Бакалавр	1	26 300	1,3	34 190	1 391,30	70	97391
Итого							110211,17

Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (5.12)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15). Примем коэффициент равный 0,12. Расчёт дополнительной заработной платы приведён в таблице 5.12

Таблица 5.12 – Расчёт дополнительной заработной платы

Исполнители	Основная заработная плата, руб.	$k_{доп}$	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель	12820,17	0,12	1538,42
Бакалавр	97391		11686,92
Итого			13225,34

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (5.13)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного мед. страхования и пр.).

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1

ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году, водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Полная заработная плата, руб.
Руководитель	12820,17	14,358,60
Бакалавр	97391	109077,92
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Итого	123436,52	

Расчет затрат на научные и производственные командировки

На данном этапе в научных и производственных командировках нет настоящей необходимости.

Контрагентные расходы

На протяжении всего периода работы (K = 92 дня) необходимы услуги ISP МТС (ОАО «Мобильные ТелеСистемы») по тарифу SMART с абонентской платой в N=8р./сутки. Соответственно сумма расходов А рассчитывается по формуле:

$$A = K \cdot N = 736 \text{ руб.} \quad (5.14)$$

Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты научно-исследовательской (проектной) организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов научного исследования, оплата различных услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

В соответствии с вышесказанным величина накладных расходов определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}} \quad (5.15)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$Z_{\text{накл}} = 430163,53 \cdot 0,16 = 68826,17 \text{ руб.}$$

Формирование бюджета затрат научно – исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат на проведение научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научно-исследовательской организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно – технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект (научно-исследовательскую работу) по каждому варианту исполнения приведен в таблице 5.14. При составлении таблицы 5.14 учитывались все статьи необходимых расходов.

Таблица 5.14 – Расчет бюджета затрат НИР

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НТИ	1211	Пункт
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, с учетом амортизации оборудование за время его использования руб	43380,82	Пункт
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	110 211,17	Пункт
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	13225,34	Пункт
5. Отчисления во внебюджетные фонды	123436,52	Пункт
6. Затраты на научные и производственные командировки	-	Пункт
7. Контрагентские расходы	736	Пункт
8. Накладные расходы	68826,17	16 % от суммы
9. Бюджет затрат НТИ	361027,02	Сумма ст.

5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат двух (или более) вариантов исполнения научного исследования (см. таблицу 5.14). Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи

принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финт}}^{\text{исп}} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (5.16)$$

где $I_{\text{финт}}^{\text{исп}}$ - интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (5.17)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Таблица 5.15 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Испол.1	Испол.2
Критерии			
1. Улучшение производительности труда пользователя	0,25	3	4
2. Функциональная мощность	0,30	4	5
3. Удобство в эксплуатации	0,15	4	4
4. Энергосбережение	0,10	4	3
5. Надежность	0,20	4	5
Итого	1	19	21

Таким образом интегральный показатель ресурсоэффективности равен

$$I_{p\text{-исп.1}} = 3 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,20 = 3,75$$

$$I_{p\text{-исп.2}} = 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,20 = 4,4$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{\text{исп.}i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формулам:

Эффективность данной исследовательской работы состоит в том, что применение ее результатов на предприятии, то есть использование методики по работе с цифровым радиографическим бетатроном МИБ – 9, позволит организации экономить средства за счет снижения количества забракованной продукции. Проведенный SWOT-анализ позволил выявить сильные и слабые стороны исследования, возможности и угрозы, а также взаимосвязь между ними.

В рамках планирования научной работы была составлена структура работ, разработка графика этих работ и определение их трудоемкости. По календарному плану-графику проведения ВКР видно, что начало работы было в начале января. Самой объемной частью работ является написание теоретической части исследования и экспериментальной части. По графику видно, что такие работы, как составление и утверждение темы работы, выбор объекта исследования, составление графика работ и согласование работы, выполнялись двумя исполнителями. Окончание работы в конце мая.

Далее был определен бюджет исследования, который составил 361027,02 руб.

6 Социальная ответственность

НИР направлена на исследовании возможностей контроля резервуаров, заполненных аммиачными солями. С помощью цифровой радиографии.

Рабочей зоной является научная лаборатория ИКД-1, ОКД 18/2 корпуса ТПУ, с двумя комнатами в одной находится непосредственная установка, во второй рабочий компьютер с специализированной программой, металлической дверью между комнатами.

Достоинства социальная пропускной способности:

- улучшение условия труда;
- повышение качество контроля.

Исследуемой объектом контроля является резервуар для хранение жидкого аммиака

В текущем разделе согласно [49] рассматриваются вопросы охраны труда и техники безопасности, связанные с работой в лаборатории, а также разрабатываются мероприятия по предотвращению воздействия на здоровье работников лаборатории опасных и вредных факторов, создание безопасных условий труда для обслуживающего персонала.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

6.1.1 Организационные мероприятия

Согласно [50] работники РКНЛ РКД, 18/2 корпуса ТПУ должны выполнять ряд требований.

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за

исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;

- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

6.1.2 Организация рабочей зоны инженера разработчика

Рабочее место в лаборатории РКНЛ РКД, корпус 18/2 ТПУ должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Оно должно занимать площадь не менее 4,5 м², высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м³ на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает инженер разработчик, должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами инженера разработчика и экраном видеодисплея должно составлять 40 – 80 см. Так же, не обладающее способностью накапливать статическое электричество.

Рабочее место сотрудника в помещении ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ соответствует требованиям нормам [64].

6.2 Производственная безопасность

6.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Для выбора факторов использовался ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [52]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в виде таблицы:

В таблице 6.1 приведены элементы рентгеновского комплекса, которые представляют собой опасные и вредные факторы.

Таблица 6.1 – Основные элементы рентгеновского комплекса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Обработка результатов измерений за компьютером	1. Воздействие электромагнитное излучения; 2. Неудовлетворительный освещенность рабочей зоны; 3. Неудовлетворительный микроклимат 4. Влияние шума	Электрический ток	СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96; ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ; СНиП 23-05-95; СанПиН 2.2.4.548-96;
Работа с рентгеновской установкой	Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне		НРБ-99/2009; СП 2.6.1.2523-09

6.2.2 Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения

Электромагнитное излучение

Согласно [53] элементы компьютеров (экраны, системные блоки) являются источниками электромагнитного излучения (ЭМИ).

Воздействие ЭМИ негативно сказывается на здоровье человека.

Симптомы воздействия ЭМИ:

- утомляемость;
- раздражительность;
- нарушения сна;
- нарушения памяти и внимания.

Следует отметить, что компьютеры являются источниками электромагнитных излучений следующих диапазонов:

- ультрафиолетового 200–400 нм;
- видимого светового 400–750 нм;
- ближнего инфракрасного 750–2000 нм;
- радиочастотного диапазона 3 кГц.

Помимо этого компьютеры формируют электростатические поля.

В таблице 6.2 приведены предельно допустимые уровни электрического, магнитного и электростатического полей.

Таблица 6.2 – Предельно допустимые уровни электрического, магнитного и электростатического полей

Наименование параметров	Диапазон	Допустимые уровни
Напряженность электрического поля на расстоянии 50 см от монитора	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2кГц– 400 кГц	2,5 В/м
Плотность потока магнитной индукции на расстоянии 50 см от монитора	в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2кГц– 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Для уменьшения воздействия электромагнитного излучения на организм необходимо выполнять следующие меры:

- расстояние до монитора должно составлять не менее 50 см;
- не допускается использование мерцающего монитора (нужно использовать монитор с частотой кадров не менее 70 Гц);
- расположение верхнего края монитора должно располагаться на уровне глаз;
- не допускается освещение экрана прямыми яркими источниками;
- использование монитора с низким разрешением;
- необходимы регулярные перерывы в работе.

Электробезопасность

Для предотвращения поражения электрическим током, где размещается рабочее место с ЭВМ в лаборатории ИКД–1, в отделении контроля и диагностики 18/2 корпуса ТПУ, оборудование должно быть оснащено защитным заземлением и занулением, в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации [54]. Для предупреждения электротравматизма необходимо проводить соответствующие организационные и технические мероприятия:

- 1) оформление работы нарядом или устным распоряжением;
- 2) проведение инструктажей и допуск к работе;
- 3) надзор во время работы. Уровень напряжения для питания ЭВМ в данной лаборатории 220 В, для серверного оборудования 380 В.

По опасности поражения электрическим током помещение лаборатории ТПУ, согласно ПУЭ, относится к первому классу – без повышенной опасности. В данном помещении температура не превышает 35°С, влажность 75% [54]. Отсутствует токопроводящая пыль, токопроводящие полы и возможность одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй электрооборудованием.

Оператор установки работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта частей рентгеновского комплекса;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей компьютера или установки);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности бетатрона МИБ – 9 и связанного с ним комплекса сводятся к следующим действиям:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа;
- принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (токоведущие части и элементы необходимо закрывать в непроводящие ток корпуса).

Предъявляются следующие технические требования к персональным компьютерам в лабораторных условиях:

- для электропитания компьютеров должна быть смонтирована отдельная сеть электроснабжения;
- не допускается использование оборудования без подключения к защитному заземлению, если такое подключение предусмотрено конструкцией оборудования;
- не допускается использование оборудования с открытыми корпусами, если это не является основным режимом работы оборудования;
- электрические розетки системы электропитания должны располагаться таким образом, чтобы кабели электропитания оборудования, расположенного на рабочем месте, не пересекали рабочее место (были направлены от места расположения пользователя) [54].

Освещение

Для использование рационального освещения в помещений и рабочих мест, является одним из важнейших условий создания безопасных и благоприятных условий труда.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света. Помещения со специальным оборудованием должны иметь естественное и искусственное освещение согласно [55].

Таблица 6.3 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения помещений жилых зданий [55]

Помещение	Рабочая поверхность и плоскость плоскость нормирования КЕО и освещенности и высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение		
		КЕО $e_{н}$, %		КЕО $e_{н}$, %		Освещенность рабочих поверхностей, лк	Показатель дискомфорта M , не более	Коэффициент пульсации $K_{п}$, %, не более
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении			
Лаборатории	Г-0,0	3,0	1,0	1,8	0,6	300	-	$\leq 5\%$ (работа с ЭВМ) $\leq 20\%$ (при работе с документацией)

В лаборатории ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ, для данного типа, относящихся к 3 разряду – высокая точность работ, минимальная освещенность в лаборатории должна составлять 300-500 лк [55]. В следствие производственной необходимости работа в лаборатории производится без естественного освещения, данные условия согласованы с органами государственного надзора за охраной труда. Общее освещение лаборатории должно быть выполнено в виде сплошных или прерывистых линий светильников, которые располагаются в стороне от рабочих мест параллельно линии зрения работников. Допускается размещение линии светильников искусственного освещения локально над рабочими местами. Для общего освещения необходимо применять светильники с рассеивателями и зеркальными экранами сетками или отражателями, укомплектованные высокочастотными пускорегулирующими аппаратами. Используемые источники света в лаборатории светодиодные светильники и металлогалогеновые лампы местного освещения.

Условия труда в лаборатории ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ, по световому фактору соответствует допустимым нормам [64]

Шум

При работе с ЭВМ в лаборатории ИДК–1, 18/2 корпуса ТПУ, характер шума – широкополосный с непрерывным спектром более 1 октавы.

Повышенный шум ухудшает условия труда, оказывает вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум в лаборатории создается работающими установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

Таблица 6.4. Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест [56]

N пп.	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										Уровни звука и эквивалентны е уровни звука (дБА)
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Творческая деятельность, руководящая работа с повышенными требованиями, научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение, врачебная деятельность. Рабочие места в помещениях дирекции, проектно-конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных, приема больных в здравпунктах	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50	

Согласно [64] уровень шума в лаборатории ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ, не более 50 дБА и соответствует нормам.

Микроклимат

Для проведение эксперимента в лаборатории ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ независимо от наружных условий оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха. Кондиционер представляет собой вентиляционную установку, которая с помощью приборов автоматического регулирования поддерживает в помещении заданные параметры воздушной среды.

Лаборатория ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ является помещением IIa категории. Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.) [57]

Таблица 6.5 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Катег. работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относ. влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	IIa	19-21	18-22	40-60	0,2
Теплый	IIa	20-22	19-23	40-60	0,2

Таблица 6.6 – Допустимые величины интенсивности теплового облучения

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м ² , не более
50 и более	35
25-50	70
не более 25	100

В лаборатории проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ЭВМ.

Согласно [64] микроклимат в лаборатории ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

Повышенный уровень ионизирующего излучения

В лаборатории ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ, защита персонала и гражданского населения в соответствии с нормативами [58], обеспечивается конструкцией радиационной защиты специально оборудованного помещения, в котором располагается экспериментальная рентгеновская установка. К работе с рентгеновским аппаратом допускается предварительно обученный персонал группы А и Б. Согласно НРБ–99/2009 существует 2 категории облучаемых лиц:

- персонал – лица, непосредственно работающие с техногенными источниками (группа А) и лица, которые находятся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б)
- население (все население, а также лица из персонала, вне сферы их производственной деятельности).

Допустимые значения эффективных доз для указанных категорий облучаемых лиц приведены в таблице 6.7:

Таблица 6.7 – Допустимые пределы эффективных доз для категорий

Нормируемые величины	Пределы дозы		
	Персонал (группа А)	Персонал (группа Б)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	5 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 12,5 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год:	Персонал (группа А)	Персонал (группа Б)	Население
в хрусталике глаза	150 мЗв	37,5 мЗв	15 мЗв
коже	500 мЗв	125 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	125 мЗв	50 мЗв

Для инженеров лаборатории (персонал группы А) допустимая эффективная доза составляет 20 мЗв в год в среднем за последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год. Облучение эффективной дозой свыше 200 мЗв в

течение года должно рассматриваться как потенциально опасное. Лица, подвергшиеся такому облучению, должны немедленно выводиться из зоны облучения и направляться на медицинское обследование. Последующая работа с источниками излучения этим лицам может быть разрешена только в индивидуальном порядке с учетом их согласия по решению компетентной медицинской комиссии.

Мероприятия для предотвращения облучения выше нормы. Перед проведением эксперимента персонал заблаговременно обязан покинуть помещение с рентгеновской установкой, плотно закрыть двери и убедиться, что все необходимые условия безопасности выполнены. Работа рентгеновского аппарата сопровождается звуковым сигналом с временным запасом 10 секунд, таким образом, вероятность нахождения персонала в бункере во время работы по причине рассеянности сведена к минимуму. К названным мерам следует добавить использование индивидуального нагрудного дозиметра. Также для большей безопасности перед помещением со стороны входа выставляется знак

«Осторожно, радиация» и ведется постоянное видеонаблюдение за помещением.

Для организации безопасной работы с рентгеновской установкой выделяют 4 принципа:

- уменьшение мощности источников до минимальных величин («защита количеством»);
- сокращение времени работы с источниками («защита временем»);
- увеличение расстояния от источников до работающих («защита расстоянием»);
- экранирование источников излучения материалами, поглощающими ионизирующее излучение («защита экранами»).

Согласно [64], уровень ионизирующего излучения в лаборатории ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

6.3 Экологическая безопасность

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений.

6.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Объектом исследования является, лаборатория ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ.

Увеличение содержания углекислого газа в атмосфере, истощение озонового слоя и прочие загрязнения природы приводят к тому, что в природе изменяются привычные для данного периода условия обитания. Электроника и линейки не несут в себе большой экологической угрозы. Материалы, с которыми проводятся опыты, а именно: медь, алюминий, вольфрам– в последствие остаются для вторичного использования. Часть из них остается как основа для дальнейшего исследования, часть перерабатывается для последующего использования в других отраслях.

Согласно [58], в случае возникновения аварии должны быть приняты практические меры для восстановления контроля над источником излучения и сведения к минимуму доз облучения, количества облученных лиц, радиоактивного загрязнения окружающей среды. При радиационной аварии или обнаружении радиоактивного загрязнения ограничение облучения осуществляется защитными мероприятиями, применимыми, как правило, к окружающей среде и (или) к человеку. Так как досмотровый комплекс является источником искусственно создаваемого излучения, для предотвращения аварийных ситуаций предусмотрено 3 ступени быстрого ручного отключения установки, после которого излучение мгновенно прекращается и опасность экологического загрязнения и вредных воздействий на человека исчезает.

Согласно [64], анализ влияния объекта исследования на окружающую среду, в лаборатории ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

6.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду.

Процесс исследования не влияет каким – либо образом на окружающую среду, так как не имеет каких-либо расходуемых материалов, которые могли бы оказать влияние на окружающую среду, во время исследования.

6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

6.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

Согласно [59] ЧС – это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, эпизоотией (болезнь животных), эпифитотией (поражение растений), применением возможным противником современных средств поражения и приведшее или могущее привести к людским или материальным потерям".

С точки зрения выполнения проекта характерны следующие виды ЧС:

1. Пожары, взрывы;
2. Внезапное обрушение зданий, сооружений;
3. Геофизические опасные явления (землетрясения);
4. Метеорологические и агрометеорологические опасные явления;

Так как объект исследований представляет из себя математическую модель, работающий в программном приложении, то наиболее вероятной ЧС в данном случае можно назвать пожар в аудитории с серверным оборудованием. В серверной комнате применяется дорогостоящее оборудование, не горючие и не выделяющие дым кабели. Таким образом возникновение пожаров происходит из-за человеческого фактора, в частности, это несоблюдение

правил пожарной безопасности. К примеру, замыкание электропроводки - в большинстве случаев тоже человеческий фактор. Соблюдение современных норм пожарной безопасности позволяет исключить возникновение пожара в серверной комнате.

- Согласно [60] предел огнестойкости серверной должен быть следующим: перегородки - не менее EI 45, стены и перекрытия - не менее REI 45. Т.е. в условиях пожара помещение должно оставаться герметичным в течение 45 минут, препятствуя дальнейшему распространению огня.

- Помещение серверной должно быть отдельным помещением, функционально не совмещенным с другими помещениями. К примеру, не допускается в помещении серверной организовывать мини-склад оборудования или канцелярских товаров.

- При разработке проекта серверной необходимо учесть, что автоматическая установка пожаротушения (АУПТ) должна быть обеспечена электропитанием по первой категории (п. 15.1 СП 5.13130.2009).

- Согласно [60] в системах воздуховодов общеобменной вентиляции, воздушного отопления и кондиционирования воздуха защищаемых помещений следует предусматривать автоматически закрывающиеся при обнаружении пожара воздушные затворы (заслонки или противопожарные клапаны).

6.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

При проведении исследований наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в лаборатории ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Основные источники возникновения пожара:

- 1) Неработоспособное электрооборудование, неисправности в проводке, розетках и выключателях. Для исключения возникновения пожара по

этим причинам необходимо вовремя выявлять и устранять неполадки, а также проводить плановый осмотр электрооборудования.

2) Электрические приборы с дефектами. Профилактика пожара включает в себя своевременный и качественный ремонт электроприборов.

3) Перегрузка в электроэнергетической системе (ЭЭС) и короткое замыкание в электроустановке.

Под пожарной профилактикой понимается обучение пожарной технике безопасности и комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожаров.

Пожарная безопасность обеспечивается комплексом мероприятий:

- обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям);

- пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения;

- обеспечение оборудованием и технические разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования).

В соответствии с ТР «О требованиях пожарной безопасности» для административного жилого здания требуется устройство внутреннего противопожарного водопровода.

Согласно ФЗ-123, НПБ 104-03 «Проектирование систем оповещения людей о пожаре в зданиях и сооружениях» для оповещения о возникновении пожара в каждом помещении должны быть установлены дымовые оптико-электронные автономные пожарные извещатели, а оповещение о пожаре должно осуществляться подачей звуковых и световых сигналов во все помещения с постоянным или временным пребыванием людей.

Лаборатория ИДК-1, 18/2 корпуса ТПУ оснащена первичными средствами пожаротушения: огнетушителями ОУ-1 1шт., ОП-1, 1шт.

(предназначены для тушения любых материалов, предметов и веществ, применяется для тушения ПК и оргтехники, класс пожаров А, Е.).

Таблица 6.8 – Типы используемых огнетушителей при пожаре в электроустановках

Напряжение, кВ	Тип огнетушителя (марка)
До 1,0	порошковый (серии ОП)
До 10,0	углекислотный (серии ОУ)

Согласно [61] помещение, предназначенное для проектирования и использования результатов проекта, относится к типу П-2а.

Таблица 6.9. Категории помещений по пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
П-2а	Зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества в количестве, при котором удельная пожарная нагрузка составляет не менее 1 мегаджоуля на квадратный метр.

В корпусе 18/2 ТПУ имеется пожарная автоматика, сигнализация. В случае возникновения загорания необходимо обесточить электрооборудование, отключить систему вентиляции, принять меры тушения (на начальной стадии) и обеспечить срочную эвакуацию студентов и сотрудников в соответствии с планом эвакуации.



Рисунок 6.1 – План эвакуации людей на случай пожара.

Заключение

В выпускной квалификационной работе обоснована техническая возможность контроля ёмкостей для хранения солей аммиака методом высокоэнергетической цифровой радиографии. Для этого: осуществлён выбор геометрической схемы контроля и максимальной энергии источника тормозного излучения; адаптирована краткая математическая модель системы цифровой радиографии и соответствующая программа имитации цифровых радиографических изображений; проведена серия вычислительных экспериментов с вариацией загрузки радиометрических детекторов, размеров дефектов и поперечных размеров детекторов; осуществлена интерпретация результатов вычислительных экспериментов; проведена оценка производительности контроля системы цифровой радиографии применительно к испытаниям резервуаров для хранения солей аммиака.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кондратенко Е.В. Оценка возможности использования теплового метода контроля герметичности котла железнодорожной цистерны // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19) – С. 18–24.
2. Антипенко Е.И., Висиловский Н.Г., Кельрих М.Б. Оценка эффективности метода акустической эмиссии при техническом диагностировании объектов // Автоматическая сварка. – 2004. – № 4. – С. 11–14.
3. Муравьев В.В., Степанова Л.Н., Бобров А.Л., Власов К.В. Акустико-эмиссионный контроль котлов железнодорожных цистерн // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – № 4. – С. 69–72.
4. Григорьев П.С., Суворова К.Е. Оценка частот собственных колебаний и динамических напряжений в оболочке котла цистерны // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14. – № 4. – С. 637–643.
5. Shikhaliev P.M. Large-scale MV CT for cargo imaging: A feasibility study // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – Vol. 904. – P. 35–43.
6. Singh R. The Nobel laureate WC Roentgen and his X-Rays // Indian Journal of History of Science. – 2016. Vol. 51. – P. 521–530.
7. Glasser O. WC Roentgen and the discovery of the Roentgen rays // AJR. American journal of roentgenology. – 1995. Vol. 165. No. 5. – P. 1033–1040.
8. Goodman P.C. The new light: discovery and introduction of the X-ray // AJR. American journal of roentgenology. – 1995. Vol. 165. No. 5. – P. 1041–1045.
9. Korner M., Weber C.H., Wirth S., Pfeifer K.J., Reiser M.F., Treitl M. Advances in digital radiography: physical principles and system overview. // Radiographics. – 2007, Vol. 27, № 3, – P. 675–686.
10. Yaffe M.J., Rowlands J. A. X-ray detectors for digital radiography // Physics in Medicine & Biology. – 1997. – V. 42. – No. 1. – P. 1–39.

11. Kasap S.O., Rowlands J.A. Direct-conversion flat-panel X-ray image sensors for digital radiography // Proceedings of the IEEE. – 2002. – Vol. 90. – No. 4. – P. 591–604.
12. Brody W.R: DigitalRadiography(ed 1). New York,NY, Raven, – 1984
13. Багаев К.А. Цифровая радиография, обзор технологий и зарубежных стандартов // Экспозиция Нефть Газ. – 2012. – № 7 (25). – С. 11–13.
14. Майоров А.А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле // Сфера нефтегаз. – 2009 – №. 9. – С. 26–37.
15. Клименов В.А., Алхимов Ю.В., Штейн А.М., Касьянов С.В., Бабилов С.А., Батрагин А.В., Осипов, С.П. Применение и развитие методов цифровой радиографии для технической диагностики неразрушающего контроля и инспекции // Контроль. Диагностика. – 2013. – №. 13. – С. 31–42.
16. Korner M., Weber C.H., Wirth S., Pfeifer K.J., Reiser M.F., Treitl M. Advances in digital radiography: physical principles and system overview// Radiographics. – 2007. – Vol. 27.No. 3. – P. 675—686.
17. Seynaeve P.C., Broos J.I. The history of tomography // Journal belge de radiologie. – 1995. – Vol. 78. No 5. – P. 284—288.
18. Скоморохов А.О., Нахабов А.В., Белоусов П.А. Автоматизированный анализ результатов радиографического контроля сварных соединений на АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2009. – № 3. – С. 29–36.
19. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Турбин Е.М. Цифровая радиография в неразрушающем контроле авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 562–574.
20. Грудский А.Я. Цифровая революция в радиационном неразрушающем контроле: миф, отдалённое будущее или реальность // В мире неразрушающего контроля. – 2019. – Т. 22. – № 1. – С. 4–9.

21. Bertolucci E., Chirco P., Conti M., Marcello L., Rossi M., Russo P. Imaging performance of single-element CdZnTe detectors for digital radiography // IEEE Transactions on nuclear science. – 1998. – Vol. 45. – No. 3. – P. 406–412.
22. Pincu R., Kleinberger O. The Transition from Conventional Radiography to Digital Radiography // Materials Evaluation. – 2009. – Vol. 67. – No. 5. – P. 499–506.
23. Троицкий В.А. Пособие по радиографии сварных соединений (Методические рекомендации для специалистов по радиографическому контролю). – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, “Феникс”, – 2008. – 316 с.
24. Harara W. Digital radiography in industry // 17th World Conf. on Non-Destructive Testing, Shanghai, China. – 2008. www.ultrasonic.de/article/wcndt2008/papers/12.pdf
25. Acharya R.V., Kumar U., Singh G. Experiences in Digital Industrial Radiography using High-Resolution A-Si Flat Panel X-Ray Detector System // Ratio. – 2009. – Vol. 3. – No. 6. – P. 9.
26. Ewert U. Current Trends in Digital Industrial Radiography-from Nano to Macro Scale // 2017 Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). – IEEE. – 2017. – P. 312–317.
27. Osipov S.P., Zhang G.L., Chakhlov S.V., Shtein M.M., Shtein A.M., Trinh V.B., Sirotyan E. Estimation of parameters of digital radiography systems //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2018. – Vol. 65. – No. 10. – P. 2732–2742.
28. Watson S.A., Winch N.M. Practical radiography. – Los Alamos National Lab. (LANL), Los Alamos, NM (United States), 2018. – No. LA–UR–18–20984.
29. Hashem N.R., Haas D.A., Pryor M.W. MeV photon imaging with robotic sample positioning at a research reactor // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2018. – Vol. 318. – No. 1. – P. 599–604.
30. Holden N.E. Table of the isotopes. Brookhaven National Lab., Upton, NY (US), 2003. No. BNL–71000-2003–BC. 92 p.
31. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975. 416 с.
32. Holden N.E., Coplen T.B., Böhlke J.K., Tarbox L. V., Benefield J., de Laeter J.R., ... & Walczyk T. IUPAC Periodic Table of the Elements and Isotopes (IPTEI) for the

- Education Community (IUPAC Technical Report) //Pure and Applied Chemistry. – 2018. – Vol. 90. – No. 12. – P. 1833–2092.
33. http://impuls-ndt.ru/article_info.php?articles_id=4
34. www.ntcexpert.ru/m111/778-tehnicheskie-harakteristiki-rentgenovskih-apparatov
35. Chakhlov S.V., Kasyanov S.V., Kasyanov V.A., Osipov S.P., Stein M.M., Stein A.M., Xiaoming S. Betatron application in mobile and relocatable inspection systems for freight transport control //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, – 2016. – Vol. 671. – No. 1. – No. article 012024.
36. Shvedunov V.I., Alimov A.S., Ermakov A.N., Kamanin A.N., Khankin V.V., Kurilik A.S., Yurov D.S. Electron Accelerators Design and Construction at Lomonosov Moscow State University // Radiation Physics and Chemistry. – 2019. – Vol. 159. – P. 95–100.
37. Капустин В.И., Осипов С.П. О критериях сравнения различных модификаций методов цифровой радиографии // Контроль. Диагностика. – 2013. – №. 12. – С. 25–32.
38. Osipov S.P., Zhang G.L., Chakhlov S.V., Shtein M.M., Shtein A.M., Trinh V.B., & Sirotyan, E. Estimation of parameters of digital radiography systems //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2018. – Т. 65. – №. 10. – С. 2732–2742.
39. Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y. The mathematical model of image, generated by scanning digital radiography system //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, – 2017. – Vol. 168. – No. 1. No. article 012042.
40. Осипов С.П., Чахлов С.В., Кайролапов Д.У., Сиротьян Е.В. Численное моделирование радиографических изображений – основа корректного проектирования систем цифровой радиографии крупногабаритных объектов // Дефектоскопия. – 2019. – №. 2. – С. 43–55.
41. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Осипов С.П. Оценка эффективности щелевой коллимации высокоэнергетического источника излучения при радиометрическом контроле крупногабаритных объектов // Дефектоскопия. – 2006. – №. 2. – С. 40–45.

42. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Осипов С.П., & Касьянов С.В. Щелевые и пинхольные коллиматоры в цифровой рентгенографии // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – №. 3. – С. 62–64.
43. Осипов С.П., Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Касьянов С.В. Выбор параметров щелевых коллиматоров для формирования узких пучков высокоэнергетического рентгеновского излучения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – №. 8. – С. 43.
44. Schiff L.I. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // Physical review. – 1951. – Vol. 83. – P. 252–253.
45. Ali E.S.M., Rogers, D.W.O. Functional forms for photon spectra of clinical linacs // Physics in medicine and biology. – 2011. – Vol. 57. – P. 31–50.
46. Гавриш Ю.Н., Вахрушин И.Ю., Павленко А.В., Бердников Я.А., Лебедев М.Б., Усачев Е.Ю., Романов И.В. Досмотровый радиометрический комплекс для контроля крупногабаритных автотранспортных средств и грузов // Вопр. атомной науки и техники. – 2010. – №. 2(48). – С. 3–8.
47. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Осипов С.П. Методика оценки производительности досмотрового комплекса для контроля крупногабаритных объектов // Контроль. Диагностика. – 2005. – №. 12. – С. 75–83.
- 4.8. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А., Шаповалова Н.В., Тухватулина Л.Р., Креницына З.В. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность ресурсосбережение: учебно-методические пособие // Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, – 2014. – 36 с.
49. Пашков Е.Н., Мезенцева И.Л. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, – 2019. – 24 с.
50. ТК РФ, N 163 Трудовой кодекс Российской Федерации, – 2011.
51. ГОСТ 12.2.032–78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя, – 2017.

52. ГОСТ 12.0.003–2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация, – 2015.
53. Электромагнитная излучения [электронный ресурс], URL: <https://vuzlit.ru/147620/istochniki>, – Дата обращения: 10.03.2019.
54. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание, – 2002.
55. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение, – 2011.
56. СН 2.2.4/2.1.8.562–96, Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки, – 1996.
57. ГОСТ 30494–2011, здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях, – 2011.
58. СанПиН 2.6.1.2523–09 "Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 Повышенный уровень ионизирующего излучения, – 2009.
59. ГОСТ Р 22.0.02–94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий, – 1994.
60. СП 5.13130.2009 – Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.
61. НПБ 105–03, Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, – 2003.
62. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования, – 1984.
63. Пожарная безопасность серверной комнаты [Электронный ресурс] URL: <https://avtoritet.net/library/press/245/15479/articles/15515>, Дата обращения: – 10.03.2019.
64. Специальная оценка условий труда в ТПУ. – 2018.
65. Дашковский А.Г. Расчет устройства защитного заземления. Методические указания к выполнению самостоятельной работы по дисциплине «Электробезопасность» для студентов всех специальностей ЭЛТИ. Томск, изд. ТПУ, – 2010. – 8 с.

Приложения А

1 Моделирование цифровых радиографических изображений объекта контроля (ОК) - ёмкости для хранения аммиака

`ORIGIN := 1` Счётчик элементов от 1 (единицы)

Блок исходных данных по ослаблению гамма-излучения

Число Авогадро - `NA := 6.023·1023`

Эффективные атомные номера и молярные массы в файле ZM.txt, находящемся в директории программы

Первый столбец - эффективные атомные номера Z_e
Второй столбец - молярные массы M_z `MZ := READPRN("ZM.txt")`

Ввод данных по материалам: файл 82.txt находится в директории программы

`C := READPRN("82.txt")` Количество химических элементов в таблице `i0 := cols(C) - 1 = 80`

Количество групп энергий `j0 := rows(C) = 127`

Счётчик строк Счётчик столбцов
`j := 1..j0` `i := 1..i0` `Ze := MZ(1)` `Mz := MZ(2)`

2 Энергии переводится в кэВ, сечения и энергия зарегистрированного фотона ранжируются по возрастанию энергии, сечения пересчитываются в МКО

В базах данных энергии от максимума к минимуму, делает перестановку от минимума до максимума

`E := reverse(C(1))·0.001` `mm(i) := reverse(C(i+1))· $\frac{NA \cdot 10^{-24}}{Mz_i}$`

Блок аппроксимации массовых коэффициентов ослабления

Вычисление коэффициентов сплайнов для МКО `vcc(i) := cspline(E, mm(i))`

Задание функций-сплайнов для МКО `mas(x, i) := interp(vcc(i), E, mm(i), x)`

Сцинтиллятор $CdWO_4$ плотность `psc := 7.9`

$$\text{МКО сцинтиллятора} \quad msc(x) := \frac{mas(x, 74) \cdot Mz_{74} + mas(x, 48) \cdot Mz_{48} + 4 \cdot mas(x, 8) \cdot Mz_8}{Mz_{74} + Mz_{48} + 4 \cdot Mz_8}$$

$$\text{Эффективность регистрации } \varepsilon(x, hsc) := 1 - e^{-msc(x) \cdot \rho sc \cdot hsc}$$

Данные для расчётов

$$\text{Энергетический спектр (формула Шиффа)} \quad ff(emax, x) := \frac{emax - x}{x}$$

3 Предварительная фильтрация рентгеновского излучения

$z_f := 74$ $\rho f := 18.4$ Фильтр из вольфрама толщиной hf

$$sf(emax, hf) := \int_{10}^{emax} ff(emax, x) \cdot e^{-mas(x, Ze_{z_f}) \cdot \rho f \cdot hf} dx \quad \text{Нормировка спектра}$$

$$f(emax, x, hf) := \frac{ff(emax, x) \cdot e^{-mas(x, Ze_{z_f}) \cdot \rho f \cdot hf}}{sf(emax, hf)}$$

Иллюстрация ужесточения излучения предварительным фильтром

$Em := 9000$

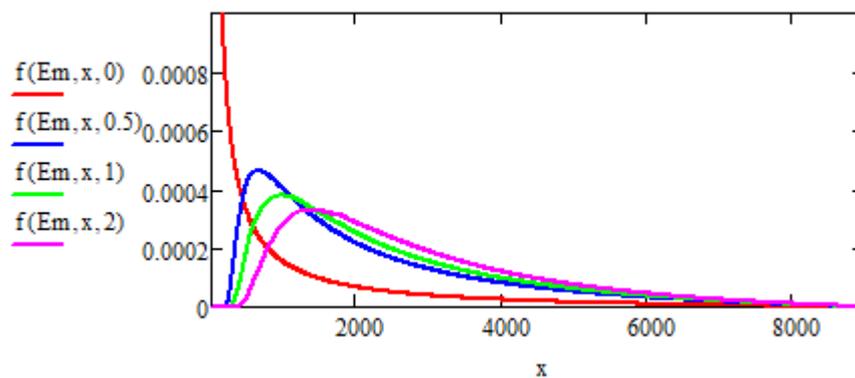


Рисунок 1 – Иллюстрация ужесточения излучения предварительным фильтром

Материал ОК - сталь 4кп $k_0 := 10$

$$\alpha_{\text{ок}} := 0.01 \cdot \begin{pmatrix} 0.27 \\ 0.05 \\ 0.7 \\ 0.3 \\ 0.05 \\ 0.04 \\ 0.3 \\ 0.008 \\ 0.3 \\ 0.08 \end{pmatrix} \quad \text{Доля Fe} \quad \alpha_{k_0+1} := 1 - \sum_{k=1}^{k_0} \alpha_k$$

$$z_{\text{ок}} := \begin{pmatrix} 6 \\ 14 \\ 25 \\ 28 \\ 16 \\ 15 \\ 24 \\ 7 \\ 29 \\ 33 \\ 26 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{ll} \text{C} & 0,18 - 0,27 \text{ Сталь Ст4кп} \\ \text{Si} & 0,01 - 0,05 \\ \text{Mn} & 0,4 - 0,7 \\ \text{Ni} & \text{до } 0,3 \\ \text{S} & \text{до } 0,05 \\ \text{P} & \text{до } 0,04 \\ \text{Cr} & \text{до } 0,3 \\ \text{N} & \text{до } 0,008 \\ \text{Cu} & \text{до } 0,3 \\ \text{As} & \text{до } 0,08 \\ \text{Fe} & \sim 98 \quad k := 1..k_0 \end{array} \quad \alpha_k := \alpha_{z_k}$$

4 Зависимость интенсивности и потока частиц от параметров ОК с учётом дополнительной фильтрации

Массовый коэффициент ослабления ОК $\text{masoc}(x) := \sum_{k=1}^{k_0+1} (\alpha_k \cdot \text{mas}(x, z_{\text{ок}k} - 1))$

n_0 количество фотонов на фронтальную поверхность единичного детектора

$$Sf(\text{emax}, hf) := \int_5^{\text{emax}} f(\text{emax}, x, hf) dx$$

$$NN(\text{emax}, \rho H, hsc, n_0, hhf) := n_0 \cdot \frac{\int_5^{\text{emax}} f(\text{emax}, x, hhf) \cdot e^{-\text{masoc}(x) \cdot \rho H} \cdot \varepsilon(x, hsc) dx}{Sf(\text{emax}, hhf)}$$

$$I(\text{ema}, \rho H, hsc, n_0, hhf) := NN(\text{ema}, \rho H, hsc, n_0, hhf) \cdot \frac{\int_5^{\text{ema}} x \cdot f(\text{ema}, x, hhf) \cdot e^{-\text{masoc}(x) \cdot \rho H} \cdot \varepsilon(x, hsc) dx}{\int_5^{\text{ema}} f(\text{ema}, x, hhf) \cdot e^{-\text{masoc}(x) \cdot \rho H} \cdot \varepsilon(x, hsc) dx}$$

Разрядность АЦП $k := 16$ $Co := 1.2$ коэффициент от переполнения

$$\Delta(\text{emax}, hsc, n_0, hhf) := \frac{Co \cdot I(\text{emax}, 0, hsc, n_0, hhf)}{2^k - 1} \quad \text{Интервал дискретизации}$$

Максимальная энергия тормозного излучения $e1 := Em$

Калибровочные измерения количество ступеней в эталоне $nr := 10$

Максимальная толщина ОК в мм $h_{maxmm} := 350$ плотность материала ОК $\rho_{oc} := 7.56$

Переход в сантиметры $h_{max} := \frac{h_{maxmm}}{10}$ массовая толщина $\rho h_{max} := h_{max} \cdot \rho_{oc}$
 $ip := 1..np + 1$

толщина ступени $h_{ph} := \frac{\rho h_{max}}{np + 1}$ $n0 := 10^5$ $\rho h_{max} = 264.6$
 $\eta := 0.000000001$

$\rho h_{ip} := h_{ph}(ip - 1)$ $hsc := 3$ $hff := 0.1$ $\Delta D := \Delta(e1, hsc, n0, hff)$

$I1_{ip} := I(e1, \rho h_{ip}, hsc, n0, hff)$ $N1_{ip} := NN(e1, \rho h_{ip}, hsc, n0, hff)$

Вычисление коэффициентов
аппроксимации

Задание сплайнов

$vI1 := cspline(\rho h, I1)$

$I1(y1) := interp(vI1, \rho h, I1, y1)$

$vN1 := cspline(\rho h, N1)$

$NN1(y1) := interp(vN1, \rho h, N1, y1)$

Оцифровка аналоговых сигналов $ID1_{ip} := floor\left(\frac{I1_{ip}}{\Delta D}\right)$

Толщина ОК в длинах
свободного пробега

Оценка толщины ОК в дсп по
цифровому сигналу

η защищает от
логарифмирования нуля

$y_{ip} := -\ln\left(\frac{I1_{ip}}{I1_1}\right)$

$y_{d_{ip}} := -\ln\left(\frac{ID1_{ip}}{ID1_1} + \eta\right)$

$MA := 100$

Предельная толщина ОК в дсп для данного АЦП $y_{max} := \ln\left[\frac{(2^k - 1)}{Co \cdot MA}\right] = 6.3028$

Реальная максимальная толщина ОК в дсп

$\max(y) = 8.1713$

$\min(y) = 0$

Условие $y_{max} > \max(y)$ соблюдается!!!!

Максимальная энергия тормозного
излучения

$e1 = 9000$ кэВ

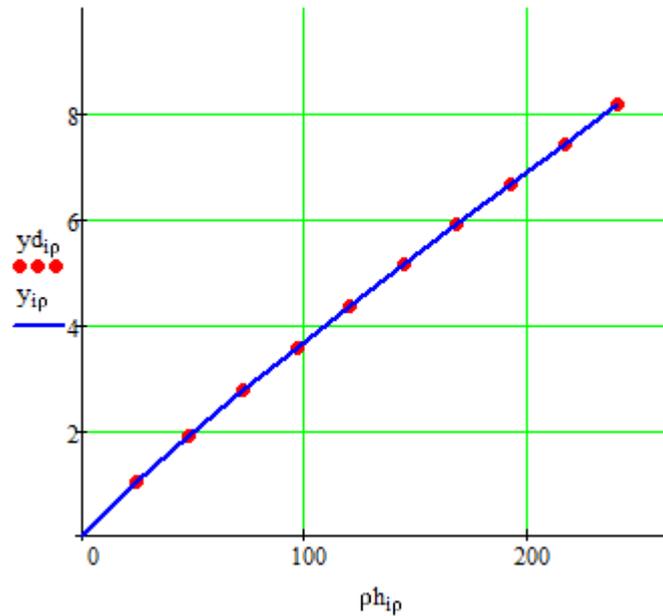


Рисунок 2 – Иллюстрация влияния разрядности АЦП на качество оцифровки аналогового сигнала

Регистратор тормозного излучения - линейный детектор TNSK ООО
Диагностика М

Размеры линейного детектора в мм подбираются из размеров объекта контроля (ОК)

Диаметр ОК, мм $DT := 3000$ Фокусное расстояние $F := 6000$

$$R := \frac{DT}{2} \quad \varphi := \arcsin\left(\frac{R}{F - R - 100}\right) \quad AC := 26$$

Длина детекторной дуги в мм $A := \text{floor}(2 \cdot \varphi \cdot F) + AC$ $A = 4200$

Физический размер пикселя в мм $a := 1$ $b := 1$

Количество пикселей в столбце $BC := 100$

Длина ОК в мм $L := 10000$ $B := L + BC$

Количество пикселей в строке $N := \text{floor}\left(\frac{B}{b}\right)$

Размер A свяжем с индексом ix, а B с iy $N := 500$ $N = 500$

Объект контроля цистерна из стали толщиной стенки в мм $H_{mm} := 10$

Массовая толщина $\rho_{Нос} := \rho_{ос} \cdot H$

ОК расположен вблизи детектора, оси объекта и детектора совпадают

Участок для измерения по воздуху на детекторе $A_{oc} := \frac{AC}{2}$

Участок для измерения по воздуху горизонтальный $B_{oc} := \frac{BC}{2}$

Размеры отступа тени ОК в пикселях $M_{oc} := \text{floor}\left(\frac{A_{oc}}{a}\right)$ $N_{oc} := \text{floor}\left(\frac{B_{oc}}{b}\right)$

$M_{oc} = 13$ $N_{oc} = 50$

Положение тени ОК относительно угла линейного детектора в мм

$X_{oc} := A_{oc}$ $Y_{oc} := B_{oc}$

Смещение тени ОК в пикселях $M_x := \text{floor}\left(\frac{X_{oc}}{a}\right)$ $N_y := \text{floor}\left(\frac{Y_{oc}}{b}\right)$

Внутри стенки ОК пора в виде сферы диаметром в мм $D_{mm} := 2$

Переведём в см $D := D_{mm}$

Координаты центра поры в мм $XD := \frac{A}{2}$ $YD := \frac{B}{2}$ $ZD := H \cdot \frac{10}{2}$

Координата z связана с центром ОК

Граница сферической полости $(x - XD)^2 + (y - YD)^2 + (z - ZD)^2 = \frac{D_{mm}^2}{4}$

Распределение лучевой толщины ОК по изображению в см $H_{(x,y)}$ в дискретах H_{i_x, i_y}

Вначале распределение толщин без поры, используем метод замещающих объёмов

Объект контроля - цистерна длиной L , с центральной цилиндрической частью длиной L_0 и сферическими начальной и конечной частями радиусом R

Уравнения для описания внешней и внутренней поверхности

$$\text{Hoc1}(x, y, RR, bb, B) := \begin{cases} \text{res} \leftarrow 0 \\ \text{if } bb + RR \leq y \leq B - bb - RR \\ \left| \begin{array}{l} dt \leftarrow RR^2 - \left(x - \frac{A}{2}\right)^2 \\ \text{res} \leftarrow \sqrt{dt} \text{ if } dt > 0 \end{array} \right. \\ \text{if } bb < y < bb + RR \\ \left| \begin{array}{l} ds1 \leftarrow RR^2 - \left(x - \frac{A}{2}\right)^2 - (y - bb - RR)^2 \\ \text{res} \leftarrow \sqrt{ds1} \text{ if } ds1 \geq 0 \end{array} \right. \\ \text{if } B - bb - RR < y < B - bb \\ \left| \begin{array}{l} ds2 \leftarrow RR^2 - \left(x - \frac{A}{2}\right)^2 - (y - B + bb + RR)^2 \\ \text{res} \leftarrow \sqrt{ds2} \text{ if } ds2 \geq 0 \end{array} \right. \\ \text{res} \end{cases}$$

Иллюстрация сечения цистерны с гипотетической толщиной стенки 40 мм

$$\begin{aligned} \text{ii} &:= 1..m0 & m0 &:= 1000 \\ \text{yy}_{\text{ii}} &:= 0 + \text{ii} \cdot \frac{B}{m0} & \text{xx} &:= \frac{A}{2} \end{aligned}$$

$$g1_{\text{ii}} := \text{Hoc1}(\text{xx}, \text{yy}_{\text{ii}}, R, \text{Вос}, B) \quad g2_{\text{ii}} := \text{Hoc1}(\text{xx}, \text{yy}_{\text{ii}}, R - 40, \text{Вос} + 40, B)$$

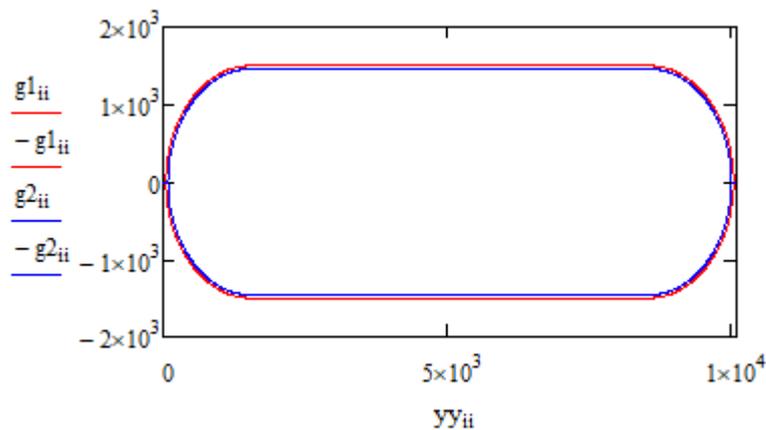


Рисунок 3 – Иллюстрация сечения цистерны с гипотетической толщиной стенки

Распределение лучевой толщины

$$\text{Нос}(x, y, R, \text{Вос}, B, \text{Нмм}) := 2 \cdot (\text{Hoc1}(x, y, R, \text{Вос}, B) - \text{Hoc1}(x, y, R - \text{Нмм}, \text{Вос} + \text{Нмм}, B))$$

Описание сферической поры

$$\text{Нр}(x, y) := \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{мм}}^2}{4} - [(x - XD)^2 + (y - YD)^2]} & \text{if } [(x - XD)^2 + (y - YD)^2] \leq \frac{D_{\text{мм}}^2}{4} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Резльтирующее распределение массовой толщины по x, y

$$\rho_{HR}(x, y, R, B_{oc}, B, H_{mm}) := \frac{(H_{oc}(x, y, R, B_{oc}, B, H_{mm}) - H_p(x, y))}{10} \cdot \rho_{oc}$$

Иллюстрация массовой толщины цистерны по центральному сечению с дефектом в стенке

$$\begin{aligned} \ddot{ii} &:= 1..m0 & m0 &:= 100000 & y_{y_{ii}} &:= 0 + \ddot{ii} \cdot \frac{B}{m0} & x_{x_{ii}} &:= \frac{A}{2} \\ g_{d_{ii}} &:= \rho_{HR}(x_{x_{ii}}, y_{y_{ii}}, R, B_{oc}, B, H_{mm}) \end{aligned}$$

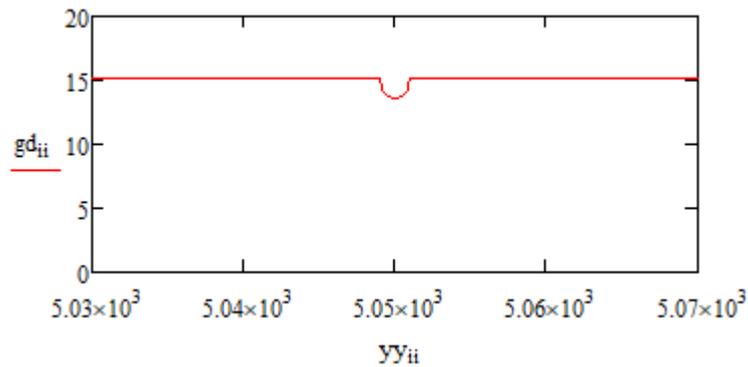


Рисунок 4 – Иллюстрация массовой толщины цистерны

$$\begin{aligned} St(A1, A2, B1, B2, aa, bb) &:= \begin{cases} MM \leftarrow \text{floor}\left(\frac{A2 - A1}{aa}\right) \\ NN \leftarrow \text{floor}\left(\frac{B2 - B1}{bb}\right) \\ Id0 \leftarrow \text{floor}\left(\frac{\Pi1(0)}{\Delta D}\right) \\ \eta \leftarrow 0.0000001 \\ \text{for } ix \in 1..MM + 1 \\ \quad xp_{ix} \leftarrow A1 + \frac{(A2 - A1) \cdot aa \cdot (ix - 1)}{MM} \\ \text{for } iy \in 1..NN + 1 \\ \quad yp_{iy} \leftarrow B1 + \frac{(B2 - B1) \cdot bb \cdot (iy - 1)}{NN} \\ \text{for } ix \in 1..MM + 1 \\ \quad \text{for } iy \in 1..NN + 1 \end{cases} \end{aligned}$$

```

ρρ ← ρHR(xpix, ypiy, R, Boc, B, Hmm)
Ic ← Π1(ρρ)
Nc ← max(1, NN1(ρρ))
ξ ← √(-2·ln(md(1)))·cos(2·π·md(1))
Id1 ← floor( (Ic·max(η, 1 + ξ/√Nc)) / ΔD )
Ydix, iy ← max(0, -ln( (Id1 + η) / Id0 ))
Ymin ← min(Yd)
Ymax ← max(Yd)
for ix ∈ 1..MM + 1
  for iy ∈ 1..NN + 1
    riy, ix ← 255 - floor( 255·(Ydix, iy - Ymin) / (Ymax - Ymin) )
rT

```

```

ik0 := floor(B/R) + 1 = 7
ik := 1..ik0

```

$$\begin{pmatrix} A1_{ik} \\ A2_{ik} \\ B1_{ik} \\ B2_{ik} \\ a_{ik} \\ b_{ik} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ A \\ Boc + R \cdot (ik - 1) \\ \min(B, Boc + R \cdot ik) \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

```
t1 := время(1)
```

```
fi1ik := concat("A1=", num2str(A1ik))   fi2ik := concat("A2=", num2str(A2ik))
```

```
fi3ik := concat("B1=", num2str(B1ik))   fi4ik := concat("B2=", num2str(B2ik))
```

```
fi5ik := concat("a,b=", num2str(aik), ", ", num2str(bik))
```

```

file = (
  "A1=0A2=4200B1=50B2=1550a,b=1,1.bmp"
  "A1=0A2=4200B1=1550B2=3050a,b=1,1.bmp"
  "A1=0A2=4200B1=3050B2=4550a,b=1,1.bmp"
  "A1=0A2=4200B1=4550B2=6050a,b=1,1.bmp"
  "A1=0A2=4200B1=6050B2=7550a,b=1,1.bmp"
  "A1=0A2=4200B1=7550B2=9050a,b=1,1.bmp"
  "A1=0A2=4200B1=9050B2=10100a,b=1,1.bmp"
)

```

$CI1_{ik} := St(A1_{ik}, A2_{ik}, B1_{ik}, B2_{ik}, a_{ik}, b_{ik})$

$WRITEBMP(file_{ik}) := CI1_{ik}$

$ci := augment(CI1_1, CI1_2, CI1_3, CI1_4, CI1_5, CI1_6, CI1_7)$

$WRITEBMP("1-1.bmp") := ci$

$t2 := время(2) - t1 = 10.879$