

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки: 21.04.01 «Нефтегазовое дело»  
 Отделение нефтегазового дела

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Система орбитального перемещения сканера кольцевых трубных швов на основе магнитных колес</b>

УДК 622.692.4.053:620.179.152.1

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ74	Курнашов Сергей Игоревич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Симанкин Ф.А.	к.т.н., доцент		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романюк В.Б.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина М.С.			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОНД ИШПР	Манабаев К.К.	к.ф.-м.н., доцент		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

<i>Код результата</i>	<i>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</i>	<i>Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон</i>
<b>В соответствии с универсальными, общепрофессиональными и профессиональными компетенциями</b>		
<b>Общие по направлению подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело»</b>		
P1	Применять базовые естественнонаучные, социально-экономические, правовые и специальные знания в области нефтегазового дела, для решения прикладных междисциплинарных задач и инженерных проблем, соответствующих профилю подготовки (в нефтегазовом секторе экономики), самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	УК-1, УК-2, УК-6, ОПК-1, ОПК-2, (ЕАС-4.2, АВЕТ-3А, АВЕТ-3i)
P2	Планировать и проводить аналитические и экспериментальные исследования с использованием новейших достижений науки и техники, уметь критически оценивать результаты и делать выводы, полученные в сложных и неопределённых условиях; использовать принципы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности	УК-2, УК-3, УК-4, УК-5, ОПК-2, ОПК-6
<i>в области производственно-технологической деятельности</i>		
P3	Проявлять профессиональную осведомленность о передовых знаниях и открытиях в области нефтегазовых технологий с учетом передового отечественного и зарубежного опыта; использовать инновационный подход при разработке новых идей и методов проектирования объектов нефтегазового комплекса для решения инженерных задач развития нефтегазовых технологий, модернизации и усовершенствования нефтегазового производства	УК-1, УК-2, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-5, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-6, ПК-7, ПК-8, ПК-9, ПК-10, ПК-11
P4	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные машины и механизмы для реализации технологических процессов нефтегазовой области, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда, выполнять требования по защите окружающей среды	ОПК-6, ПК-12, ПК-13, ПК-14, ПК-15
<i>в области экспериментально-исследовательской деятельности</i>		
P5	Быстро ориентироваться и выбирать оптимальные решения в многофакторных ситуациях, владеть методами и средствами математического моделирования технологических процессов и объектов	УК-3, УК-8, ОПК-3, ОПК-7, ПК-16, ПК-17, ПК-18, (ЕАС-4.2-h), (АВЕТ-3d)
<i>в области проектной деятельности</i>		
P6	Эффективно использовать любой имеющийся арсенал технических средств для максимального приближения к поставленным производственным целям при разработке и реализации проектов, проводить экономический анализ затрат, маркетинговые исследования, рассчитывать экономическую эффективность	УК-2, ОПК-1, ОПК-2, ОПК-7, ПК-19, ПК-20, ПК-21, ПК-22
<i>в области организационно-управленческой деятельности</i>		
P7	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя команды, умение формировать задания и оперативные планы всех видов деятельности, распределять обязанности членов команды, готовность нести ответственность за результаты работы	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-23, ПК-24, ПК-25, ПК-26

<i>Код результата</i>	<i>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</i>	<i>Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон</i>
<i>в области проектной деятельности</i>		
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности; активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию и защищать результаты инженерной деятельности	УК-2, ОПК-3, ОПК-5, ОПК-6, ПК-27, ПК-28, ПК-29, ПК-30, (АВЕТ-3с), (ЕАС-4.2-е)
<b>Профиль «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов»</b>		
P9	Планировать и организовывать работу по проведению планово-предупредительных ремонтов и технического обслуживания технологического оборудования	ОПК-5, ОПК-6, ПК-3, ПК-7, ПК-9, ПК-11, ПК-13, ПК-14, ПК-21, требования профессионального стандарта 19.003 «Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования», 19.029 «Специалист по эксплуатации газораспределительных станций», 19.0015 «Специалист по эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа»
P10	Планировать внедрение новой техники и передовых технологий, разрабатывать и реализовывать программы модернизации и технического перевооружения предприятия с целью повышения надежности, долговечности и эффективности работы технологического оборудования	ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-10, ПК-12, ПК-17, ПК-21, ПК-23, требования профессионального стандарта 19.003 «Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования», 19.029 «Специалист по эксплуатации газораспределительных станций», 19.0015 «Специалист по эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа»
P11	Организовывать проведение проверок технического состояния и экспертизы промышленной безопасности, проводить оценку эксплуатационной надежности технологического оборудования	ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-9, ПК-10, ПК-17, ПК-30, требования профессионального стандарта 19.003 «Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования», 19.029 «Специалист по эксплуатации газораспределительных станций», 19.0015 «Специалист по эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа»

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа природных ресурсов  
Направление подготовки: 21.04.01 «Нефтегазовое дело»  
Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ74	Курнашову Сергею Игоревичу

Тема работы:

<b>Система орбитального перемещения сканера кольцевых трубных швов на основе магнитных колес</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	04.02.2019, № 852/с

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

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p><b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т.д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т.д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является орбитально перемещающаяся каретка детекторного модуля самоходного дефектоскопа на основе магнитных колес для неразрушающего контроля кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов.</p>
--	--

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Создание модели магнитного колеса; оценка усилия прижатия магнитного колеса в зависимости от изменения различных геометрических параметров и количества магнитов в компоновке конструкции; оценка надежности элементов конструкции магнитного колеса с точки зрения динамического воздействия.
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Рисунки, таблицы

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Романюк В.Б.
Социальная ответственность	Черемискина М.С.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Техническая диагностика трубопроводов методами неразрушающего контроля	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Симанкин Ф.А.	к.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ74	Курнашов Сергей Игоревич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ74	Курнашову Сергею Игоревичу

Школа	ИШПР	Отделение школы (НОЦ)	ОНД
Уровень образования	Магистратура	Направление/профиль	21.04.01 «Нефтегазовое дело» / «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов»

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	1. Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску. 2. Стоимость электроэнергии – 5,8 руб. кВт·ч – для юр. лиц.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Согласно российскому законодательству по оплате труда: 30% премии на заработную плату; 1,3 – районный коэффициент для г. Томска.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Общая система налогообложения с учетом льгот для образовательных учреждений (27,1% отчисления на социальные нужды).

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	1. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования. 2. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований. 3. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	1. Расчет основной заработной платы исполнителей темы. 2. Расчет отчислений на социальные нужды. 3. Отчисление во внебюджетные фонды. 4. Расчет электроэнергии и прочих расходов. 5. Накладные ресурсы. 6. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.
3. Ресурсоэффективность	1. Определение интегрального показателя эффективности научного исследования. 2. Расчет показателей ресурсоэффективности.

## Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей, в том числе таблиц):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений.
2. Матрица SWOT.
3. Календарный график проведения НИ.
4. Бюджет проект.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	08.02.2019
--	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романюк В.Б.	к.э.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ74	Курнашов Сергей Игоревич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2БМ74	Курнашову Сергею Игоревичу

<b>Школа</b>	<b>ИШПР</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОНД</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	21.04.01 «Нефтегазовое дело» / «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов»

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p><i>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</li> <li>– опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</li> <li>– негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</li> <li>– чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</li> </ul>	<p><i>Рабочая зона – линейный участок магистрального нефте- или газопровода.</i></p> <p><i>Технологический процесс – неразрушающий контроль сварных соединений магистрального трубопровода рентгеновским методом, который подразумевает использование источника и приемника ионизирующего излучения, устанавливаемых с разных сторон объекта контроля.</i></p> <p><i>Оборудование – самоходный дефектоскоп.</i></p> <p><i>Вредные факторы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– токсичные и вредные вещества;</li> <li>– повышенный уровень шума;</li> <li>– отклонение показателей микроклимата в рабочей зоне;</li> <li>– недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– ионизирующее излучение.</li> </ul> <p><i>Опасные факторы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– движущиеся машины и механизмы;</li> <li>– поражение электрическим током;</li> <li>– оборудование и трубопроводы, работающие под давлением.</li> </ul> <p><i>Воздействие на окружающую среду:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– загрязнение атмосферы;</li> <li>– загрязнение литосферы;</li> <li>– загрязнение гидросферы;</li> <li>– воздействие на селитебную зону.</li> </ul> <p><i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– техногенная ЧС.</li> </ul>
<p><i>2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<p><i>ГОСТ 12.2.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. ГН 2.2.5.552-96. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.</i></p>



	<p>ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.</p> <p>ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.</p> <p>СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.</p> <p>СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение.</p> <p>ГОСТ 12.2.003-74. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.</p> <p>ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.</p> <p>ГОСТ 30852.19-2002. Электрооборудование взрывозащищенное.</p> <p>ОСТ 102-51-85. Контроль неразрушающий. Сварные соединения трубопроводов. Радиографический метод.</p>
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</li> </ul>	<p>Физико-химическая природа вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– токсичные и вредные вещества;</li> <li>– повышенный уровень шума;</li> <li>– отклонение показателей микроклимата в рабочей зоне;</li> <li>– недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– ионизирующее излучение.</li> </ul> <p>Действие факторов на организм человека:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– отравление исполнителей работ;</li> <li>– снижение остроты слуха;</li> <li>– изменение кровяного давления;</li> <li>– ухудшение зрения;</li> <li>– замедление скорости реакции.</li> </ul> <p>Средства коллективной защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– применение газоанализаторов для контроля загазованности;</li> <li>– применение принудительной вентиляции для снижения их концентрации в воздухе рабочей зоны;</li> <li>– применение эффективной звукоизоляции, кожухов.</li> </ul> <p>Средства индивидуальной защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– использование противогазов, респираторов, спецодежды, изолирующих костюмов, рукавиц, перчаток, очков, масок, наушников;</li> <li>– индивидуальный контроль за дозой внешнего облучения вести с помощью индивидуальных дозиметров.</li> </ul>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> </ul>	<p>Источники опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– подвижные части производственного оборудования;</li> <li>– электрический ток;</li> <li>– высокое давление транспортируемой</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</i></li> <li>– <i>пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</i></li> </ul>	<p><i>продукции.</i></p> <p><i>Средства коллективной защиты:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>применение защитного зануления, защитного заземления, защитного отключения;</i></li> <li>– <i>использование предупредительных плакатов и знаков безопасности;</i></li> <li>– <i>проведение инструктажей и обучения персонала безопасным методам работы с электроприборами.</i></li> </ul> <p><i>Средства индивидуальной защиты:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>спецодежда и обувь, перчатки, каска и т.д.;</i></li> <li>– <i>использование диэлектрических перчаток и бот, диэлектрических резиновых ковров, инструментов с изолированными ручками.</i></li> </ul>
<p><i>3. Охрана окружающей среды:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>защита селитебной зоны</i></li> <li>– <i>анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</i></li> <li>– <i>анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</i></li> <li>– <i>анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</i></li> <li>– <i>разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</i></li> </ul>	<p><i>Воздействие на атмосферу:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>выброс перекачиваемого углеводородного сырья и иных загрязняющих веществ в результате образования сквозных отверстий, свищей в теле трубопровода.</i></li> </ul> <p><i>Воздействие на гидросферу:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>в процессе идентификации дефектов по результатам диагностического обследования трубопроводов возможен выход скважинной продукции в грунтовые воды, либо водный объект, если авария произошла на подводном переходе.</i></li> </ul> <p><i>Воздействие на литосферу:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>отходы внутритрубных отложений (например, парафины, механические примеси, продукты коррозии и т.д.), образовавшихся в результате очистки.</i></li> </ul>
<p><i>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>перечень возможных ЧС на объекте;</i></li> <li>– <i>выбор наиболее типичной ЧС;</i></li> <li>– <i>разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</i></li> <li>– <i>разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</i></li> <li>– <i>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</i></li> </ul>	<p><i>При проведении технического диагностирования трубопроводов вероятными источниками возникновения чрезвычайных ситуаций являются:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>обнаруженные критические дефекты;</i></li> <li>– <i>действия специалиста, несоответствующие инструкции производства работ.</i></li> </ul> <p><i>Рассмотреть типичную ЧС и разработать мероприятия по ее предупреждению, повышению устойчивости объекта к данной ЧС, ликвидации последствий.</i></p>
<p><i>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</i></li> <li>– <i>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</i></li> </ul>	<p><i>Рассмотреть специальные правовые нормы трудового законодательства.</i></p> <p><i>Рассмотреть организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</i></p>

<b>Перечень графического материала:</b>	
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</i>	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	<b>08.02.2019</b>
---	-------------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина М.С.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ74	Курнашов Сергей Игоревич		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки: 21.04.01 «Нефтегазовое дело»  
 Отделение нефтегазового дела  
 Уровень образования: магистратура  
 Период выполнения: осенний/весенний семестр 2018/2019 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация
--------------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

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

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
11.02.2019	Введение	5
18.02.2019	Обзор литературы	10
04.03.2019	Техническая диагностика трубопроводов методами неразрушающего контроля	10
25.03.2019	Расчет и оценка усилия прижатия магнитных колес в программном комплексе ELCUT	20
15.04.2019	Испытание на ударную нагрузку каретки детекторного модуля на основе магнитных колес в SolidWorks	20
22.04.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
29.04.2019	Социальная ответственность	10
06.05.2019	Раздел, выполненный на иностранном языке	10
13.05.2019	Заключение	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Симанкин Ф.А.	к.т.н., доцент		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОНД ИШПР	Манабаев К.К.	к.ф.-м.н., доцент		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 162 с., 84 рис., 24 табл., 41 источник, 1 прил.

Ключевые слова: техническая диагностика, неразрушающий контроль, магистральный трубопровод, кольцевой сварной шов, орбитальное перемещение, самоходный дефектоскоп, каретка детекторного модуля, магнитное колесо, пондеромоторная сила, ударная нагрузка, напряженное деформированное состояние.

Объектом исследования является орбитально перемещающаяся каретка детекторного модуля самоходного дефектоскопа на основе магнитных колес для неразрушающего контроля кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов.

Цель работы – разработка рекомендаций по использованию метода фиксации подвижной платформы для транспортировки детектора ионизирующего излучения с помощью магнитных колес.

В процессе исследования проводились оценка усилия прижатия магнитного колеса в зависимости от изменения различных геометрических параметров и количества магнитов в компоновке конструкции и оценка надежности элементов конструкции магнитного колеса с точки зрения динамического воздействия.

В результате исследования, на основе магнитостатического расчета созданной модели магнитного колеса в ELCUT, были построены графики зависимости значения пондеромоторной силы от изменения различных геометрических параметров магнитного колеса и количества магнитов в компоновке. Согласно полученным графикам, предложена конструкция магнитного колеса, для которой было рассчитано значение пондеромоторной силы. Проведено испытание на ударную нагрузку разработанной 3D-модели каретки детекторного модуля, на основе магнитных колес предложенной конструкции, с последующим анализом напряженно-деформированного состояния в SolidWorks.

## Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

### Определения:

*Магистральные трубопроводы* – трубопроводы и отводы от них диаметром до 1420 мм включительно с избыточным давлением среды свыше 1,18 МПа (12 кгс/см<sup>2</sup>) до 15 МПа (153 кгс/см<sup>2</sup>), предназначенные для транспортирования углеводородов от места производства к месту потребления.

*Диагностирование (техническое диагностирование)* – определение технического состояния объекта. Задачами технического диагностирования являются: 1) контроль технического состояния; 2) поиск места и определение причин отказа (неисправности); 3) прогнозирование технического состояния.

*Объект диагностики* – изделие и (или) его составные части, подлежащие (подвергаемые) диагностированию (контролю).

*Техническое состояние объекта* – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

*Внутритрубно́е диагностирование* – вид технического диагностирования, состоящий из комплекса работ, обеспечивающих получение информации о дефектах, сварных швах, особенностях трубопровода и их местоположении, с использованием внутритрубных инспекционных приборов, в которых реализованы различные виды неразрушающего контроля, для выявления на основе этой информации наличия и характера дефектов.

*Внутритрубный инспекционный прибор* – устройство, перемещаемое внутри трубопровода потоком перекачиваемого продукта, снабженное средствами контроля и регистрации данных о дефектах и особенностях стенки трубопровода, сварных швов и их местоположении.

*Неразрушающий контроль* – контроль соответствия параметров технических устройств, материалов, изделий, деталей, узлов, сварных соединений требованиям нормативных документов, при котором не разрушается пригодность объекта контроля к применению и эксплуатации.

*Визуальный и измерительный контроль* – вид неразрушающего контроля, при котором первичная информация воспринимается органами зрения непосредственно или с использованием оптических приборов, не являющихся контрольно-измерительными (например, с помощью лупы), а измерения осуществляются средствами измерений геометрических величин.

*Капиллярный контроль* – метод неразрушающего контроля, использующий возможности проникновения специальных жидкостей в несплошности на поверхности объекта контроля в целях их обнаружения.

*Магнитопорошковый контроль* – метод неразрушающего контроля, использующий для выявления дефектов металлических изделий притяжение частиц магнитного порошка силами неоднородных магнитных полей, возникающих на поверхности изделия при наличии в нем поверхностных и подповерхностных дефектов.

*Радикационный контроль* – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе ионизирующего излучения после его взаимодействия с объектом контроля.

*Ультразвуковой контроль* – акустический метод неразрушающего контроля, использующий для обнаружения дефектов упругие волны ультразвукового диапазона, вводимые в изделие и отражающиеся от дефектов или рассеивающиеся в них.

*Напряженно-деформированное состояние* – совокупность напряжений и деформаций, возникающих при действии на материальное тело внешних нагрузок, температурных полей и других факторов.

*Допускаемое напряжение* – наибольшее напряжение, которое можно допустить в элементе конструкции при условии его безопасной, долговечной и надежной работы.

*Запас прочности* – отношение предельно допустимой теоретической нагрузки к той нагрузке, при которой возможна безопасная работа конструкции с учетом случайных перегрузок, непредвиденных дефектов и недостоверности исходных данных для теоретических расчетов.

**Сокращения:**

НК – неразрушающий контроль;

ВИК – визуально-измерительный контроль;

УЗ – ультразвук;

УЗК – ультразвуковой контроль;

МКЭ – метод конечных элементов.

**Нормативно-техническая документация:**

ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения.

ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.

ГОСТ 21105-87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.

ГОСТ 24034-80. Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения.

ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод.

ГОСТ 23764-79. Гамма-дефектоскопы. Общие технические условия.

ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.

ГОСТ Р 54907-2012. Техническое диагностирование. Основные положения.

ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.

РД 03-606-03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю.

РД 51-2-97. Инструкция по внутритрубной инспекции трубопроводных систем.

ГОСТ 12.2.003-74. ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.

ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

ГОСТ 12.1.003-2014. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.



ГОСТ 12.1.029-80. ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.

ГОСТ Р 12.1.019-2009. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.

СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение.

## Оглавление

Введение .....	19
1 Обзор литературы .....	21
2 Техническая диагностика трубопроводов методами неразрушающего контроля .....	30
2.1 Ультразвуковой метод .....	35
2.2 Радиационный метод .....	36
2.2.1 Схемы просвечивания .....	38
2.2.2 Рентгенографический кроулер .....	41
2.3 Системы орбитального перемещения для контроля кольцевых сварных швов .....	43
3 Расчет и оценка усилия прижатия магнитных колес в программном комплексе ELCUT ....	49
3.1 Постановка магнитостатической задачи в ELCUT .....	52
3.2 Построение геометрической модели .....	53
3.3 Задание необходимых свойств материалов и граничных условий .....	54
3.4 Генерация сетки конечных элементов .....	57
3.5 Решение задачи .....	59
3.5.1 Изменение толщины опорных дисков-магнитопроводов .....	61
3.5.2 Изменение толщины постоянного кольцевого магнита .....	63
3.5.3 Изменение диаметра постоянного кольцевого магнита .....	67
3.5.4 Изменение зазора между магнитом и трубопроводом .....	70
3.5.5 Компоновка магнитного колеса из нескольких постоянных кольцевых магнитов ..	73
4 Испытание на ударную нагрузку каретки детекторного модуля на основе магнитных колес в SolidWorks .....	80
4.1 Построение CAD-модели .....	81
4.2 Решение задачи в SolidWorks методом конечных элементов .....	90
4.3 Выбор свойств материала .....	94
4.4 Задание граничных условий и нагрузок .....	96
4.5 Создание сетки конечных элементов .....	99
4.6 Анализ результатов .....	101
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	106
6 Социальная ответственность .....	127
Заключение .....	141
Список используемых источников .....	143
Приложение А .....	147

## **Введение**

Строительство магистральных трубопроводов является динамически развивающейся отраслью. Протяженность ветки трубопровода может достигать нескольких тысяч километров, однако состоит она из отдельных отрезков труб небольшой длины, которые соединены посредством кольцевых сварных швов. Швы подлежат обязательному контролю качества. Также, обязательному контролю подлежат швы, полученные в ходе ремонтных работ на уже действующих трубопроводах.

Для обеспечения эксплуатационной надежности и эффективности магистральной системы трубопроводов производят техническое диагностирование с применением наземных методов неразрушающего контроля, внутритрубной дефектоскопии, мобильных роботов и иных методов. Техническое диагностирование позволяет выявить дефекты, определить срок безаварийной эксплуатации трубопроводов, остаточный ресурс безопасной работы системы в целом и дать объективную оценку фактического технического состояния.

Актуальность данной работы подтверждается тем, что она выполнялась в рамках договора с ПАО «Газпром» по созданию самоходного дефектоскопического комплекса для неразрушающего контроля кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов.

В рамках проекта должен был создаваться самоходный дефектоскопический комплекс, который состоит из рентгеновского излучателя (кроулера), передвигающегося внутри трубы, приемника ионизирующего излучения и устройства, перемещающего цифровую рентгеновскую панель на основе сцинтилляционного детектора. Устройство совершает движение по орбитальной траектории относительно объекта контроля – поперечного кольцевого сварного шва.

В ходе выполнения данного проекта, отрабатывались различные технологии фиксации каретки детекторного модуля на трубе, в частности, это

крепление устройства перемещения с помощью специального металлического пояса (бандажа). В этом случае каретка перемещается за счет прижатия роликов к торцевой поверхности удерживающего бандажа. Второй способ – перемещение осуществляется по трубе с помощью специальной тяговой разъемной быстрофиксирующейся цепи. Третий вариант – это фиксация каретки детекторного модуля при помощи магнитных колес.

Целью магистерской диссертации является разработка рекомендаций по использованию метода фиксации подвижной платформы для транспортировки детектора ионизирующего излучения с помощью магнитных колес.

Достижение поставленной цели осуществляется посредством решения следующих задач:

- 1) создание модели магнитного колеса;
- 2) оценка усилия прижатия магнитного колеса в зависимости от изменения различных геометрических параметров и количества магнитов в компоновке конструкции;
- 3) оценка надежности элементов конструкции магнитного колеса с точки зрения динамического воздействия.

## 1 Обзор литературы

На данный момент в трубной дефектоскопии существуют различные изобретения, которые в той или иной степени и в различных видах конструкций используют системы орбитального перемещения.

Разбор данных изобретений поможет проанализировать отрасль производства на наличие каких-либо слабых мест, которые могли бы быть исключены при помощи новой конструкции или благодаря особой компоновке составных элементов другого оборудования. Что в свою очередь явилось бы симбиозом уже существующих технических решений, который смог бы решить поставленные перед отраслью задачи.

Первым в качестве примера рассмотрим устройство сканирующего дефектоскопа с номером заявки RU2402760, в котором в качестве направляющего пояса используется трос, удерживающий тележку с дефектоскопом на поверхности контролируемой трубы, при помощи отжимного механизма. Сразу стоит отметить, что применение в качестве направляющего пояса трос является недостатком по той причине, что трос не обладает достаточной жесткостью и эластичен. Данный факт будет способствовать проскальзыванию навесного оборудования.

Также стоит отметить, что в качестве метода контроля в данном изобретении используется метод вихревых токов. Данный метод не отличается высокой производительностью, которая напрямую зависит от мощности вихревого преобразователя. Преобразователи с большой мощностью обладают, как правило, и большим весом, что создаст неудобства для контроля с использованием орбитальной системы перемещения. Глубина распознаваемых дефектов также невелика и составляет максимум порядка нескольких десятков миллиметров, в то время как такой метод как рентгенографический способен контролировать объекты толщиной до 500 мм.

Изобретение относится к области неразрушающего контроля и может быть использовано для обнаружения дефектов потери металла и

растрескиваний в стенках труб при проведении переизоляции трубопроводов.

Целью изобретения является создание диагностического устройства минимального веса, способного обеспечить автоматическую разметку на трубе краской мест с недопустимыми дефектами потери металла или растрескиваниями [1].

На рисунке 1 показана кинематическая схема устройства.

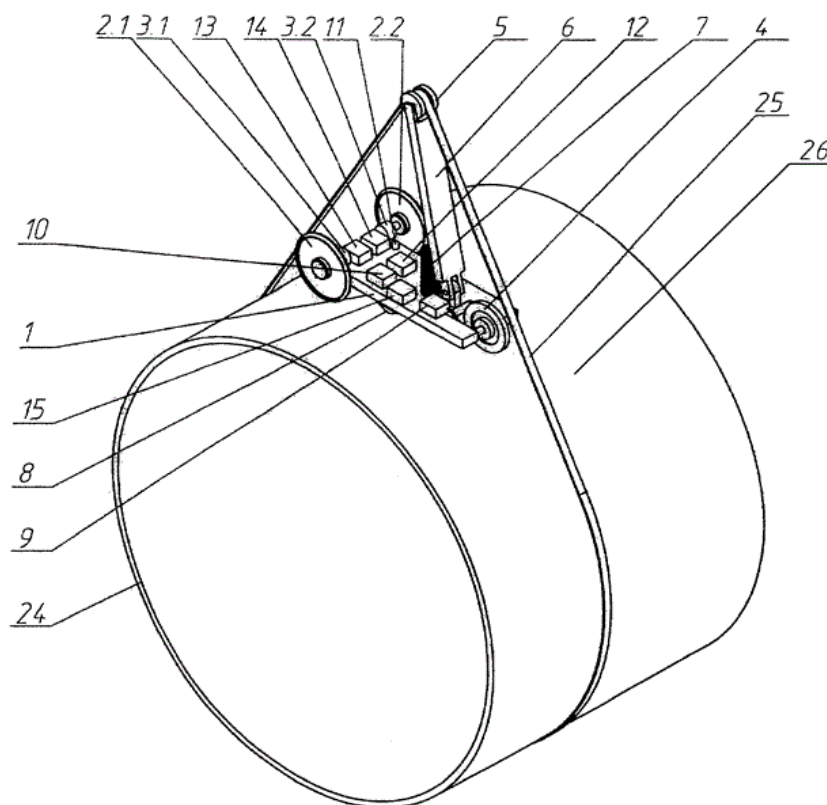


Рисунок 1 – Кинематическая схема сканирующего дефектоскопа

Устройство (рисунок 1) состоит: тележка с рамой 1 первого 2.1 и второго 2.2 ходовых колес, первого 3.1 и второго 3.2 мотор-редукторов, опорного колеса 4, ролика 5, отжимного рычага 6, пружины 7, группы вихретоковых датчиков 8, краскопульты 9, бортовой электронной аппаратуры 10, импульсного источника света 11, бортового аккумулятора 12, первого 13 и второго 14 контроллеров управления двигателем, трехкомпонентного датчика линейных ускорений 15, прижимного трос-пояса 25. Позицией 24 обозначена обследуемая труба [1].

Следующее для рассмотрения изобретение – это патент под номером RU151458. Представляет собой систему радиографического контроля сварных швов трубопроводов.

Техническим результатом заявляемой полезной модели являются простота конструкции и обслуживания системы, надежность контроля и хранения изображений сварных швов.

Указанный технический результат достигается тем, что в предлагаемую систему помимо перечисленных выше агрегатов (детектор, батарея питания, устройство беспроводного управления и передачи данных, защитный кожух) также входит портативный компьютер, установленный в одном корпусе с детектором и позволяющий хранить значительное количество изображений. Целесообразность такого решения заключается в следующем.

Детектор программируется оператором на начало работы и получение изображения в момент выхода излучения от источника на требуемый уровень мощности.

Источник излучения также программируется на работу в течение определенного времени, минимально необходимого для съемки. После запуска источника излучения оператор, до включения излучения, удаляется на безопасное расстояние от места контроля трубопровода, т.е. места работы источника излучения.

Существующие рентгеновские источники не приспособлены к такому режиму работы.

Длительность излучения выставляется на источнике заранее и через определенное время излучение автоматически выключается. Беспроводной связи для управления источником излучения как правило нет.

Таким образом, предлагаемая система:

- исключает необходимость избыточного по времени облучения объекта контроля и повышает надежность работы;
- ускоряет и упрощает работу оператора;

- увеличивает срок службы источника излучения и детектора;
- сокращает возможное вредное воздействие излучения на оператора.

На рисунке 2 представлена схема размещения системы на трубопроводе при беспроводном соединении компьютера одного из детекторов с компьютером оператора и проводном соединении с остальными детекторами. Система включает трубу с кольцевым швом 1, вдоль которого размещаются цифровые рентгеновские детекторы с автономными источниками питания 2, компьютер промежуточного хранения/накопления данных 3, размещенный в одном корпусе с одним из детекторов. Указанный компьютер 3 соединен беспроводной связью с компьютером оператора 4 и проводной связью с остальными детекторами. Источник рентгеновского излучения с блоком питания 5 и система позиционирования и перемещения 6 размещены внутри трубы.

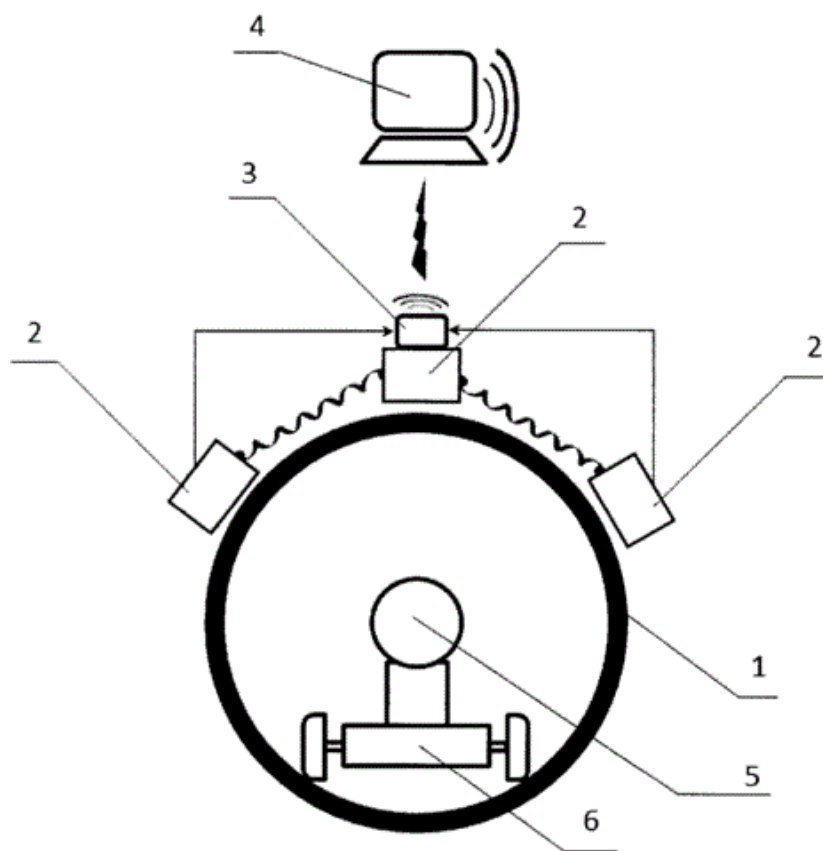


Рисунок 2 – Схема размещения системы



Стоит отметить в качестве примера успешного применения системы орбитального перемещения наружную сварочную систему комплекса автоматической сварки компании CRC-EVANS, которая представлена на рисунке 3.

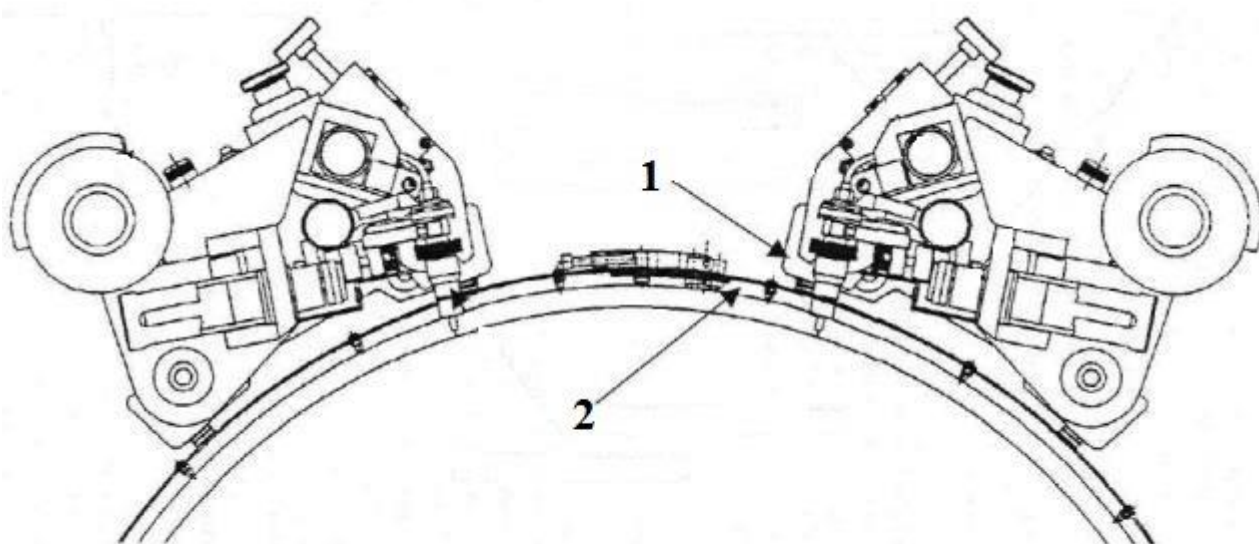


Рисунок 3 – Наружные сварочные головки CRC-EVANS:

1 – каретка со сварочной проволокой; 2 – направляющий пояс

Механический наружный сварочный аппарат перемещается по направляющему поясу из пружинной стали шириной 120 мм, охватывающему трубу по окружности. Пояс фиксируется на трубе после обработки новой кромки, перед началом сварки стыка. Обычно пояс размещается на расстоянии 95 мм от края трубы, а точность его установки по окружности обеспечивается специальным шаблоном [2].

Каждый сварочный аппарат включает в себя три компонента:

- каретку для перемещения по направляющему поясу;
- пульт управления;
- сварочную секцию.

Портативный комплекс цифровой радиографии «ТРАНСКАН» (рисунок 4) предназначен для рентгеновского контроля сварных швов при

прокладке и ремонте трубопроводов диаметром 500-1420 мм в трассовых условиях.

Перемещение детектора по трубе осуществляется за счет движения электродвигателя на прижимных роликах по металлическому направляющему поясу.

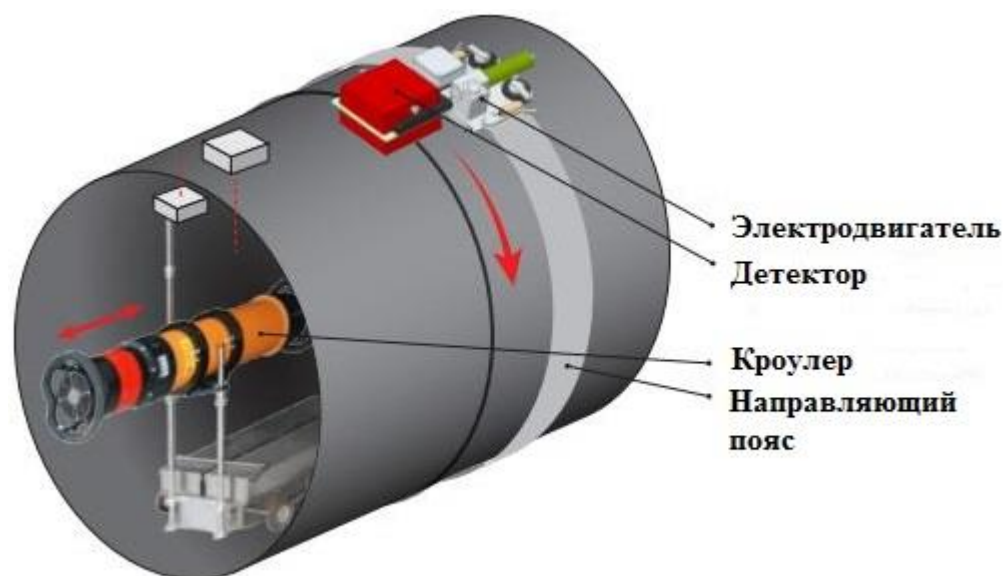


Рисунок 4 – Портативный комплекс цифровой радиографии «ТРАНСКАН»

Применение портативного комплекса цифровой радиографии «ТРАНСКАН» приводит к:

- снижению затрат на контроль за счет отсутствия расходных материалов в виде радиографической пленки и оборудования для ее проявки и хранения снимков;
- снижению времени проведения контроля за счет отсутствия «мокрой» технологии обработки пленки;
- снижению времени экспозиции и нагрузки рентгеновского излучения на персонал за счет применения цифровой радиографии;
- увеличению возможностей по контролю результатов за счет создания электронной базы хранения снимков.

Существует конструкторское решение, представляющее собой механизм, направляющим поясом которого является цепь. Подобные конструкции долгое время активно используются в системах плазменной резки труб. Достоинством

такого решения перед использованием металлического направляющего пояса, к примеру, как в системе «ТРАНСКАН», является универсальность цепи. В тех случаях, когда необходимо провести контроль поочередно труб с различным диаметром, приходится использовать набор направляющих поясов, каждый из которых предназначен для одного конкретного диаметра трубы. Использование цепного пояса, который можно добирать количеством звеньев до обхвата необходимого диаметра, способно решить данную проблему.

Приемник рентгенографического излучения располагается на специальной каретке, на ней же расположен электропривод. Электропривод через червячный редуктор передает вращающий момент на звездочку, контактирующую с цепью. Сила прижатия цепи контролируется за счет отжимного механизма действующего на звездочку.

В промышленном рентгеновском контроле цифровые технологии стали использоваться совсем недавно, однако, несмотря на очевидные преимущества цифровой радиометрии перед пленочной радиографией, на практике отказываться от «пленки» контролирующие организации не торопятся в силу хорошо отработанной методики и законодательной базы. Наряду с этим, широкомасштабное внедрение цифровой рентгеновской дефектоскопии актуально уже сегодня, так как это переход на новый качественный уровень за счет добавления новых технических возможностей, повышения производительности труда и безопасности рабочего персонала [7].

Установка РМУ-1 позволяет производить цифровой рентгеновский контроль сварных швов трубопроводов диаметром 158...700 мм методом фронтального просвета (через две стенки) с толщиной стенки до 20 мм (рисунок 5). Верхний предел по диаметру трубы и толщине стенки ограничен только включенным в систему источником рентгеновского излучения. Визуализация осуществляется сканированием в режиме старт-стоп сварного шва путем синхронного вращения вокруг оси трубы детектора и источника рентгеновского излучения при их фиксированном

взаимоположении друг напротив друга с помощью бандажа. РМУ-1 может использоваться в автономном режиме без внешнего источника питания с управлением по радиоканалу. Вес установки составляет 17 кг [7].



Рисунок 5 – Автоматизированная установка контроля кольцевых сварных соединений фронтальным методом «РМУ-1»

Установка бесплочной автоматизированной рентгенометрической системы «БАРС» предназначена для осуществления автоматизированного контроля труб из стали с ферромагнитными свойствами диаметром 158 мм и более в режимах панорамного просвечивания и фронтального просвечивания методом трех или более экспозиций (рисунок 6). В первом случае источник панорамного рентгеновского излучения с напряжением до 350 кВ устанавливается на самодвижущейся тележке типа кроулер внутри газотранспортной трубы. Во втором случае источник направленного рентгеновского излучения при фронтальном методе просвечивания крепится на наружной части трубы неподвижно. Блок детектора располагается на внешней поверхности трубы противоположно фокусу источника. В процессе сканирования стыка детектор автоматически перемещается снаружи вдоль траектории сварного шва в режиме старт-стоп на каретке с магнитными колесами, которые обеспечивают притягивающее усилие к трубе порядка 80 кгс. Вес установки составляет около 7 кг. Аккумуляторная батарея напряжением 25 В и емкостью 20 А/ч

обеспечивает непрерывную работу установки в течение суток. Аккумуляторная батарея, вес которой составляет также 7 кг, устанавливается в отдельный блок и питает установку «БАРС» посредством проводного соединения. В случае использования двух установок «БАРС» одновременно на трубах больших диаметров можно сократить время рентгеновского контроля [7].

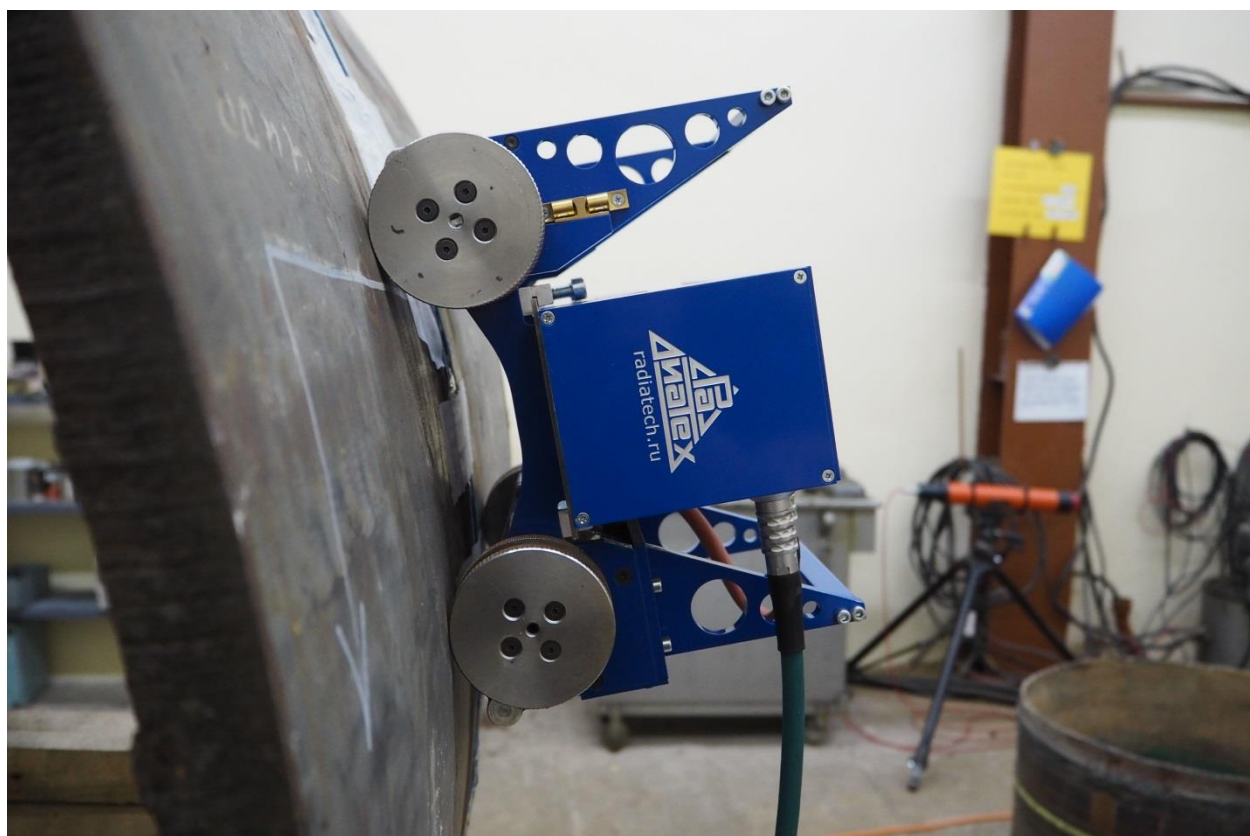


Рисунок 6 – Беспленочная автоматизированная рентгенометрическая система «БАРС»

## **2 Техническая диагностика трубопроводов методами неразрушающего контроля**

В условиях эксплуатации на протяжении длительного времени трубопроводы подвергаются различным внешним и внутренним воздействиям, в результате чего происходит деградация материала, коррозионные повреждения, возникают и развиваются трещины усталости на поверхностях труб и другие виды дефектов. Несмотря на то, что проектирование трубопроводов по современным кодам и технология изготовления и монтажа должны обеспечить реализацию назначенного ресурса, исключить возможность возникновения таких дефектов не удастся. Чтобы избежать серьезных последствий подрастания дефектов, проводят различные обследования, применяя методы неразрушающего контроля [3].

Наиболее универсальным методом неразрушающего контроля, который применяется практически всех этапах изготовления изделий, является визуальный и измерительный контроль (ВИК).

Визуально измерительный контроль объектов (заготовки, детали, полуфабрикаты) и сварных соединений производится на следующих стадиях:

- входного контроля;
- подготовки деталей и сборочных единиц к сборке;
- сборки деталей и сборочных единиц под сварку;
- процесса сварки;
- контроля готовых сварных соединений и наплавки;
- после ремонта;
- оценки состояния материала и сварных соединений в процессе

эксплуатации технических устройств и сооружений, в том числе по истечении установленного срока их эксплуатации [4].

В том случае, если к сварным соединениям предъявляются требования по непроницаемости для жидкости и газа, то говорят о надежности свариваемой конструкции, характеризующийся герметичностью. Названием нарушения

герметичности, при котором утечка вещества происходит через неплотности, служит определение течь.

Течь – это сквозной дефект в сварном соединении или структуре объекта, размер которого служит для выхода продукта наружу. Что касается сквозных дефектов, то они подразделяются на первичные и вторичные дефекты. Первичные, это дефекты, образованные при формировании сварного шва, к ним относятся свищи – сквозные поры, удлиненные по типу каналов, горячие трещины и непровары со шлаковыми включениями. Вторичные же дефекты – это те, которые появляются через какое-то время после сварки – усталостные и холодные трещины, или, к примеру, свищи, образовавшиеся под воздействием агрессивной среды или динамической нагрузки.

Методика течеискания основана на использовании пробного или контрольного вещества в качестве рабочего продукта, при помощи которого происходит выявление и регистрации течи.

Минимальный диаметр выявляемых каналов в миллиметрах определяем степень чувствительности метода.

Прохождение жидкости или газа через течи подчиняется законам гидростатики и гидродинамики. При этом следует учитывать вязкость и молекулярную массу контрольного (пробного) вещества, поскольку средние диаметры каналов течей весьма малы [5].

В качестве пробного вещества в различных методах применяют различные газы или жидкости. В качестве газов используют: воздух, азот, гелий, галоиды, аммиак, углекислый газ или смеси этих газов. Контрольными жидкостями являются: вода, керосин, растворы, пенетранты и другие.

Метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменения взаимодействия контролируемого объекта и электромагнитным полем называется магнитным. Для целей метода используется обширный спектр электромагнитных полей, от постоянного электрического и магнитного полей до переменных полей с частотой в десятки мегагерц.

При помощи данного метода определяют поверхностные и подповерхностные дефекты сварных соединений, к числу которых относятся несплошности на глубине до 10 мм – непровары, трещины, газовые поры, шлаковые включения.

Информацию о наличии дефектов получают посредством регистрации и анализа, магнитных полей рассеяния, возникающих над местами расположения дефектов.

Возможность применения магнитных методов контроля ферромагнитных материалов основана на их свойствах. В обычном состоянии в изделии из ферромагнитного материала как бы находятся расположенные различным образом самопроизвольно намагниченные области – домены, поля которых в этом случае компенсируют друг друга и результирующее магнитное поле изделия равно нулю. Под влиянием магнитного поля домены ориентируются в направлении этого поля, суммируются и деталь намагничивается. На рисунке 7 изображена петля гистерезиса, которая характеризует процесс намагничивания.

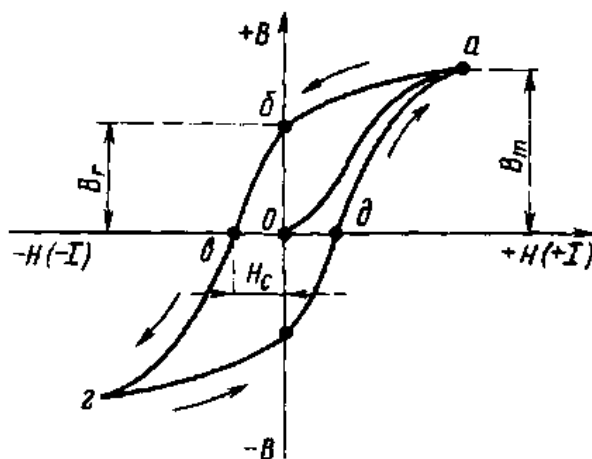


Рисунок 7 – Петля гистерезиса

Магнитный поток в теле ферромагнитного материала распространяется равномерно по сечению, в том случае если материал имеет сплошную структуру и его магнитная проницаемость постоянна.

Сплошность материала нарушается в тех местах, где локализуются дефекты. Сопротивление, оказываемое магнитному потоку со стороны среды с дефектами, во много раз больше, поэтому поток отклоняется и словно обтекает



дефект. В этом месте магнитное поле сгущается и частично выходит за пределы изделий, распространяется по воздуху, а затем входит обратно в изделие за дефектом. Данное явление изображено на рисунке 8. В тех местах, откуда выходит магнитный поток и куда он входит, образуются магнитные полюса, которые к тому же остаются и после снятия намагничивающего поля за счет остаточной намагниченности.

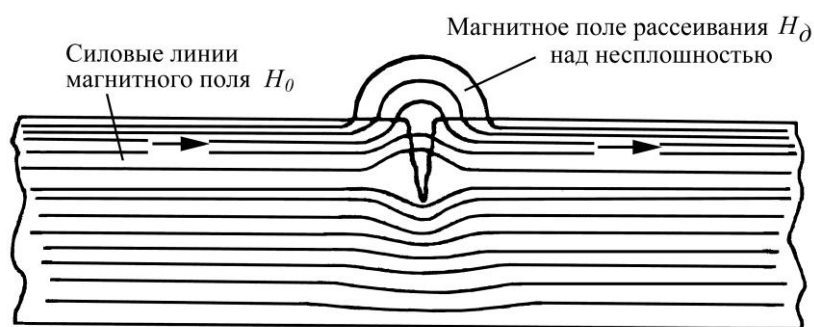


Рисунок 8 – Силовые линии в объекте с дефектом

Магнитное поле, возникающее над дефектом, называется полем рассеяния. Если дефект расположен перпендикулярно направлению магнитного потока, то эффект рассеяния проявляется максимально. Поэтому контролируемые сварные соединения намагничивают и в продольном, и в поперечном направления относительно оси шва. Такой подход позволяет выявить дефекты, расположенные как вдоль, так и поперек шва, а также расположенные под небольшим углом к нему.

Таким образом, контроль магнитными методами заключается в обнаружении полей рассеяния, образуемых дефектами, расшифровке характера и величины выявленных дефектов. Магнитные методы контроля классифицируются по регистрирующим способам, которых насчитывается более шести: магнитопорошковый, магнитографический, магнитоферрозондовый, индукционный и магнитополупроводниковый. Распространение в области неразрушающего контроля сварных соединений нашли наибольшее применение только два метода: магнитопорошковый, магнитографический.

Для выявления поверхностных дефектов вроде микротрещин и трещин применяют капиллярный метод контроля. Такие дефекты выходят на

поверхность изделия, к ним также относятся узкие непровары и мелкие поверхностные поры, которые сложно обнаружить во время внешнего осмотра.

В особенности данный метод неразрушающего контроля важен для выявления дефектов в ответственных сварных соединениях из жаропрочных, аустенитных нержавеющих и жаростойких сталей, алюминия, латуни, свойствами которых ограничены возможности использования других методов.

Поверхностные дефекты имеющие размеры микроскопического раскрытия и микроскопической протяженности (с соотношением не более 1:10) имеют свойства капилляров. В соответствии с этим, и метод, с помощью которого обнаруживают такие дефекты носит название капиллярный.

В основе капиллярного метода лежит способность индикаторной жидкости проникать в полость поверхностных и сквозных дефектов материала объектов контроля. После проникновения индикаторной жидкости получают индикаторные следы визуальным способом или при помощи преобразователей.

Метод служит для выявления поверхностных и сквозных несплошностей в объекте контроля, а также для возможности определения их протяженности, ориентации и расположения на поверхности (для дефектов типа трещин, имеющих протяженность).

При помощи изменения контрастностей фона и изображения поверхностных дефектов и происходит выявление дефектов. Для этого используются специальные светоконтрастные и цветоконтрастные индикаторные жидкости – пенетранты.

На предварительно очищенную поверхность от загрязнений наносят пенетрант, затем некоторое время выдерживают для того чтобы дать жидкости заполнить полость дефекта. Далее удаляется избыток индикаторной жидкости и наносится проявляющий состав. Жидкость, которая осталась внутри дефекта, образует, со временем, на фоне проявителя рисунок, по которому в свою очередь и судят о наличии дефекта. Основные этапы контроля капиллярным методом показаны на рисунке 9.

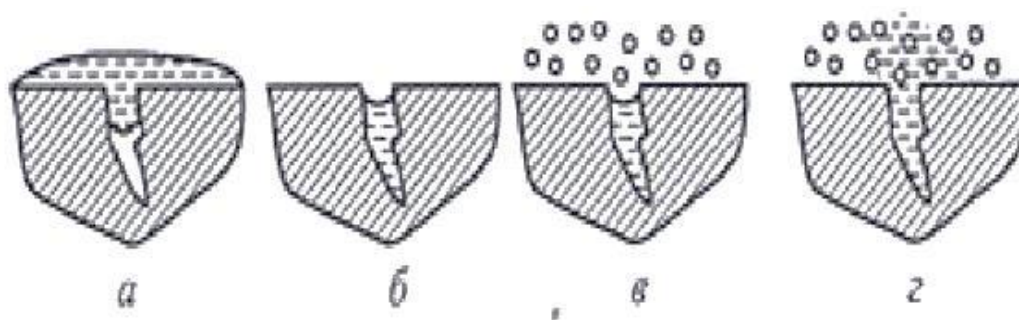


Рисунок 9 – Этапы капиллярного контроля:

*а* – наносится индикаторная жидкость; *б* – удаляются ее излишки; *в* – наносится проявляющий состав; *г* – образующиеся пятна свидетельствуют о дефектах

## 2.1 Ультразвуковой метод

Одним из наиболее широко распространенных методов выявления внутренних дефектов сварных швов является УЗК. Этот метод основан на возможности ультразвуковых волн проникать в материалы, отражаться и преломляться во время попадания на границу раздела двух материалов с различной звукопроницаемостью.

При помощи ультразвука можно обнаружить внутренние макроскопические дефекты литья, поковок, сварки (трещины, раковины, шлаковые включения, газовые поры, непровары и т.д.).

Ультразвук – это упругие механические колебания частиц среды, частота которых располагается за пределами слышимого диапазона, т.е. от 20 кГц до 500 МГц.

Ультразвуковые волны могут быть получены механическим, термическим, пьезоэлектрическим и другими методами. В ультразвуковой дефектоскопии металлов и сварных соединений чаще используется пьезоэлектрический способ получения ультразвука.

Некоторые природные кристаллы, например, кварц, турмалин, сегнетова соль и другие обладают пьезоэлектрическим эффектом. Сущность пьезоэлектрического эффекта состоит в том, что если из этих кристаллов определенным образом вырезать пластинку, то при сжатии или растяжении этой пластинки на ее поверхности появляется электрический заряд: на одной

стороне – положительный, на другой – отрицательный. Для равномерного распределения электрических зарядов по поверхности кристаллов их тщательно шлифуют, полируют и покрывают металлом.

Если на пьезопластину воздействуют упругие механические колебания (ультразвуковые волны), то на ее электродах возникает переменное электрическое напряжение с частотой действующих на нее ультразвуковых колебаний. Пьезоэффект обратим, т.е. если к пластине, вырезанной из кристалла, подвести переменное напряжение, то она начинает колебаться с частотой подводимого напряжения. Если частота подводимого напряжения выше 20 кГц, то пластинка, колеблясь, будет излучать УЗ волны, причем их направление перпендикулярно поверхности, к которой подводится напряжение. В первом случае это называют прямым, а во втором – обратным пьезоэффектом. Природные кристаллы в УЗ дефектоскопии из-за сложности обработки заменяются искусственными, которые изготавливаются методом прессования и спекания, чаще всего из порошка титаната бария или цирконат титанита свинца.

Ультразвук распространяется в однородной среде в виде направленной волны, которая при больших частотах подчиняется законам светового луча, т.е. она отражается, преломляется на границе разнородных сред, испытывает влияние интерференции и дифракции.

Волны отражаются от дефекта только в той случае, если их длина соизмерима с дефектом или больше. В противном случае УЗ-волны огибают небольшую несплошность без существенного отражения. Следовательно, увеличение чувствительности метода требует применения волн возможно меньшей длины.

## **2.2 Радиационный метод**

Радиационная дефектоскопия основана на просвечивании объектов ионизирующим излучением с последующей регистрацией и анализом прошедшего излучения различными детекторами.

В структурную схему радиационного контроля входят три основных элемента:

- источник ионизирующего излучения;
- контролируемый объект (сварное соединение);
- детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию.

Структурная схема радиационного контроля проиллюстрирована на рисунке 10.

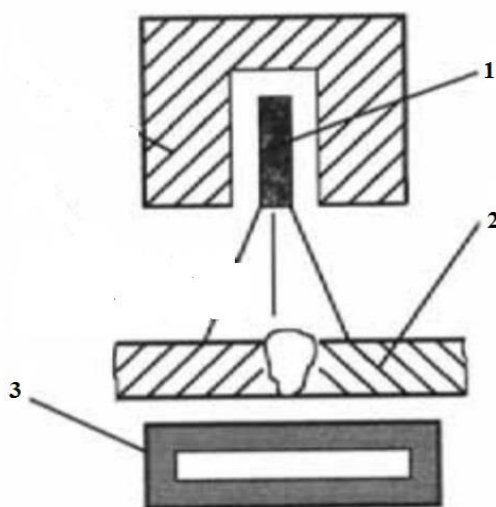


Рисунок 10 – Схема радиационного контроля:

1 – рентгеновский излучатель; 2 – объект контроля; 3 – детектор

Проходя через вещество изделия, ионизирующее излучение ослабевает, это связано с поглощением и рассеиванием излучения в материале объекта. То насколько ослабнет излучение, зависит от плотности и толщины объекта контроля, а также от энергии самого излучателя. Интенсивность излучения при прохождении его через газовую пору ослабляется меньше, т.к. толщина изделия в этом месте меньше. При прохождении излучения, например, через вольфрамовое включение, возникшее при аргонодуговой сварке, интенсивность его резко снижается. Другими словами, излучение, прошедшее за объект контроля несет в себе информацию о внутренней структуре просвеченного объекта, которая представлена в виде теневого радиационного изображения.

### 2.2.1 Схемы просвечивания

На рисунках 11-13 приведены основные схемы просвечивания сварных соединений (стыковых и угловых) нефтепроводов, технологических и вспомогательных трубопроводов. На рисунках используются следующие обозначения: *Ии* и *Пс* – источник излучения и принимающее устройство.

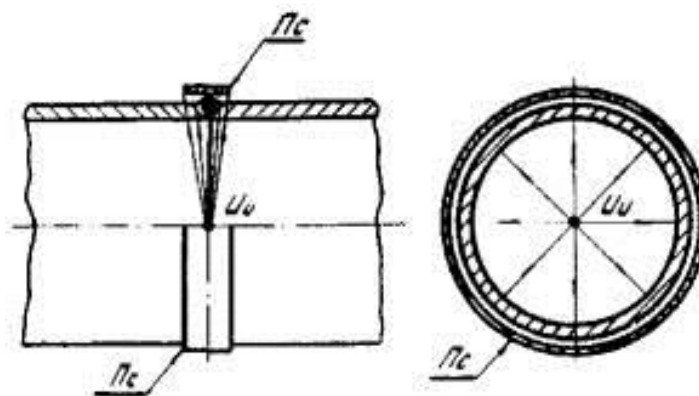


Рисунок 11 – Панорамная схема просвечивания

Кольцевые швы трубопроводов, переходов и трубных узлов (приварки тройников, отводов) просвечивают по одной из четырех схем в зависимости от геометрических размеров труб, типа и активности применяемого источника излучения [6].

Кольцевые сварные швы свариваемых изделий, в которых возможен свободный доступ внутрь, контролируют за одну установку излучения по схеме, представленной на рисунке 11 (панорамное просвечивание). В дальнейшем нас будет интересовать именно эта схема просвечивания, так как она более актуальна, для решаемых проблем отрасли, озвученных в данной дипломной работе.

Наиболее распространенной схемой панорамного просвечивания является установка внутри трубы источника излучения на подвижной платформе, называемой кроулером. Приемник излучения, при этом, устанавливается с внешней стороны трубы. Чаще всего, в качестве приемника выступает рентгеночувствительная пленка каким-либо способом закрепленная на объекте контроля.

Перспективным является использование в качестве приемника рентгеновского излучения сцинтилляторных детекторов, например, на базе кристаллов цезий-йода. Такие приемники построены аналогично матрице цифрового фотоаппарата и преобразуют теневое изображение объекта контроля в цифровую форму, более удобную для обработки и хранения.

Технические характеристики кроулера выбираются, исходя из следующих параметров:

- диаметр трубы;
- толщина стенки;
- чувствительности контроля;
- типа приемника ионизирующего излучения;
- источника ионизирующего излучения;
- темпов сооружения линейной части.

Сварные соединения трубопроводов, к которым по каким-либо причинам невозможен доступ с внутренней части, контролируется по схеме, представленной на рисунке 12 (фронтальное просвечивание). Просвечивание таких швов осуществляется через две стенки трубы за три и более установки источника ионизирующего излучения. При такой компоновке источник и приемник излучения располагаются на внешней стороне трубы в противофазе друг к другу. Излучатель настраивается таким образом, чтобы в фокус попадало теневое изображение противоположной стороны трубы и шва. Находящаяся перед излучателем часть шва размывается и на приемнике не регистрируется.

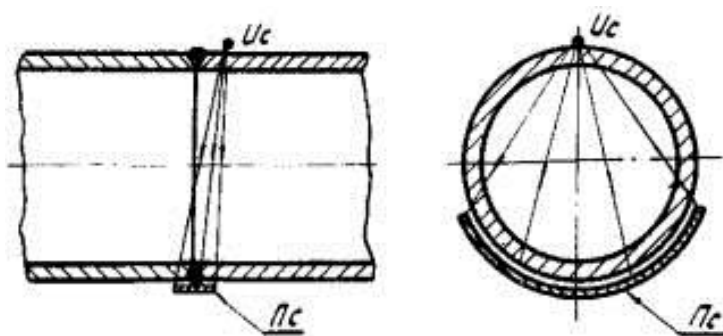


Рисунок 12 – Фронтальная схема просвечивания

Основные параметры просвечивания по схеме, представленной на рисунке 12:

- источник излучения располагается непосредственно на трубе;
- угол между направлением излучения и плоскостью сварного шва не должен превышать  $5^\circ$ ;
- фокусное расстояние должно равняться наружному диаметру трубы;
- минимальное количество экспозиций равно трём. При каждой экспозиции источник излучения следует смещать на угол не более  $120^\circ$ .

По схеме просвечивания «на эллипс» (рисунок 13) контроль проводят, как правило, за две установки, смещая источник излучения на  $90^\circ$ .

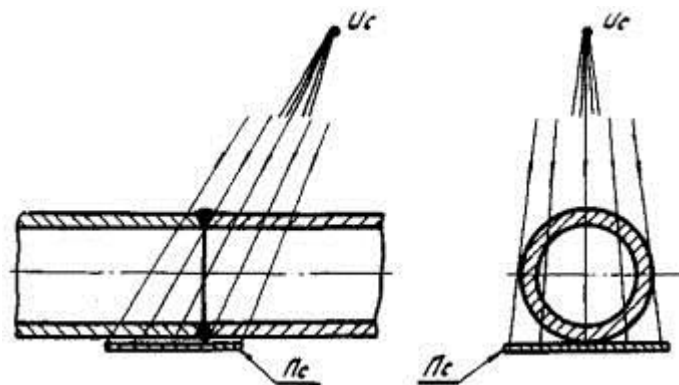


Рисунок 13 – Схема просвечивания «на эллипс»

Как правило, специальной подготовки поверхности сварного соединения перед проведением радиографического контроля не требуется. Однако, в тех случаях, когда неровности поверхности сварного шва, брызги металла могут повредить радиографическую пленку, эта поверхность должна быть зачищена.

После устранения дефектов сварного шва, выявленных по результатам предшествующего контроля, производят разметку сварного соединения. Сварной шов размечают на отдельные участки, задают начало и направление нумерации в определенной последовательности для каждого снимка [8].

На контролируемых участках должны быть установлены эталоны чувствительности так, чтобы на каждом снимке было полное изображение эталона. При панорамном просвечивании кольцевых сварных соединений



допускается устанавливать эталоны чувствительности по одному на каждую четверть окружности сварного соединения.

Для измерения глубины дефекта по его потемнению на радиографическом снимке методом визуального или инструментального сравнения с эталонными канавками или отверстиями используют канавочные эталоны чувствительности или имитаторы. При определении чувствительности контроля расчет необходимо вести по той толщине стенки трубы, на которую установлены эталоны чувствительности [11].

### **2.2.2 Рентгенографический кроулер**

Рентгенографический кроулер – это самоходный автоматический комплекс, используемый для контроля качества сварных соединений различных трубопроводов. Является полностью независимым экспонирующим устройством, которое не нуждается в проводной связи и способно принимать команды для перемещения, остановки и снятия рентгенограммы извне при помощи изотопного и магнитного устройств.

Принцип действия основан на преобразовании рентгеновского излучения, прошедшего через объект контроля, в цифровое изображение. Излучение, генерируемое рентгеновским аппаратом, воздействует на матрицу плоскопанельного детектора, который состоит из сцинтилляционного экрана и кремниевой фотодиодной матрицы. Под воздействием рентгеновского излучения сцинтилляционный экран начинает светиться. Световой поток попадает на кремниевую фотодиодную матрицу детектора, в которой осуществляется преобразование силы света в электрический ток, сигнал которого усиливается и преобразуется в цифровой код. В электронной схеме детектора формируется и передается на компьютер блока регистрации и управления цифровое изображение объекта контроля.

Как конструкция, рентгеновский кроулер представляет собой комплекс, получающий питание от батарей и состоящий из отдельных модулей, предназначенный для проведения контроля труб различных диаметров. Управление кроулером при помощи внешних управляющих устройств сведено

к минимуму благодаря возможной предварительной настройке, позволяющей приспособить кроулер для работы в любом трубопроводе.

Применение в современных устройствах микропроцессорной технологии, обеспечивает возможность высокой производительности, надежности и простоты работы с аппаратом. Размещение внутри трубы позволяет провести контроль кольцевого сварного шва за одну установку, в то время как, используя внешние аппараты, необходимо провести от двух и более, для больших диаметров труб, установок аппарата. Кроме того, используя кроулер нет необходимости переставлять рентгеновскую трубку на каждом сварочном шве, а качество полученного изображения повышается, т.к. просвечивается только одна стенка трубы.

На рисунке 14 схематично изображен чертеж кроулера, расположенного внутри трубопровода, поясняющий принцип его работы.

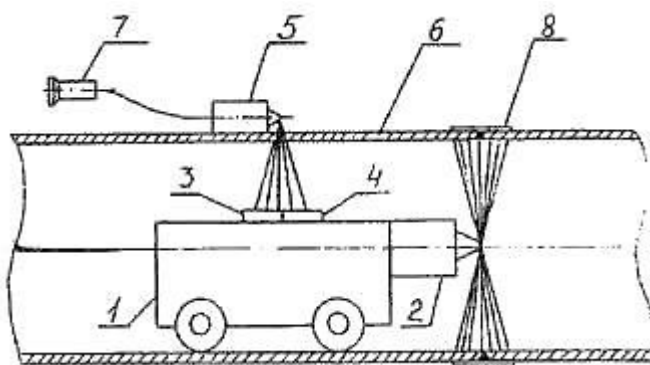


Рисунок 14 – Схема рентгеновского кроулера:

1 – самоходная тележка; 2 – панорамный аппарат; 3, 4 – ионизационные счетчики;  
5 – командный аппарат; 6 – труба; 7 – выносной пульт; 8 – детектор излучения

В качестве приемника проникающего излучения командного аппарата в кроулере используется два ионизирующих счетчика. Перед началом движения самоходной тележки, включается с помощью выносного пульта командный аппарат. Благодаря специальному коллиматору он имеет узконаправленную диаграмму излучения строго внутри трубы. При попадании излучения командного аппарата на детектор 3, кроулер замедляет свое движение, а при срабатывании детектора 4, он останавливается в положении, когда фокус

излучения панорамного аппарата находится на линии, перпендикулярной контролируемому шву трубы и рентгеновской пленке [14].

### **2.3 Системы орбитального перемещения для контроля кольцевых сварных швов**

Большим потенциалом развития обладают технологии с применением автоматизированных систем орбитального перемещения для контроля кольцевых сварных швов трубопроводов. Подобные технологии способны в значительной степени автоматизировать процесс, что позволит сократить затраты времени на проведение работ. Наряду с этим, внедряя в качестве приемника рентгеновского излучения, прошедшего через контролируемый объект, к примеру, методы цифровой радиографии или приемники, преобразующие радиационное излучение в электрические сигналы, можно опять же существенно ускорить процесс и добиться более удобных и современных методов документирования результатов исследования.

К основным параметрам, характеризующим работоспособность таких автоматизированных систем орбитального перемещения, относятся скорость контроля, напрямую зависящая от скорости передвижения детектора ионизирующего излучения по диагностируемому участку трубопровода; грузоподъемность и прижимная сила, необходимая для удержания каретки-детектора. Данное усилие обеспечивается способом крепления конструкции к поверхности трубы.

Уже существуют такого рода системы орбитального перемещения оборудования для рентгенографии, построенные на различных принципах. Известно оборудование компании «ТРАНСКАН», позволяющее перемещать излучатель и рентгенографическую панель по специальным поясам (бандажам), охватывающим трубу в районе исследуемого шва.



Рисунок 15 – Портативный комплекс цифровой радиографии «ТРАНСКАН»

Такие схемы компоновки являются энергоэффективными, поскольку значительно снижают трудо- и энерго-затраты при монтаже оборудования и позволяют эксплуатировать источники излучения в оптимальном режиме.

Использование пояса создает определенные сложности, так как, пояса обычно имеют определенную длину, соответствующую только одному типоразмеру трубы и для полноценного контроля необходимо иметь полный комплект поясов.

Существует конструкция механизма орбитального перемещения, реализованная на так называемых магнитных колесах.

В результате проведения патентного поиска, касательного магнитных колес, было обнаружено изобретение Клавдиева М.С. и Лунина А.И. «Магнитное колесо для перемещения по произвольно ориентированной в пространстве поверхности из ферромагнитного материала».

Изобретение относится к колесам транспортных средств, предназначенным для перемещения по произвольно ориентированной в пространстве поверхности из ферромагнитного материала.

Известно магнитное колесо, содержащее шайбообразный магнит, заключенный между двумя полюсными наконечниками, находящимися в контакте с опорной поверхностью (авторское свидетельство СССР № 656900, кл. В 60 В 15/26, 1976).

Недостаток колеса – большое сопротивление в зоне контакта с опорной поверхностью и незначительная сила сцепления.

Наиболее близким к изобретению является магнитное колесо для перемещения по произвольно ориентированной в пространстве поверхности из ферромагнитного материала, содержащее магниты с кольцеобразными полюсными наконечниками, установленные на оси колеса (патент США № 3960393, кл. 195-34, 1977 – прототип).

Недостатком известного колеса является низкая проходимость по поверхности переменной кривизны.

Цель изобретения – повышение проходимости по поверхности переменной кривизны.

Указанная цель достигается тем, что в магнитном колесе для перемещения по произвольно ориентированной в пространстве, поверхности из ферромагнитного материала, содержащем магниты с кольцеобразными полюсными наконечниками, установленные на оси колеса, между указанными магнитами и осью колеса по всей ее длине установлена упругая втулка, при этом полюсные наконечники, расположенные между смежными магнитами, выполнены из двух частей, связанных между собой с возможностью их относительного радиального перемещения посредством выступов и впадин, выполненных на их торцах.

Кроме того, смежные магниты установлены одноименными полюсами один навстречу другому.

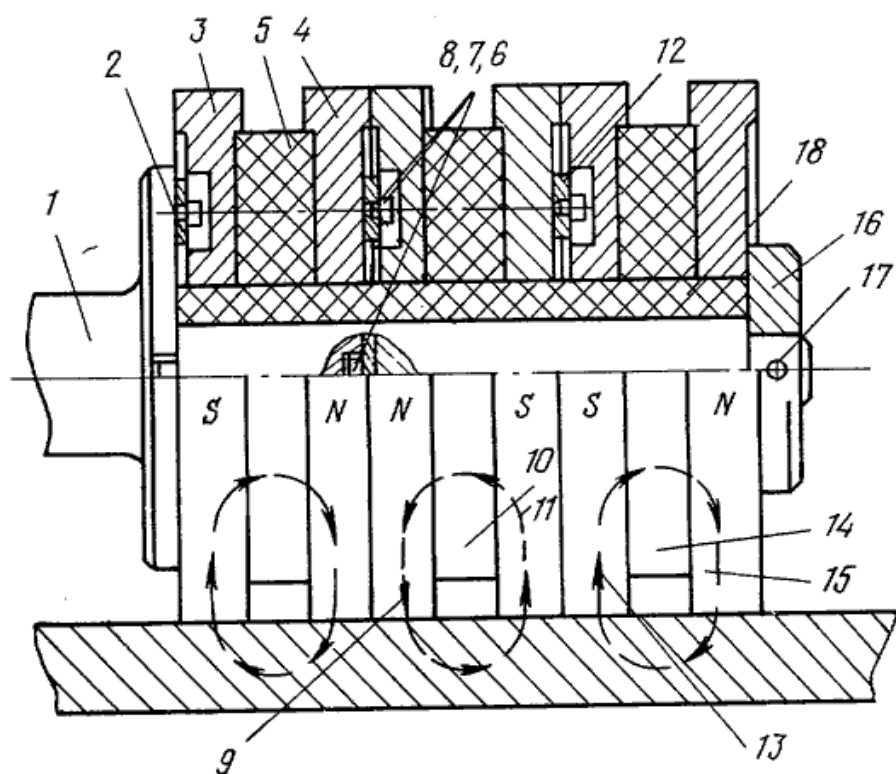


Рисунок 16 – Чертеж предложенного колеса в разрезе

Колесо содержит ось 1, крестовину 2, полюсные наконечники 3 и 4 и вклеенные между ними магнит 5, крестовину 6 с выступами 7 и 8, западающими в радиальные канавки смежных полюсных наконечников 4 и 9 для передачи крутящего момента, магнит 10, вклеенный между полюсными наконечниками 9 и 11, крестовину 12, передающую крутящий момент от полюсного наконечника 11 на полюсный наконечник 13, магнит 14, полюсный наконечник 15, ограничительную втулку 16, штифт 17 и упругую втулку 18 из микропористой резины для обеспечения радиального смещения магнитов и магнитопроводов.

Магнитная цепь замыкается через ферромагнитную поверхность (показана пунктиром со стрелками).

Колесо работает следующим образом: магнитный поток сцепления проходит через тело каждого из магнитов 5, 10 и 14, через прилежащие к ним полюсные наконечники 3 и 4, 9 и 11, 13 и 15 соответственно, а в зоне контакта полюсных наконечников с поверхностью перемещения замыкается в ферромагнитном материале поверхности.

При этом магнитный поток претерпевает поворот на  $90^\circ$  и пондеромоторная сила прижимает полюсные наконечники к опорной поверхности.

Благодаря упругой связи магнитов и полюсных наконечников с осью колеса, выполнению полюсных наконечников, расположенных между смежными магнитами, из двух частей с возможностью их относительного радиального перемещения и встречному расположению полюсов магнитов создается возможность их перемещения в радиальном направлении относительно оси колеса в соответствии с профилем поверхности, что улучшает адаптацию колеса и равномерность распределения нагрузки на элементы колеса.

Крутящий момент передается с помощью крестовин 2, 6 и 12, имеющих для этой цели выступы 8 и 7, западающие в радиальные канавки смежных полюсных наконечников.

Величина взаимных радиальных смещений полюсных наконечников определяется профилем пути и обеспечивается упругостью втулки 18, одновременно обеспечивается и мягкость хода.

Изобретение позволяет повысить грузоподъемность транспортных средств, уменьшить их габариты и использовать их в труднодоступных местах.

Описанная конструкция колеса позволяет создавать механизмы орбитального перемещения, не нуждающиеся в дополнительных опорных элементах (поясах, цепях, ремнях), поскольку, механизм опирается непосредственно на трубу. Единственным ограничением является использование таких механизмов на трубах из ферромагнитных материалов.

Подобная схема была реализована в механизме орбитального перемещения беспленочной автоматизированной рентгенометрической системы «БАРС» и оборудования компании «JME».



Рисунок 17 – Беспленочная автоматизированная рентгенометрическая система «БАРС»

Однако, такая схема используется для проведения ультразвукового контроля, оборудование для которого отличается меньшими массогабаритными характеристиками по сравнению с рентгеновскими излучателями.

Для оценки применимости такой технологии в рентгенографии была предпринята попытка моделирования магнитного сцепления колеса описанной конструкции с трубой с использованием программного обеспечения ELCUT.

Пользуясь возможностями программного продукта ELCUT можно оценить величину усилия прижатия опорных магнитных колес специальной конструкции к трубе, выполненной из ферромагнитного материала. Также полученные данные, можно использовать при проектировании механизмов орбитального перемещения оборудования для неразрушающего контроля кольцевых трубных швов с требуемыми массогабаритными характеристиками.



### **3 Расчет и оценка усилия прижатия магнитных колес в программном комплексе ELCUT**

ELCUT – это комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов.

Модули ELCUT позволяют проводить анализ физических полей и получать решение связанных multidisciplinary задач в таких видах анализа:

- магнитное поле переменных токов;
- магнитное поле постоянных токов и/или постоянных магнитов;
- нестационарное магнитное поле;
- электростатическое поле;
- электрическое поле постоянных токов;
- электрическое поле переменных токов;
- нестационарное электрическое поле;
- стационарное и нестационарное температурное поле;
- механические напряжения и упругие деформации.

Модуль «Магнитное поле переменных токов» предназначен для расчёта магнитного поля, возбуждаемого синусоидальным током заданной частоты с учётом вихревых токов (вытеснения тока и эффекта близости). Для этого модуля обеспечено также совместное решение полевой задачи с присоединённой электрической цепью. Используется для расчётов установок индукционного нагрева, трансформаторов, реакторов, электрических машин, исполнительных механизмов, задач ЭМС и электромагнитной экологии.

Модуль «Магнитостатика» предназначен для расчёта магнитного поля постоянных токов и/или постоянных магнитов с учётом насыщения ферромагнитных материалов. Примерами таких расчётов являются исполнительные механизмы, электрические машины, магнитные экраны, приборы с постоянными магнитами.

Модуль «Нестационарное магнитное поле» предназначен для расчёта переходных процессов в электромагнитных устройствах. Этот вид анализа может включать учёт совместного действия переменных (в т.ч. импульсных) нагрузок и постоянных магнитов, а также совместное решение полевой задачи с присоединенной электрической цепью. Используется для расчёта работы двигателей от преобразователей, анализа влияния импульсных нагрузок и перенапряжений, систем с подмагничиванием и т.д.

Модуль «Электростатика» предназначен для расчёта электростатического поля, вызванного приложенным потенциалом, объёмными, поверхностными и точечными зарядами. Используется для анализа электроизоляционных конструкций, экранов, электрической прочности изоляционных систем, ёмкости системы проводников, электромагнитной экологии.

Модуль «Электрическое поле постоянных токов» предназначен для расчета растекания постоянных токов в проводящих массивах. Используется для расчёта заземлителей, печатных плат, массивных шин, токов утечки изоляционных конструкций.

Модуль «Электрическое поле переменных токов» предназначен для расчёта электрических полей, вызванных переменными напряжениями, с учётом токов утечки. Используется для изоляционных конструкций, кабелей, кабельной арматуры, конденсаторов, высоковольтной изоляции.

Модуль «Нестационарное электрическое поле» предназначен для расчёта электрических полей, вызванных импульсными напряжениями. Учитывает нелинейные физические свойства диэлектриков. Применяется при расчёте сложных систем изоляции, варисторов, ограничителей перенапряжений, нелинейных экранов и т.п.

Модуль «Теплопередача» предназначен для расчёта переходного и установившегося температурного поля с учётом конвективного и радиационного теплообмена. Используется для анализа систем обогрева и систем охлаждения.

Модуль «Упругие деформации» может быть использован для расчёта механических напряжений в различных устройствах. Например, строительные конструкции, техника высокого давления, отдельные узлы механических систем.

Основные плюсы данного программного комплекса: удобный, интуитивно ясный пользовательский интерфейс, простота описания моделей, широкие аналитические возможности комплекса и высокая степень автоматизации всех операций. Традиционно считается, что полевые расчеты применяются в случаях, когда необходимо изучить локальные особенности проектируемой конструкции или уточнить существующие инженерные методики. Легкость ELCUT, степень автоматизации рабочих процедур и интуитивная ясность интерфейса дают возможность использовать пакет не только в исключительных ситуациях, но и в повседневных расчетных процедурах. Новая черта ELCUT – возможность обращения к его функциям из сторонних программ – позволяет объединять полевые расчеты с другими видами анализа, а также интегрировать ELCUT в комплекс программ САПР предприятия.

Интерактивный постпроцессор позволяет просмотреть результаты расчета в различных формах представления: линии поля, цветные карты, графики различных величин вдоль произвольных контуров и пр. Можно также вычислять различные интегральные величины на заданных линиях, поверхностях или объемах. Постпроцессор обеспечивает вывод таблиц и рисунков в файлы для дальнейшей обработки или качественной графической печати.

В программе ELCUT есть ряд ограничений. Большинство из них объясняются стремлением авторов создать простой и компактный инструмент компьютерного моделирования. Во-первых, используется один вид конечного элемента, треугольник (нет выбора между типами конечных элементов). Во-вторых, виды анализа задач механики и теплопередачи ограничены по функциональности и являются вспомогательными.

### 3.1 Постановка магнитостатической задачи в ELCUT

Конструкция магнитных колес, предложенная в качестве опор механизмов орбитального перемещения рентгенографического оборудования для неразрушающего контроля кольцевых трубных швов и описанная в предыдущей главе (рисунок 16), имеет следующий принцип действия: постоянный магнит кольцевой формы, намагниченный аксиально, расположен между двумя опорными дисками-магнитопроводами. Периферия магнита удалена от опорной поверхности (трубы), но магнитопроводы опираются на нее. Магнитный поток сцепления проходит через тело магнита и примыкающие к нему магнитопроводы. Поток замыкается в ферромагнитном материале трубы и пандеромоторная сила прижимает конструкцию к поверхности трубы.

Для решения поставленной задачи, связанной с оценкой величины усилия прижатия опорных магнитных колес специальной конструкции (рисунок 18) к трубе, выполненной из ферромагнитного материала, воспользуемся модулем магнитостатика, предназначенным для расчёта магнитного поля постоянных магнитов, программного комплекса ELCUT.

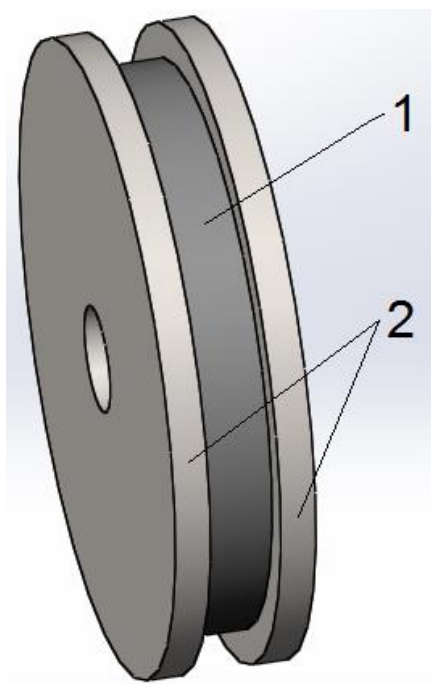


Рисунок 18 – Магнитное колесо: 1 – постоянный кольцевой магнит; 2 – опорные диски-магнитопроводы

Выполнение выбранного типа расчета включает в себя следующие этапы:

- геометрическое построение расчетной модели;
- задание необходимых свойств материалов и граничных условий;
- генерация сетки конечных элементов;
- решение задачи.

### 3.2 Построение геометрической модели

Для работы с геометрией расчетной области и ее конечно-элементной дискретизацией ELCUT включает в себя редактор геометрической модели. Несколько аскетичный набор инструментов редактирования тем не менее позволяет достаточно быстро нарисовать геометрическую модель, состоящую из прямолинейных ребер и дуг. Образующиеся при построении подобласти редактор отслеживает автоматически. Неодносвязные области, висячие вершины и ребра, резкие перепады размеров – все это корректно обрабатывается геометрическим редактором. Имеется функция перемещения и размножения фрагментов геометрической модели (подобласти, ребра, вершины) путем параллельного переноса, вращения, масштабирования или симметричного отображения.

Применяя возможности программного комплекса ELCUT, при помощи редактора геометрической модели, интерпретируем объемную модель используемой конструкции магнитного колеса (рисунок 18) в геометрическую модель на плоскости с указанными значениями размерных характеристик (рисунок 19).

Обозначение размеров на рисунке 19:

$D_M = 40$  мм – диаметр постоянного магнита кольцевой формы;

$D_d = 50$  мм – диаметр опорного диска-магнитопровода;

$s_M = 20$  мм – толщина постоянного магнита кольцевой формы;

$s_d = 5$  мм – толщина опорного диска-магнитопровода;

$s_T = 10$  мм – толщина стенки трубопровода;

$L_T = 40$  мм – длина участка трубопровода;

$h = 5$  мм – зазор между магнитом и участком трубопровода.

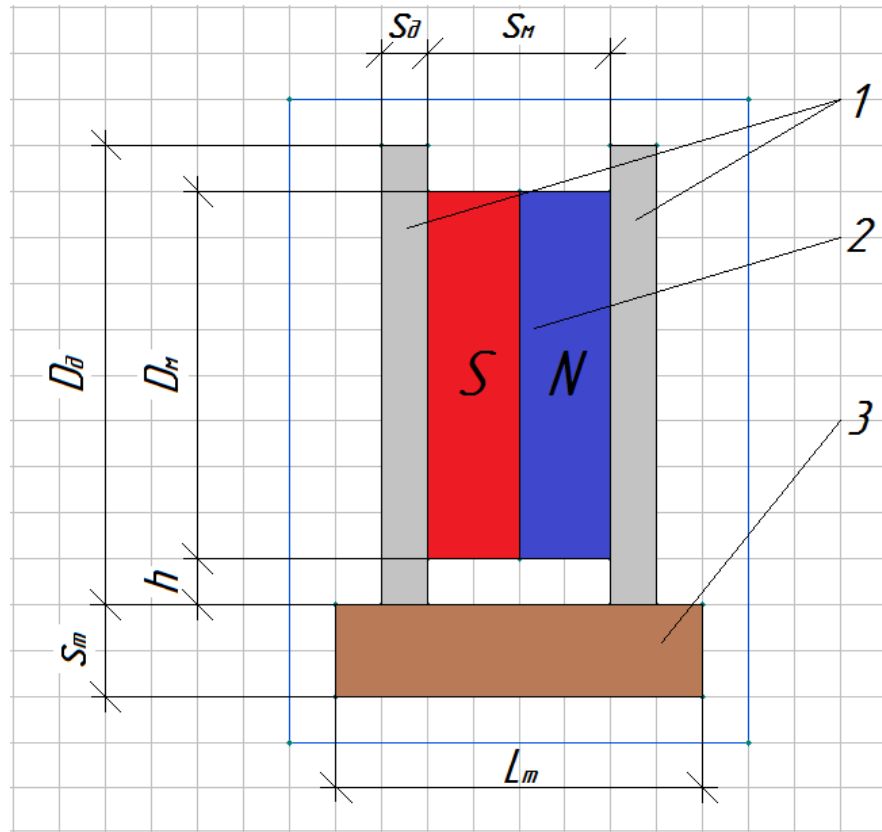


Рисунок 19 – Геометрическая модель магнитного колеса в ELCUT: 1 – опорные диски-магнитопроводы; 2 – постоянный кольцевой магнит; 3 – поверхность трубопровода

### 3.3 Задание необходимых свойств материалов и граничных условий

Свойства сред, источники и граничные условия задаются путем привязывания меток, имеющих соответствующие свойства, к геометрическим объектам.

При построении модели на внутренних и внешних границах области допустимы следующие виды граничных условий: заданный потенциал (условие Дирихле), заданная плотность потока (условие Неймана) и специальный вид условия Дирихле, при котором потенциал поверхности постоянен, но заранее неизвестен. В магнитной задаче такое условие моделирует сверхпроводник.

Условие Дирихле, задающее на части границы наперед известный векторный магнитный потенциал  $A_0$  в вершине или на ребре модели. Это граничное условие определяет поведение нормальной составляющей индукции на границе. Оно часто используется для задания нулевого значения, например,

на оси симметрии задачи или для указания полного затухания поля на удаленной от источников границе.

Чтобы исключить влияние границ расчетной области при моделировании физически неограниченной задачи, необходимо окружить магнитное колесо воздушным прямоугольником (относительная магнитная проницаемость воздуха  $\mu = 1$ ) и задать нулевое граничное условие Дирихле на его сторонах (магнитный потенциал  $A = A_0 = 0$ ).

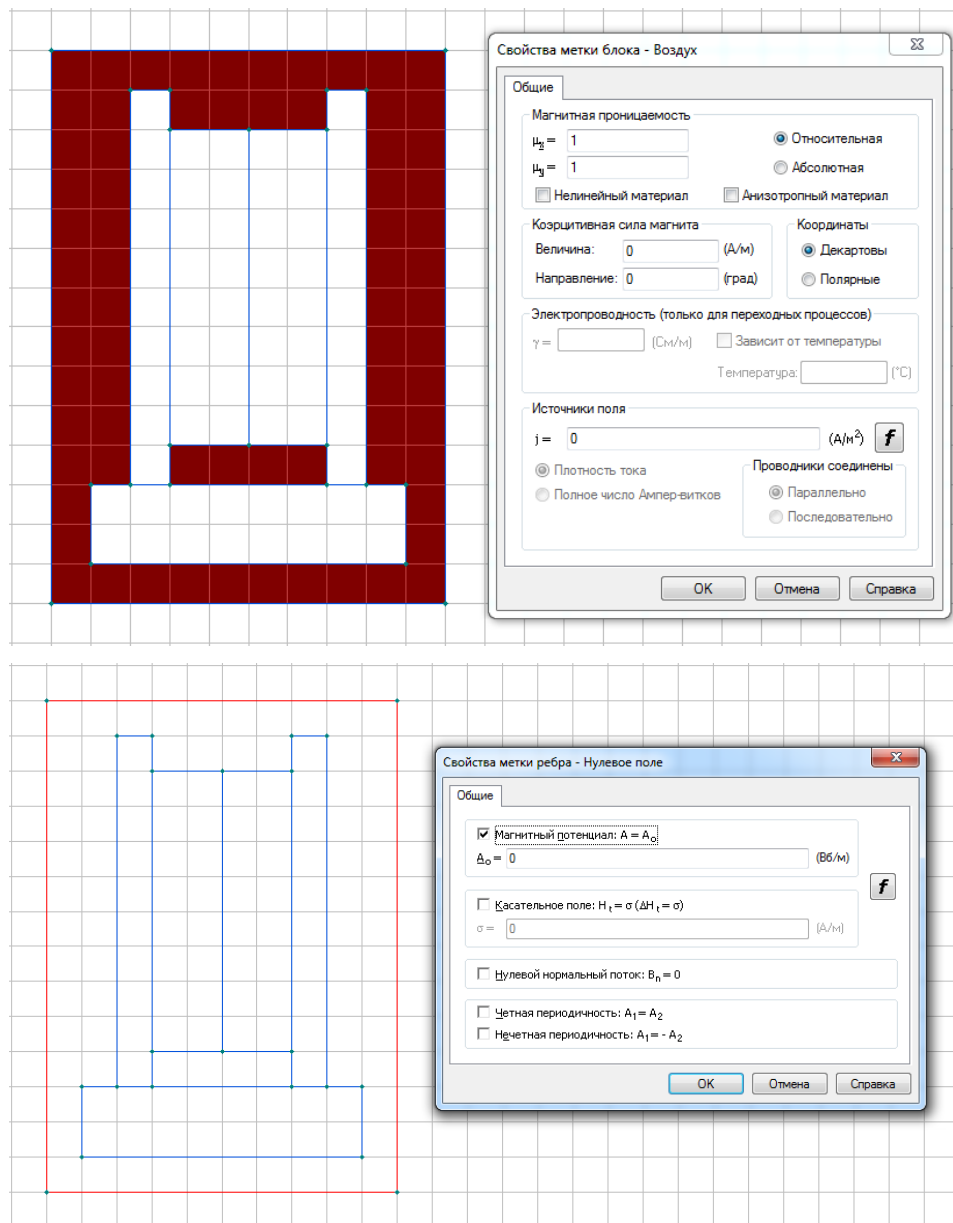


Рисунок 20 – Задание граничных условий

В задаче магнитостатики в свойствах метки блока магнита задаются магнитная проницаемость, коэрцитивная сила постоянного магнита и её направление (рисунок 21).

В качестве постоянного кольцевого магнита для конструкции колеса был выбран неодимовый магнит – мощный постоянный магнит, состоящий из сплава бора, железа и неодима. Последний элемент в составе сплава относится к редкоземельным, он выполняет функции главного звена в составе сплава. Бор в сплаве имеется в малых количествах, железо же является связующим элементом. Благодаря подобному составу магниты обладают невероятно большой мощностью притяжения и высокой стойкостью к размагничиванию. Марка магнита N42: коэрцитивная сила  $H_C = 955000$  А/м, остаточная магнитная индукция  $B_r = 1,28$  Тл. Относительная магнитная проницаемость магнита  $\mu = 1$ . Выбранный постоянный магнит имеет аксиальную намагниченность; коэрцитивная сила направлена вправо ( $0^\circ$ ), в сторону движения магнитного потока (потока линий магнитной индукции) – от северного полюса магнита к южному.

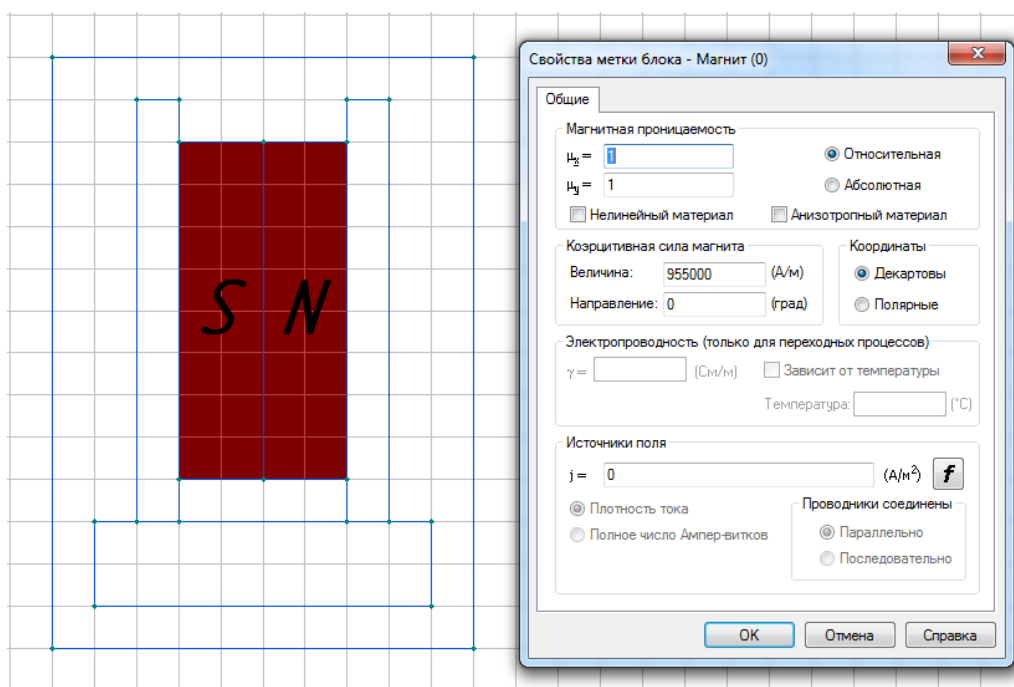


Рисунок 21 – Задание свойств постоянного магнита

Также для решения поставленной задачи необходимо задать относительную магнитную проницаемость материала  $\mu$  опорного диска-магнитопровода и участка трубы (сталь Ст3 и сталь 09Г2С соответственно). Для указанных материалов значение  $\mu = 1000$  (рисунок 22).



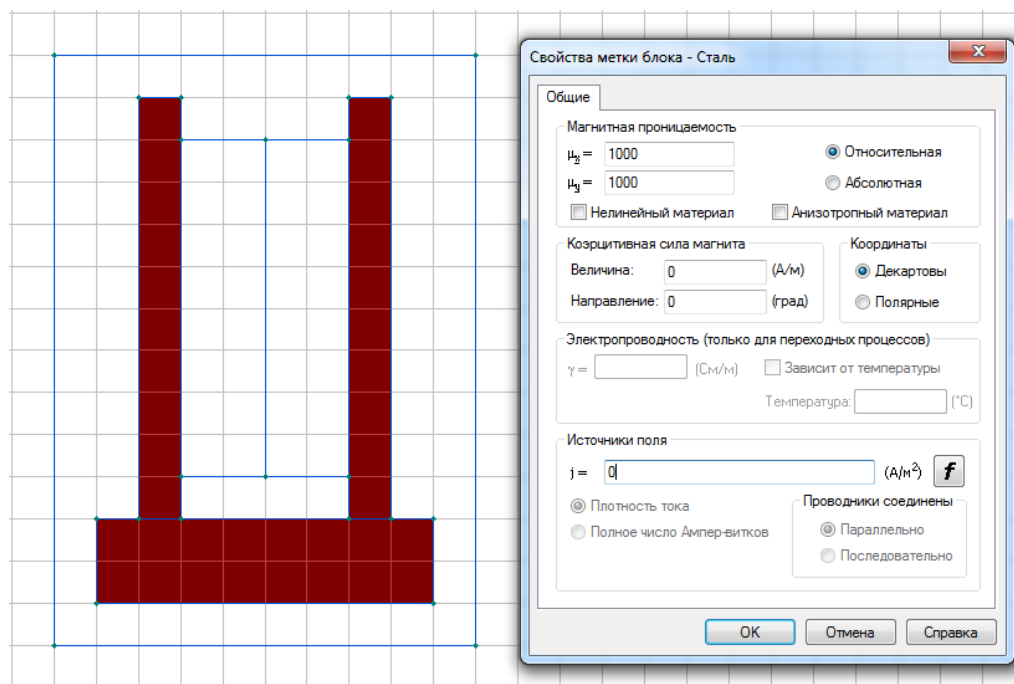


Рисунок 22 – Задание свойств опорного диска-магнитопровода и участка трубы

### 3.4 Генерация сетки конечных элементов

ELCUT работает с единственным типом конечного элемента – треугольником первого порядка. Количество треугольников может достигать двух и более миллионов, т.е. оно ограничено в основном ресурсами конкретного компьютера.

В простейшем случае построение сетки происходит полностью автоматически. Автомат генерирует сетку, оптимально отрабатывающую крупные и мелкие геометрические формы, руководствуясь критерием наибольшей плавности изменения размеров соседних треугольников.

Пользователь может управлять автоматической генерацией сетки путем расстановки ее шагов в произвольных вершинах геометрической модели. Увидев заданное значение шага в некоторой вершине, генератор сетки постарается построить вблизи нее треугольники со стороной, близкой к заданному размеру, позаботившись о плавном изменении среднего размера треугольников в отдалении от управляемой вершины. В модели с числом вершин  $N$  ручное значение шага можно указать в любом количестве вершин от нуля до  $N$ .

Построение сетки происходит в два этапа. Сначала ELCUT разрезает некоторые или все подобласти модели на более мелкие блоки. Этим достигаются две цели:

- во-первых, ликвидируются все имеющиеся неодносвязности и висящие вершины;
- во-вторых, область разрезается на блоки определенного размера, оптимального с точки зрения алгоритма решения разреженной системы линейных уравнений.

Таким образом, уже на этапе построения сетки конечных элементов начинают закладываться предпосылки для быстрого решения задачи. Алгоритм разрезания является оптимизационным процессом с целевой функцией и системой штрафов. Когда разрезание закончено, каждый из блоков обрабатывается триангулятором, который строит сетку треугольников с использованием фронтального алгоритма (стягивания текущей границы) с последующим итерационным улучшением. Процесс улучшения состоит в том, что каждая неграничная вершина смещается в центр тяжести своих соседей до тех пор, пока этот процесс не сойдется.

Основой алгоритмов работы с геометрической моделью является специально разработанная высокоэффективная блочная схема хранения модели, сочетающая компактность хранения с достаточным удобством манипулирования.

Полученную геометрическую модель магнитного колеса разбиваем на треугольную сетку конечных элементов с шагом дискретизации 5 мм (рисунок 23).

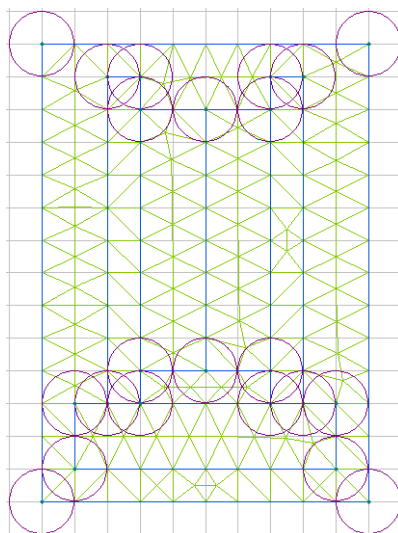


Рисунок 23 – Генерация сетки конечных элементов

### 3.5 Решение задачи

Для решения линейных задач используется итерационный метод сопряженных градиентов с предобуславливанием матрицы по методу декомпозиции области. Такой подход позволяет получить беспрецедентно высокую скорость решения при почти линейной зависимости необходимого количества итераций от количества узлов сетки. Критерием завершения итерационного процесса служит достижение заданной точности решения.

Для решения нелинейных задач ELCUT использует метод Ньютона-Рафсона, причем решение линейной задачи на каждой итерации этого метода осуществляется по изложенной ранее схеме. Ускорение процесса решения достигается за счет согласования необходимой точности решения линейной задачи с предварительной оценкой точности, которая может быть достигнута на данной итерации метода Ньютона-Рафсона.

Для решения нестационарных задач ELCUT использует метод Эйлера (с постоянным временным шагом) с нулевыми начальными условиями или с начальными условиями, экспортированными из другой задачи. Рекомендуется использовать не менее 15-20 временных шагов для всего переходного процесса, чтобы добиться лучшей точности и гладкости решения.

В результате решения поставленной задачи магнитостатики, связанной с оценкой величины усилия прижатия опорных магнитных колес специальной

конструкции к трубе, было получено изображение в виде конфигурации магнитных силовых линий и векторов магнитной индукции (рисунок 24).

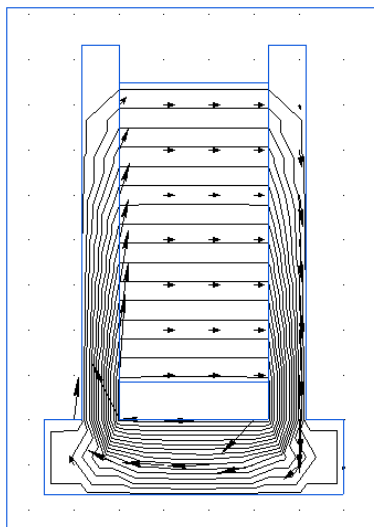


Рисунок 24 – Картина магнитных силовых линий и векторов магнитной индукции

Для определения пондеромоторной силы, характеризующей усилие прижатия магнитного колеса к трубе, используем интегральный калькулятор преждевременно выделив контур участка трубопровода (рисунок 25).

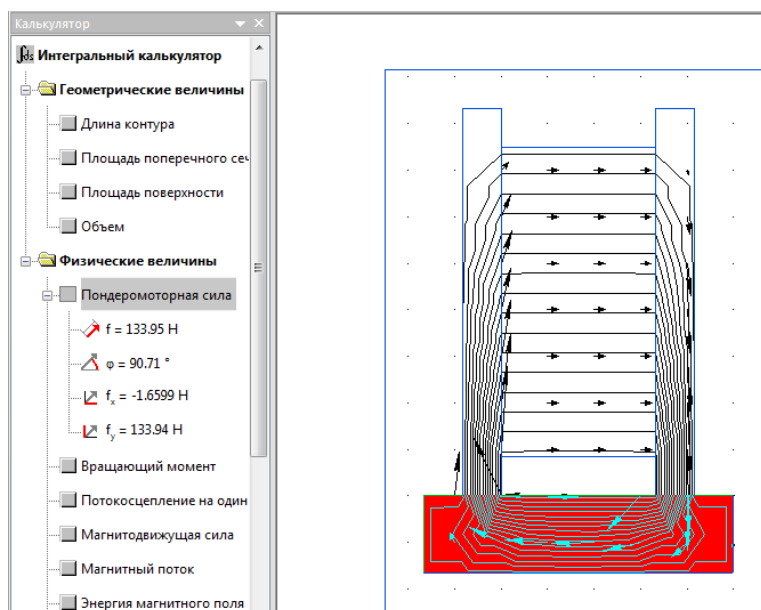


Рисунок 25 – Результат расчета пондеромоторной силы

Полученная пондеромоторная сила направлена под углом  $90^\circ$  и равна  $F = 133,95 \text{ Н}$ . В совокупности, применение в механизмах орбитального перемещения оборудования для неразрушающего контроля кольцевых трубных швов четырех опорных магнитных колес описанной конструкции с указанными

геометрическими параметрами позволит обеспечить силу притяжения к поверхности трубопровода порядка 52 кгс.

Для того чтобы обеспечить требуемые массо-габаритные характеристики, необходимо получить зависимости значения пондеромоторной силы от изменения различных геометрических параметров магнитных колес: изменения толщины опорных дисков-магнитопроводов; изменения толщины постоянного кольцевого магнита; изменения диаметра постоянного кольцевого магнита; изменения зазора между магнитом и трубопроводом. Также, оценить, как влияет увеличение магнитов (использование двух, трех, четырех постоянных кольцевых магнитов, аксиально намагниченных) в одной компоновке магнитного колеса на притягивающее усилие.

### 3.5.1 Изменение толщины опорных дисков-магнитопроводов

В качестве базовой расчетной модели магнитного колеса для определения зависимости пондеромоторной силы  $F$  от изменения толщины опорных дисков-магнитопроводов  $s_d$  была выбрана модель, рассчитанная выше (рисунок 19), со всеми указанными геометрическими параметрами. В данном случае, толщина  $s_d = 5$  мм. Пондеромоторная сила при этом в результате расчета получилась равной  $F = 133,95$  Н.

Используя готовую расчетную модель, повторно решаем дважды поставленную задачу, изменив значение толщины опорных дисков-магнитопроводов  $s_d$  сначала на 10 мм, а затем на 15 мм (рисунок 26).

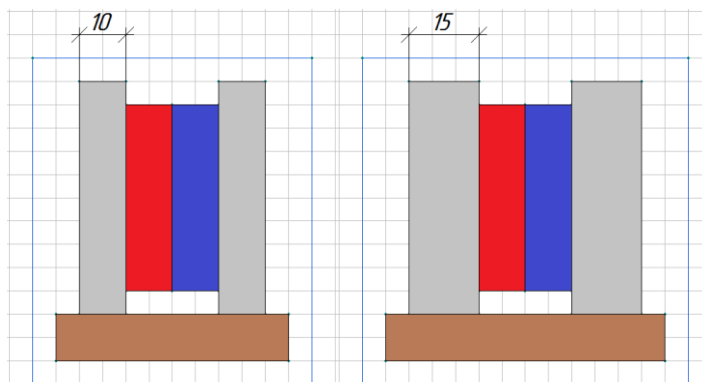


Рисунок 26 – Расчетные модели магнитных колес с измененным значением толщины опорных дисков-магнитопроводов

Результаты расчета пондеромоторной силы для обоих случаев приведены на рисунках 27 и 28 и представлены в таблице 1.

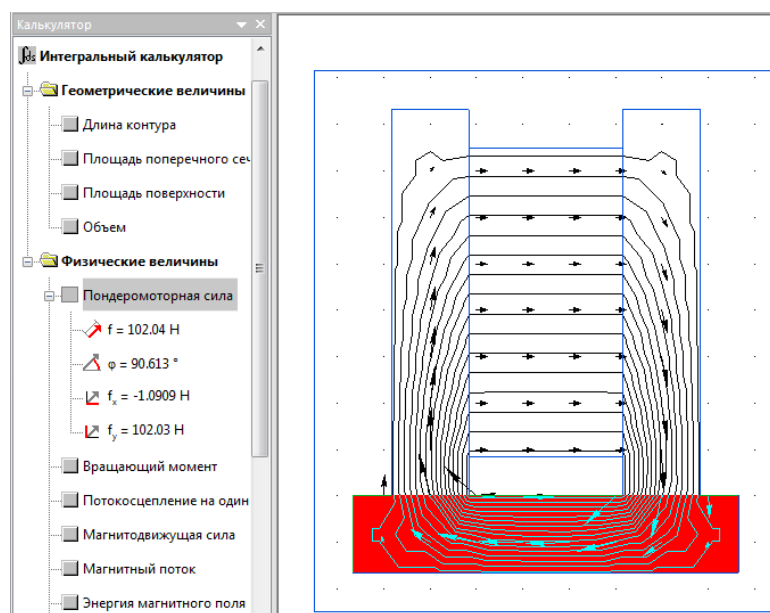


Рисунок 27 – Значение пондеромоторной силы при толщине  $s_d = 10$  мм

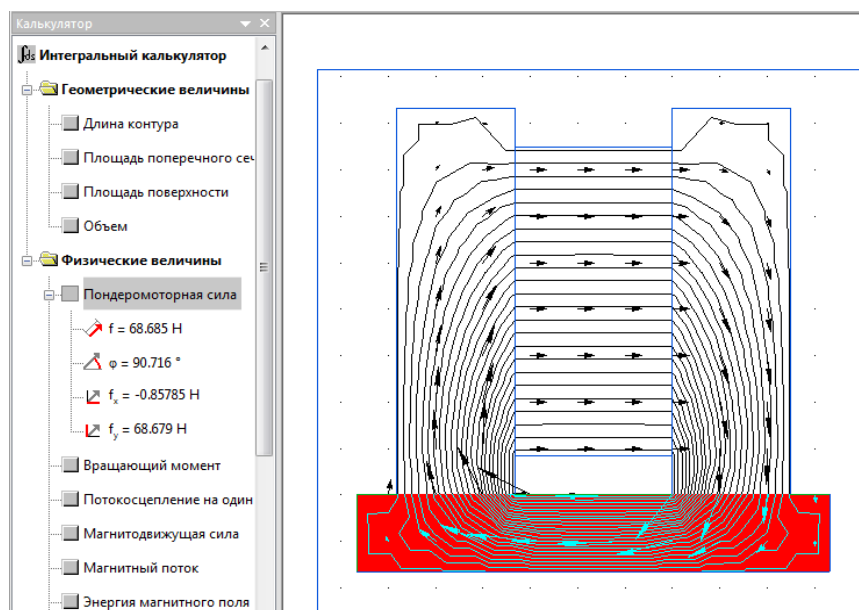


Рисунок 28 – Значение пондеромоторной силы при толщине  $s_d = 15$  мм

Таблица 1 – Значение пондеромоторной силы при изменении толщины магнитопроводов

Толщина магнитопроводов $s_d$ , мм	Пондеромоторная сила $F$ , Н
5	133,95
10	102,04
15	68,685

На основании полученной таблицы строим график зависимости пондеромоторной силы от толщины опорных дисков-магнитопроводов (рисунок 29).

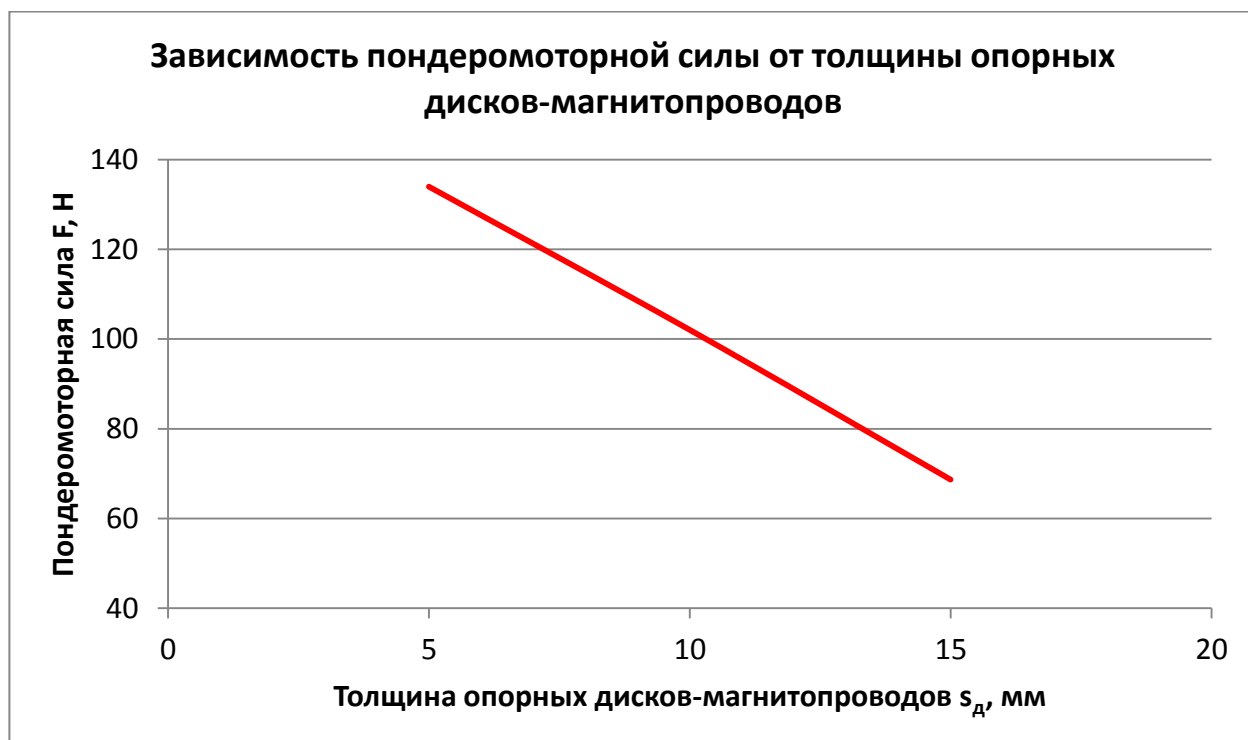


Рисунок 29 – Зависимость пондеромоторной силы от толщины опорных дисков-магнитопроводов

Зависимость пондеромоторной силы от толщины опорных дисков-магнитопроводов представляет собой график в виде стабильно убывающей прямой. Из полученного линейного графика зависимости видно, что повышение толщины опорных дисков-магнитопроводов приводит к равномерному уменьшению значения пондеромоторной силы.

Так при увеличении толщины магнитопроводов на 5 и 10 мм относительно базовой конструкции модели, усилие прижатия магнитного колеса к участку трубопровода снизилось на 24% и 49% соответственно.

### 3.5.2 Изменение толщины постоянного кольцевого магнита

Для того чтобы оценить влияние толщины постоянного магнита кольцевой формы  $s_m$  на численное значение возникающей пондеромоторной силы, необходимо получить зависимость между указанными параметрами, которая определяется при решении магнитостатической задачи описанной

модели магнитного колеса с заданными геометрическими характеристиками (рисунок 19) при различных значениях толщины магнита.

Толщина постоянного магнита кольцевой формы расчетной модели магнитного колеса, показанной на рисунке 19, равна  $s_M = 20$  мм. При этом, значение пондеромоторной силы составляет  $F = 133,95$  Н.

Используя описанную модель с заданными геометрическими характеристиками, повторно выполняем расчет поставленной задачи, изменяя толщину постоянного кольцевого магнита на 5, 10, 30 и 40 мм.

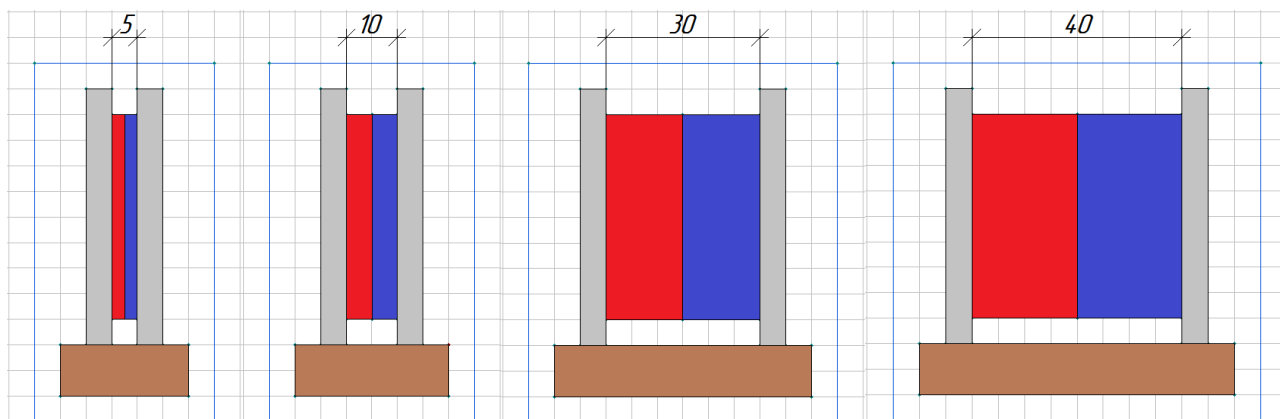


Рисунок 30 – Расчетные модели магнитных колес с измененным значением толщины постоянных магнитов кольцевой формы

Результаты расчета пондеромоторной силы приведены на рисунках 31, 32, 33, 34 и объединены в таблице 2.

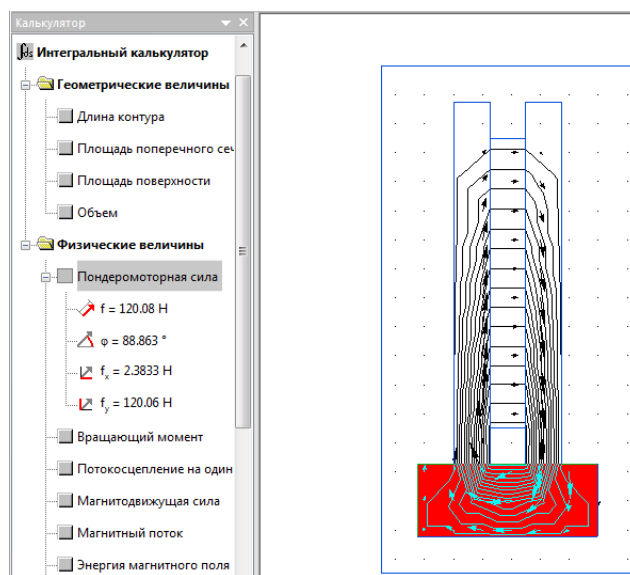


Рисунок 31 – Значение пондеромоторной силы при толщине  $s_M = 5$  мм



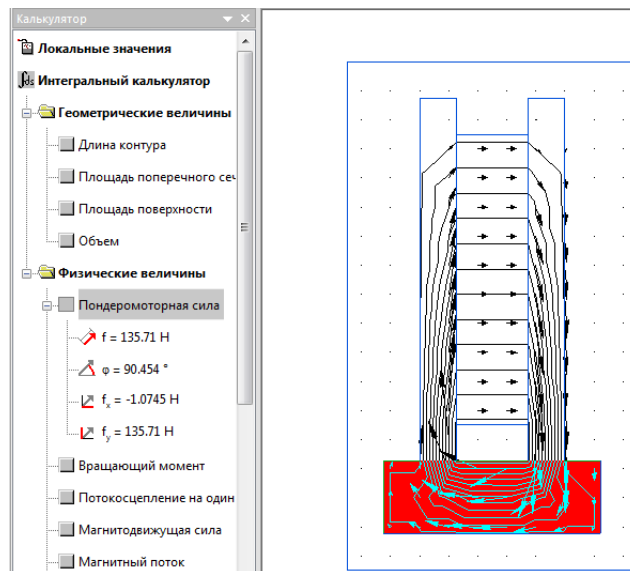


Рисунок 32 – Значение пондеромоторной силы при толщине  $s_m = 10$  мм

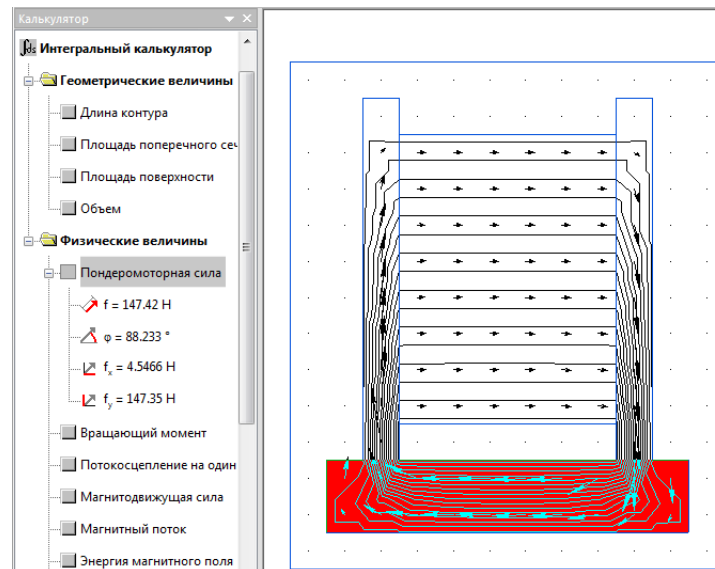


Рисунок 33 – Значение пондеромоторной силы при толщине  $s_m = 30$  мм

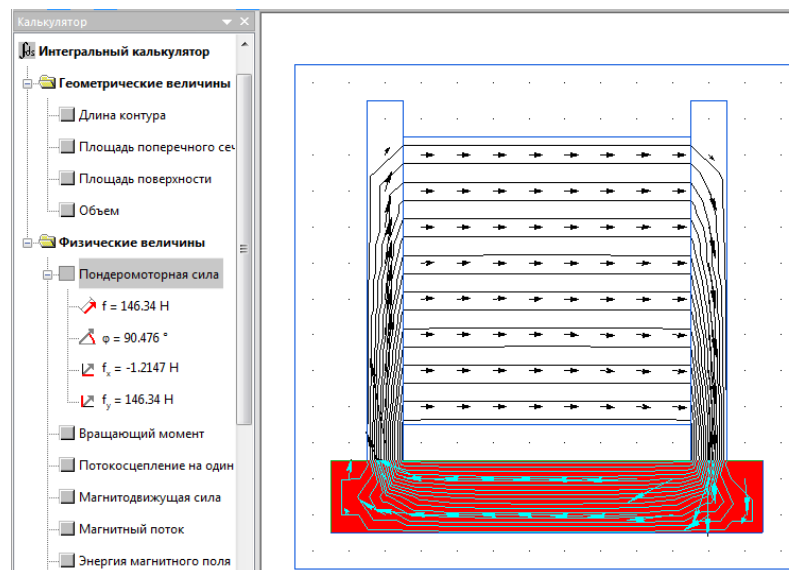


Рисунок 34 – Значение пондеромоторной силы при толщине  $s_m = 40$  мм

Таблица 2 – Значение пондеромоторной силы при изменении толщины магнита

Толщина магнита $s_m$ , мм	Пондеромоторная сила $F$ , Н
5	120,08
10	135,71
20	133,95
30	147,42
40	146,34

На основании полученной таблицы строим график зависимости пондеромоторной силы от толщины постоянного кольцевого магнита (рисунок 35).

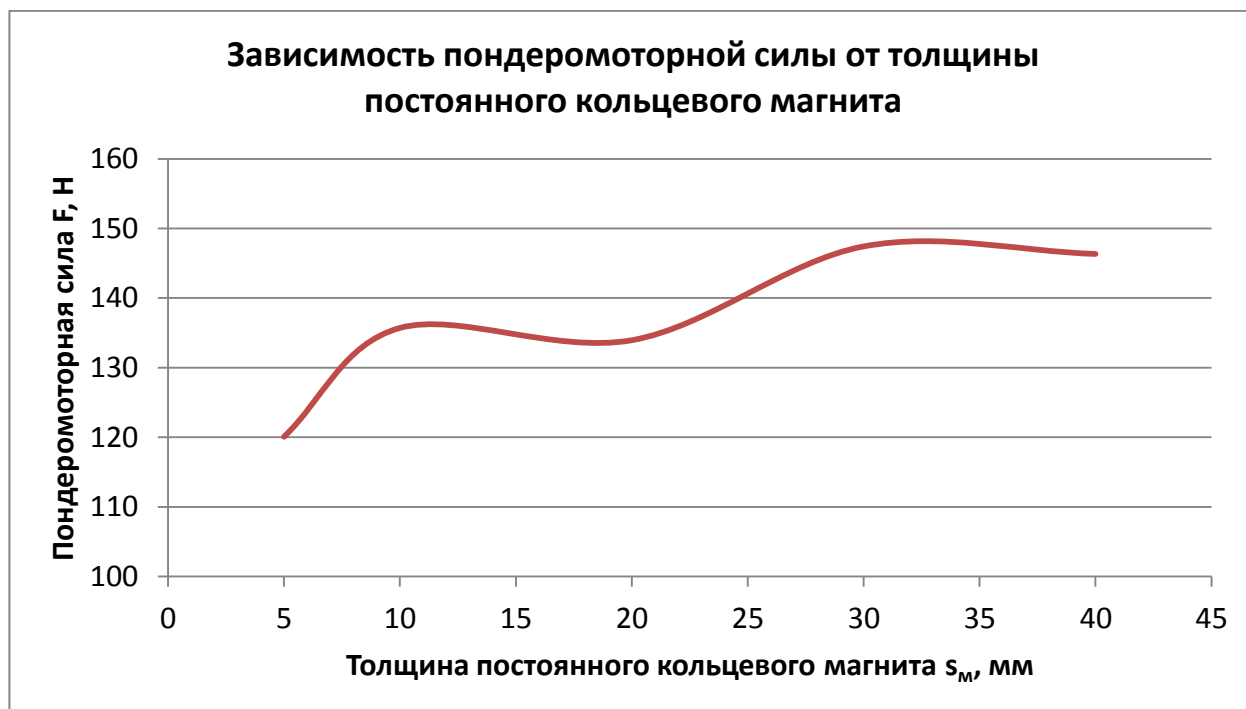


Рисунок 35 – Зависимость пондеромоторной силы от толщины постоянного кольцевого магнита

Построенный график зависимости пондеромоторной силы от толщины постоянного кольцевого магнита имеет вид возрастающей гладкой кривой линии с явно выраженными участками подъема и участками, где значение пондеромоторной силы практически остается постоянным с изменением толщины. Заметный скачок увеличения значения усилия прижатия магнитного колеса с 120 до 135 Н и с 133 до 147 Н наблюдается при изменении толщины постоянного кольцевого магнита с 5 до 10 мм и с 20 до 30 мм соответственно.

На отдельных участки графика при толщине от 10 до 20 мм и от 30 до 40 мм величина пондеромоторной силы изменяется незначительно.

Проведя общий анализ полученного графика зависимости, можно сделать вывод о том, что изменение толщины постоянного кольцевого магнита незначительно влияет на значение пондеромоторной силы. Так как при увеличении толщины в 8 раз с 5 до 40 мм, величина магнитной силы возросла меньше чем в 1,2 раза с 120 до 146 Н.

### 3.5.3 Изменение диаметра постоянного кольцевого магнита

Определение зависимости значения пондеромоторной силы  $F$ , действующей на магнитное колесо, от изменения диаметра постоянного магнита кольцевой формы  $D_m$ , сводится к решению задачи магнитостатики, описанной в пункте 3.1.

В качестве базовой используется расчетная модель магнитного колеса с заданными геометрическими параметрами (рисунок 19). В результате проведения расчета (рисунок 25), значение пондеромоторной силы при диаметре магнита  $D_m = 40$  мм получилось равным  $F = 133,95$  Н.

Для определения зависимости используем четыре магнитных колеса с диаметром постоянного кольцевого магнита равным 30, 40, 50, 60 мм. Толщина магнита, толщина опорных дисков-магнитопроводов, зазор между магнитом и участком трубы остается неизменным. Расчетные модели магнитных колес с разным диаметром магнита приведены на рисунке 36.

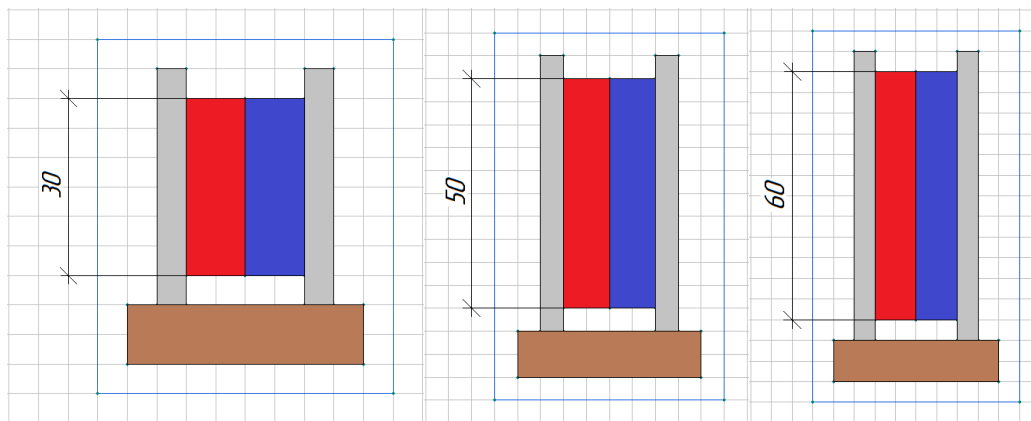


Рисунок 36 – Расчетные модели магнитных колес с измененным значением диаметра постоянных магнитов кольцевой формы

Результаты расчета пондеромоторной силы приведены на рисунках 37, 38, 39 и оформлены в таблице 3.

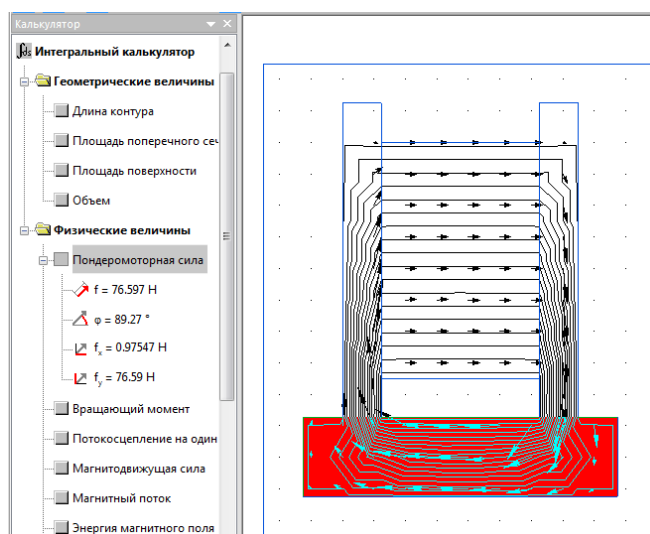


Рисунок 37 – Значение пондеромоторной силы при диаметре магнита  $D_M = 30 \text{ мм}$

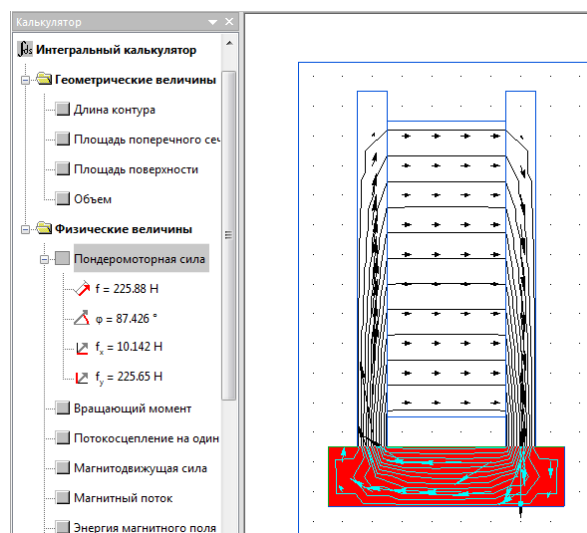


Рисунок 38 – Значение пондеромоторной силы при диаметре магнита  $D_M = 50 \text{ мм}$

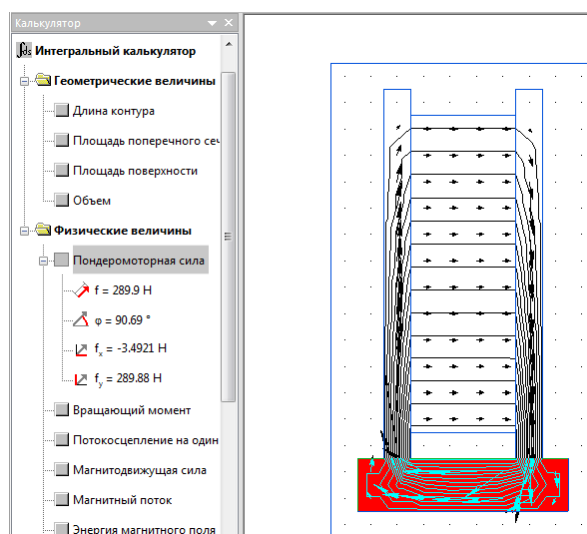


Рисунок 39 – Значение пондеромоторной силы при диаметре магнита  $D_M = 60 \text{ мм}$

Таблица 3 – Значение пондеромоторной силы при изменении диаметра магнита

Диаметр магнита $D_m$ , мм	Пондеромоторная сила $F$ , Н
30	76,597
40	133,95
50	225,88
60	289,90

На основании полученной таблицы строим график зависимости пондеромоторной силы от диаметра постоянного кольцевого магнита (рисунок 40).

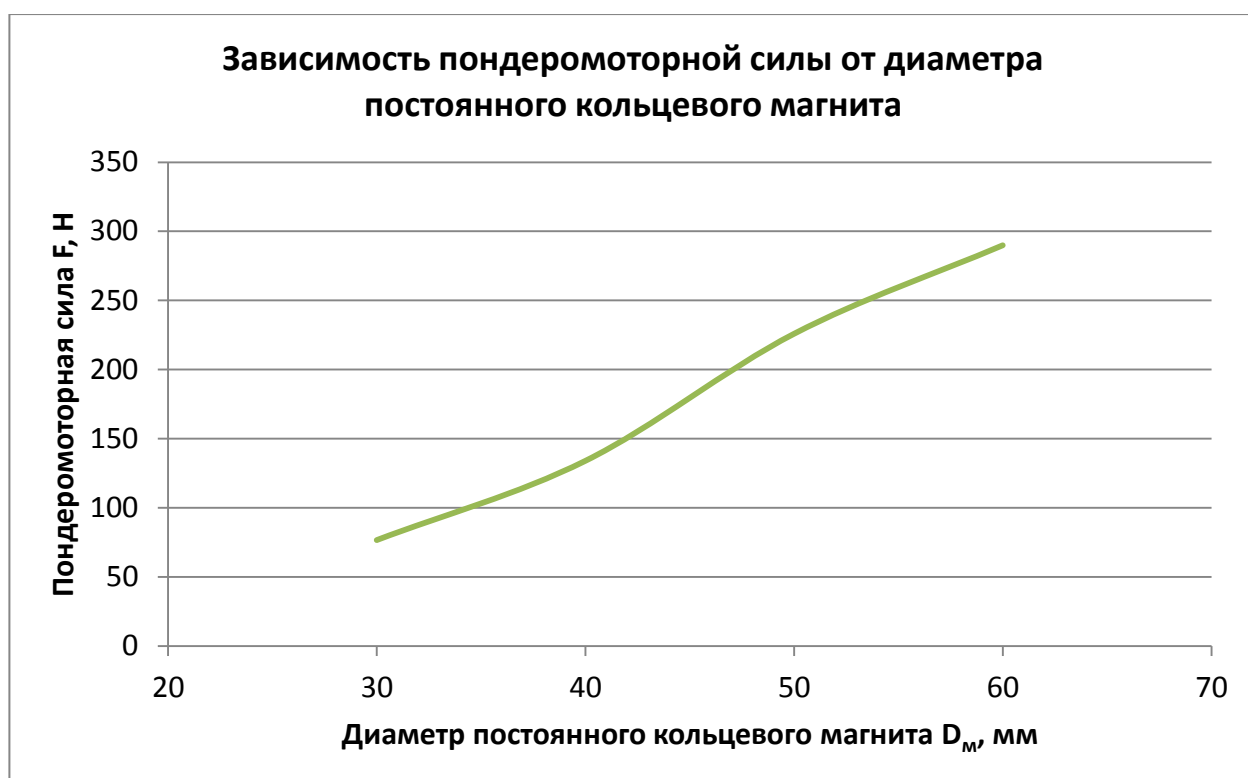


Рисунок 40 – Зависимость пондеромоторной силы от диаметра постоянного кольцевого магнита

Полученный график зависимости пондеромоторной силы от диаметра постоянного кольцевого магнита представлен в виде стабильно растущей почти прямой линии.

Анализируя данный график, можно сделать вывод о том, что указанные величины имеют прямую зависимость: увеличение диаметра постоянного кольцевого магнита приводит к заметному росту значения усилия прижатия магнитного колеса. Так, при увеличении диаметра в 2 раза с 30 до 60 мм

значение пондеромоторной силы возросло приблизительно в 3,7 раза с 76 до 289 Н.

### 3.5.4 Изменение зазора между магнитом и трубопроводом

В результате выполнения магнитостатического расчета модели магнитного колеса, описанной в пункте 3.2 (рисунок 19), значение пондеромоторной силы при величине зазора  $h = 5$  мм между магнитом и участком трубопровода получилось равным  $F = 133,95$  Н.

Используя данную расчетную модель с указанными геометрическими параметрами, не изменяя диаметра постоянного кольцевого магнита, определим усилие прижатия магнитного колеса при величине зазора 2,5, 7,5 и 10 мм для того, чтобы оценить его влияние на значение возникающей пондеромоторной силы.

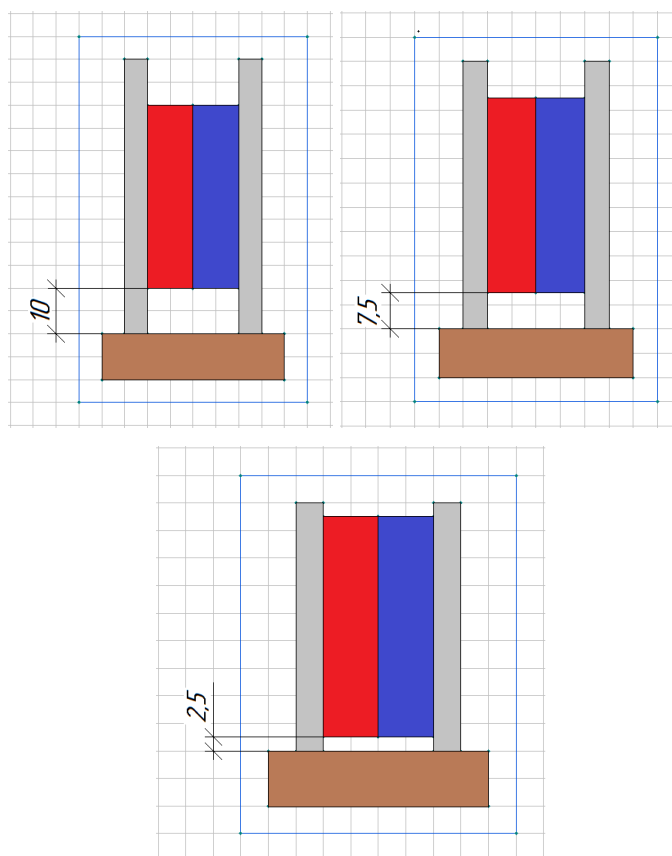


Рисунок 41 – Расчетные модели магнитных колес с измененным значением зазора между магнитом и участком трубопровода

Результаты расчета пондеромоторной силы приведены на рисунках 42, 43, 44 и представлены в таблице 4.

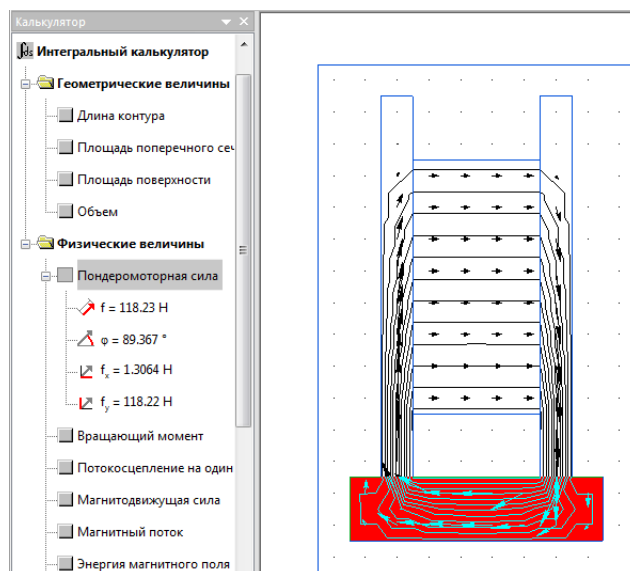


Рисунок 42 – Значение пондеромоторной силы при величине зазора  $h = 10$  мм

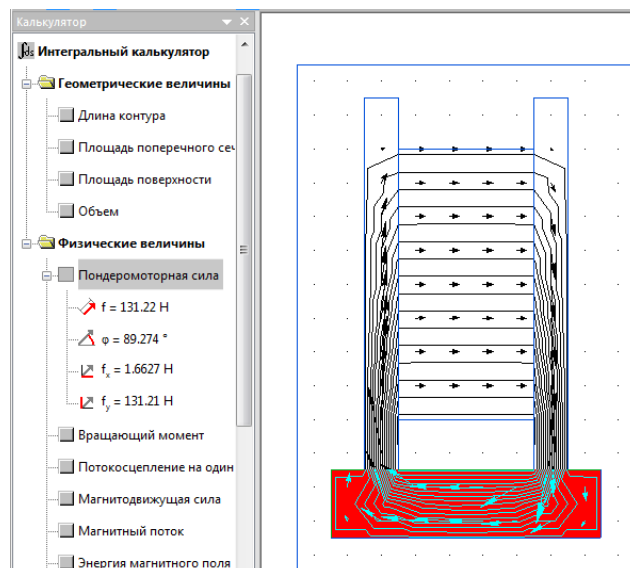


Рисунок 43 – Значение пондеромоторной силы при величине зазора  $h = 7,5$  мм

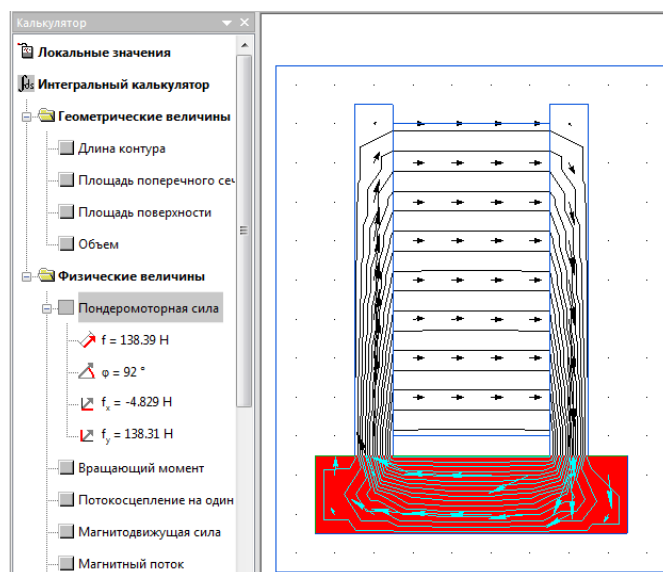


Рисунок 44 – Значение пондеромоторной силы при величине зазора  $h = 2,5$  мм

Таблица 4 – Значение пондеромоторной силы при изменении зазора между магнитом и трубопроводом

Зазор $h$ , мм	Пондеромоторная сила $F$ , Н
2,5	138,39
5	133,95
7,5	131,22
10	118,23

На основании полученной таблицы строим график зависимости пондеромоторной силы от величины зазора между постоянным кольцевым магнитом и участком трубопровода (рисунок 45).

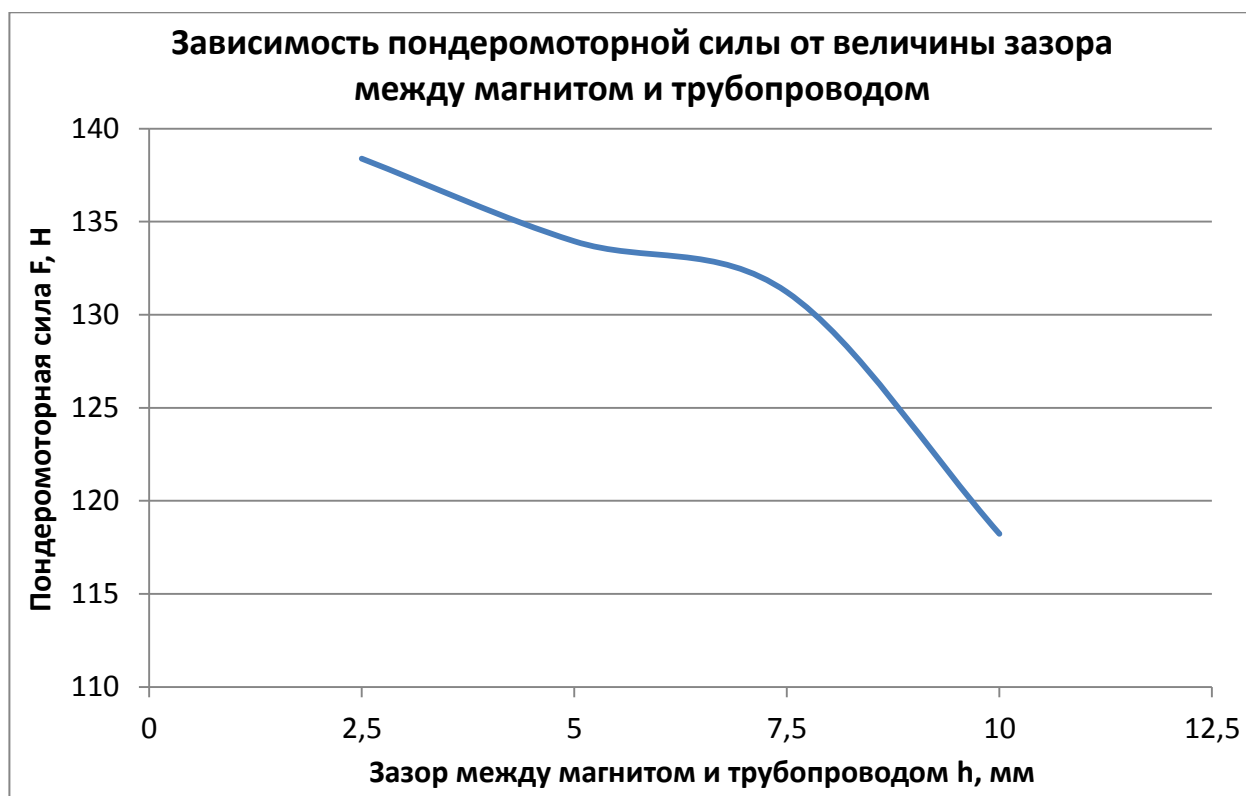


Рисунок 45 – Зависимость пондеромоторной силы от величины зазора между магнитом и трубопроводом

Зависимость пондеромоторной силы от величины зазора между постоянным кольцевым магнитом и участком трубопровода представляет собой убывающий график в виде гладкой кривой линии: при увеличении зазора происходит уменьшение значения возникающей магнитной силы.

На графике зависимости можно выделить три явно выраженных участка. При величине зазора от 2,5 до 5 мм наблюдается участок плавного снижения



значения усилия прижатия магнитного колеса с 138 до 133 Н; при величине зазора от 5 до 7,5 мм – участок стабильности, при котором значение пондеромоторной силы практически не изменяется; при величине зазора от 7,5 до 10 мм можно заметить участок резкого спада значения магнитной силы с 131 до 118 Н.

### **3.5.5 Компоновка магнитного колеса из нескольких постоянных кольцевых магнитов**

Увеличение усилия прижатия магнитного колеса к участку трубопровода можно обеспечить за счет изменения конструкции магнитных опор, связанного с применением нескольких постоянных кольцевых магнитов в общей компоновке колеса. Улучшенная конструкция представляет собой соединенные друг с другом отдельные единичные магнитные колеса, состоящие из одного постоянного магнита кольцевой формы. Такие, как были использованы в предыдущих расчетах.

Для определения зависимости величины пондеромоторной силы от количества постоянных кольцевых магнитов в общей сборке, в расчетах будем применять компоновки, состоящие из двух, трех, четырех единичных магнитных колес.

В качестве единичного магнитного колеса используем готовую модель, изображенную на рисунке 19, со следующими геометрическими параметрами:

$D_m = 30$  мм – диаметр постоянного магнита кольцевой формы;

$D_d = 40$  мм – диаметр опорного диска-магнитопровода;

$s_m = 10$  мм – толщина постоянного магнита кольцевой формы;

$s_d = 5$  мм – толщина опорного диска-магнитопровода;

$h = 5$  мм – зазор между магнитом и участком трубопровода.

Полученная расчетная модель представлена на рисунке 46.

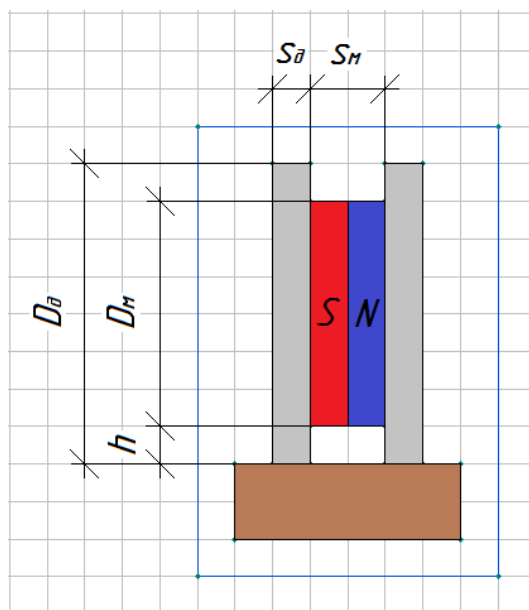


Рисунок 46 – Расчетная модель единичного магнитного колеса

В результате решения задачи магнитостатики для единичного магнитного колеса с одним постоянным кольцевым магнитом было получено значение пондеромоторной силы  $F = 72,925$  Н.

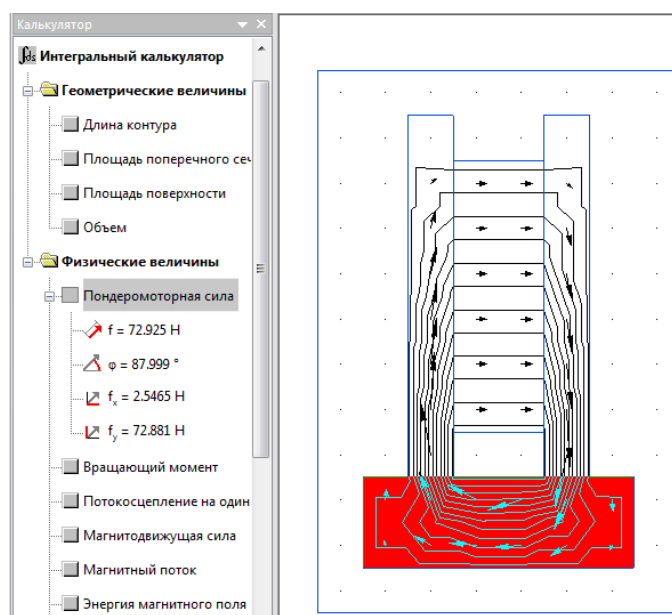


Рисунок 47 – Значение пондеромоторной силы при компоновке единичного магнитного колеса

Аналогично проводим магнитостатический расчет для компоновок магнитного колеса, состоящих из двух, трех и четырех постоянных кольцевых магнитов. Расчетные модели и результаты решения задач с указанным значением пондеромоторной силы приведены на рисунках 48, 50, 52 и 49, 51, 53 соответственно.

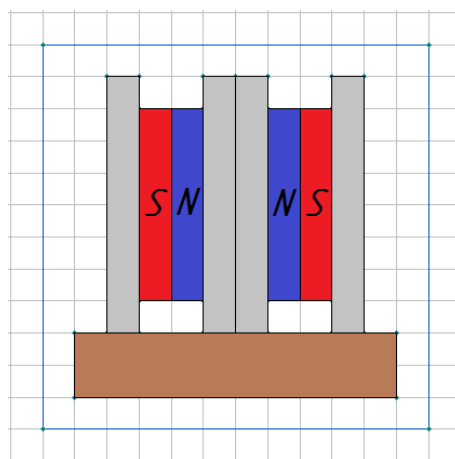


Рисунок 48 – Расчетная модель колеса с двумя магнитами

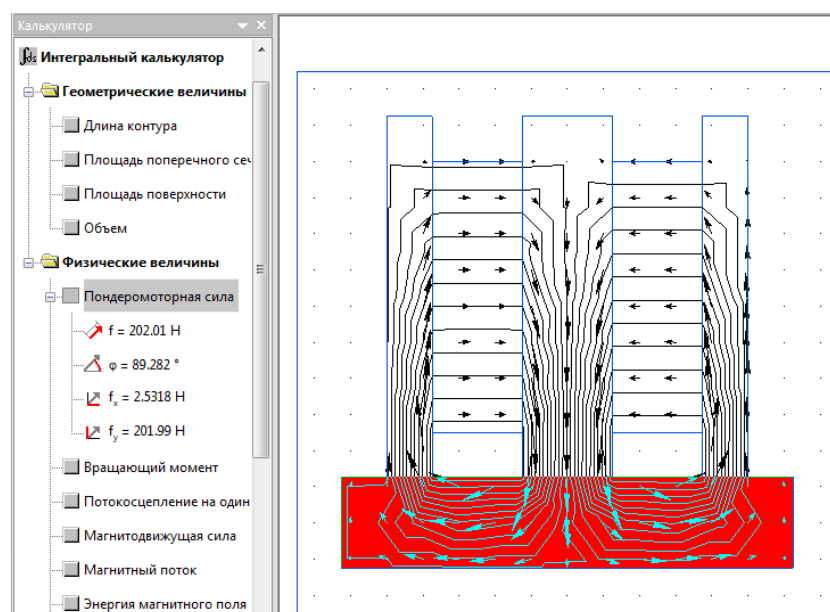


Рисунок 49 – Значение пондеромоторной силы при компоновке колеса с двумя постоянными кольцевыми магнитами

Значение пондеромоторной силы при компоновке колеса с двумя постоянными кольцевыми магнитами получилось равным  $F = 202,01 \text{ Н}$ .

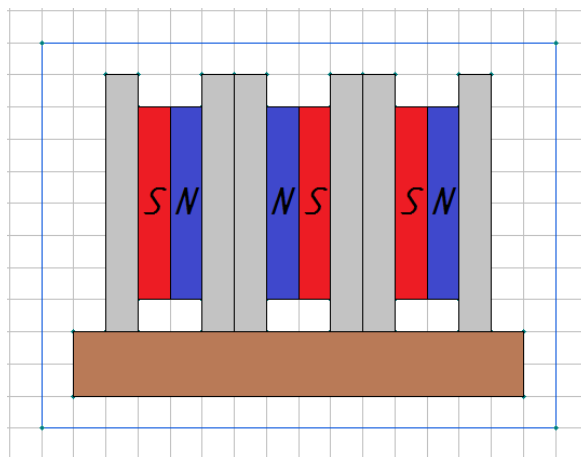


Рисунок 50 – Расчетная модель колеса с тремя магнитами

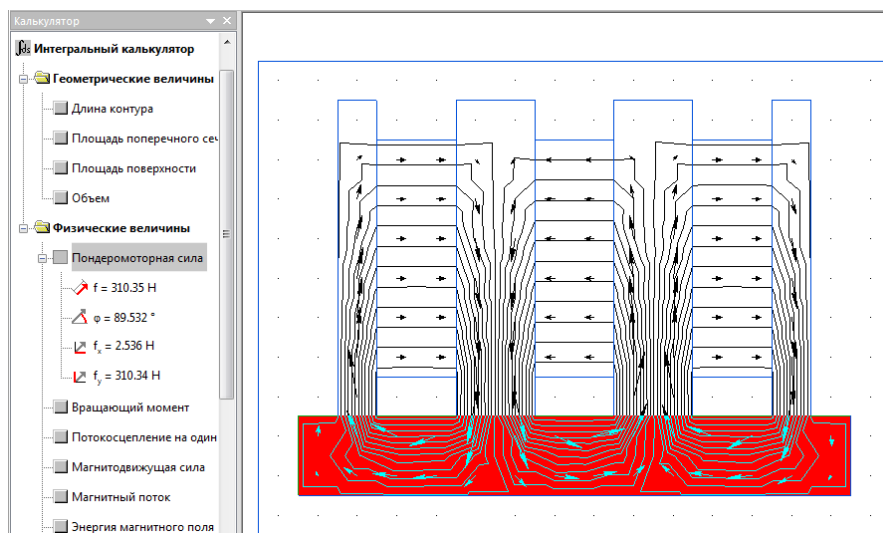


Рисунок 51 – Значение пондеромоторной силы при компоновке колеса с тремя постоянными кольцевыми магнитами

Значение пондеромоторной силы при компоновке колеса с двумя постоянными кольцевыми магнитами получилось равным  $F = 310,35 \text{ Н}$ .

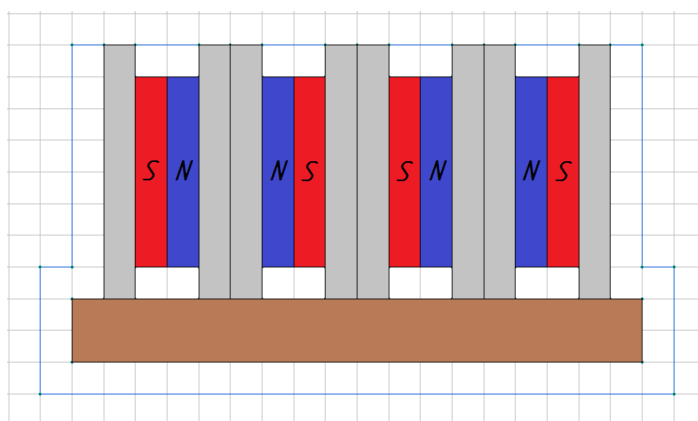


Рисунок 52 – Расчетная модель колеса с четырьмя магнитами

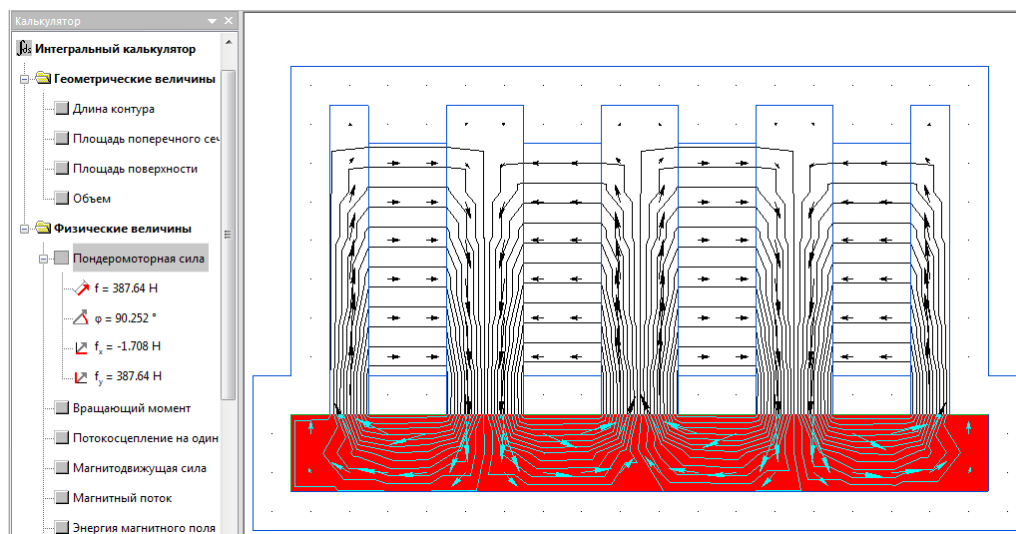


Рисунок 53 – Значение пондеромоторной силы при компоновке колеса с четырьмя постоянными кольцевыми магнитами

Значение пондеромоторной силы при компоновке колеса с двумя постоянными кольцевыми магнитами получилось равным  $F = 387,64$  Н.

Результаты решения магнитостатической задачи с полученными значениями пондеромоторной силы для всех рассчитанных компоновок магнитного колеса объединены в таблице 5.

Таблица 5 – Значение пондеромоторной силы при различной компоновке магнитного колеса

Количество магнитов в компоновке $N$	Пондеромоторная сила $F$ , Н
1	72,925
2	202,01
3	310,35
4	387,64

На основании полученной таблицы строим график зависимости пондеромоторной силы от количества постоянных кольцевых магнитов в компоновке колеса (рисунок 54).

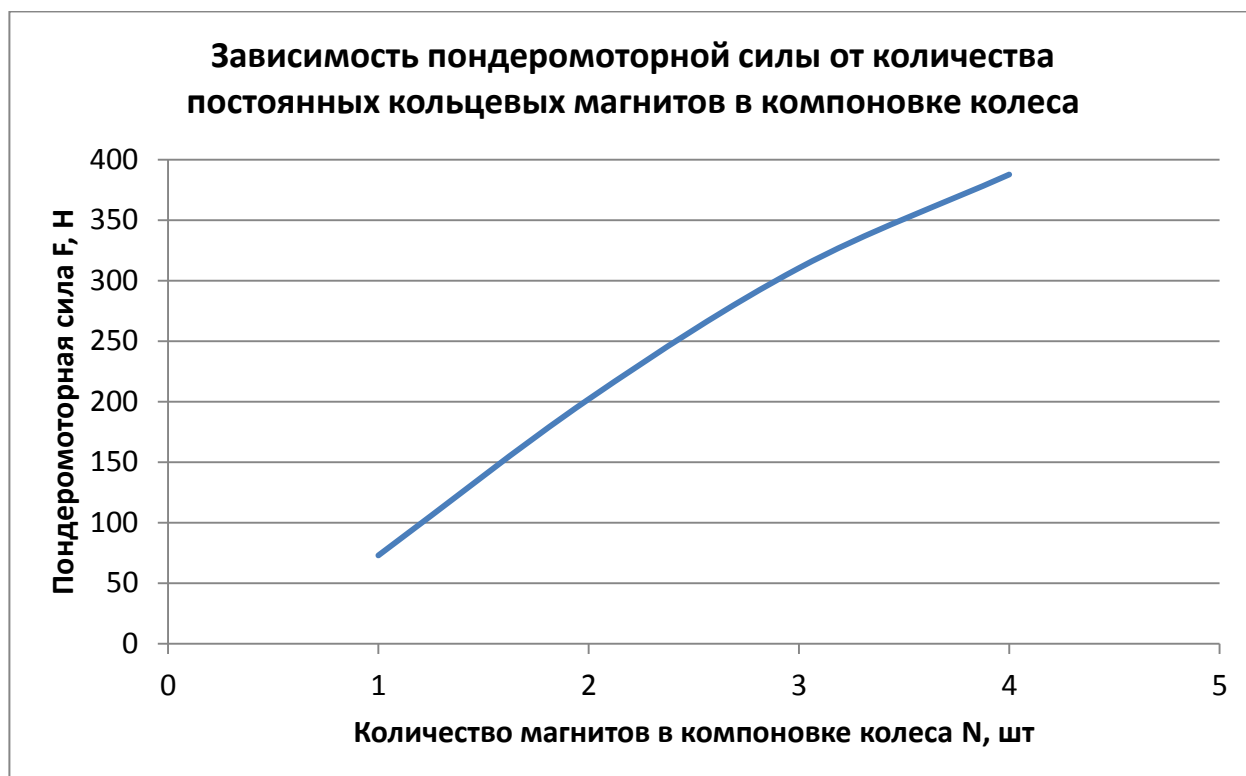


Рисунок 54 – Зависимость пондеромоторной силы от количества постоянных кольцевых магнитов в компоновке колеса

Анализируя линейно растущий график зависимости пондеромоторной силы от количества постоянных кольцевых магнитов в компоновке колеса,

можно сделать вывод о том, что увеличение числа магнитов в конструкции опоры приводит к значительному повышению усилия прижатия магнитного колеса к участку трубопровода. Так, использование компоновки, состоящей из четырех постоянных магнитов кольцевой формы, повышает силу магнитного прижатия в 5 раз по сравнению с аналогичной одномагнитной конструкцией колеса. Однако, это приводит к увеличению массогабаритных характеристик.

Наибольшая разница между значениями возникающей пондеромоторной силы наблюдается в сборочных конструкциях с одним и двумя постоянными кольцевыми магнитами. Она составляет чуть больше чем 2,5 раза. При дальнейшем увеличении количества магнитов до трех и четырех в компоновке колеса можно заметить постепенное уменьшение разности значений магнитной силы.

Таким образом, согласно результатам проведенного анализа построенных графиков зависимости пондеромоторной силы от изменения различных параметров, для обеспечения необходимого усилия прижатия разрабатываемой конструкции каретки детекторного модуля к диагностируемому участку трубопровода, проектируем магнитные колеса со следующими геометрическими характеристиками: диаметр магнита  $D_m = 80$  мм, толщина магнита  $s_m = 10$  мм, диаметр опорных магнитопроводящих дисков  $D_d = 90$  мм, толщина опорных магнитопроводящих дисков  $s_d = 5$  мм.

Предложенную геометрическую модель магнитного колеса (рисунок 55) рассчитываем в ELCUT для определения силы магнитного притяжения.

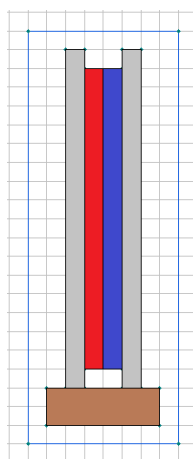


Рисунок 55 – Предложенная расчетная геометрическая модель магнитного колеса

В результате выполнения магнитостатического исследования было получено значение пондеромоторной силы равное  $F = 451,96$  Н (рисунок 56). Это означает, что данная конструкция магнитного колеса с предложенными геометрическими характеристиками обеспечивает усилие магнитного прижатия каретки детекторного модуля к диагностируемому участку трубопровод порядка 45 кг на одно колесо.

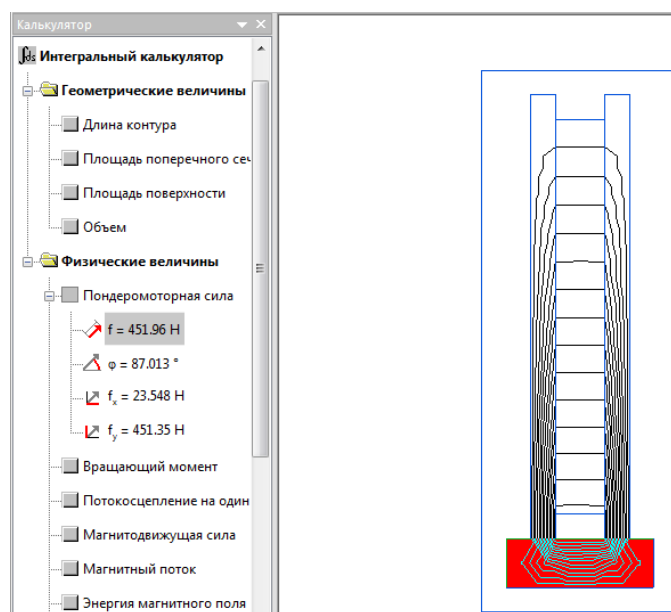


Рисунок 56 – Результат магнитостатического расчета

Для разработки и проектирования 3D-модели каретки детекторного модуля на основе предложенных магнитных колес, последующего проведения испытания конструкции на ударную нагрузку от действия пондеромоторной силы и анализа полученного напряженно-деформированного состояния используем программный комплекс SolidWorks.

#### **4 Испытание на ударную нагрузку каретки детекторного модуля на основе магнитных колес в SolidWorks**

Во время установки каретки с детекторным модулем рентгеновского дефектоскопа на участок магистрального трубопровода для проведения неразрушающего контроля кольцевого сварного шва, в определенный момент времени, помимо силы тяжести, на конструкцию начинает действовать пондеромоторная сила, возникающая в результате приближения каретки на расстояние магнитного взаимодействия колес с ферромагнитным материалом трубы.

Усилие магнитного притяжения квадратично возрастает при уменьшении расстояния до поверхности соприкосновения, что приводит к резкому прижатию каретки к трубе. В результате чего происходит удар, который в большей степени приходится на контактируемые участки магнитных колес. В связи с этим, для того чтобы определить их работоспособность и надежность при действии магнитной силы, необходимо разработать конструкцию каретки с детекторным модулем и провести испытание на ударную нагрузку.

В качестве постоянного кольцевого магнита для конструкции колеса используется редкоземельный магнит – мощный постоянный магнит, состоящий из сплава бора, железа и неодима. Благодаря подобному составу и технологии изготовления, магниты обладают невероятно большой мощностью притяжения и высокой стойкостью к размагничиванию. Несмотря на это, полученные путем спекания порошка неодимовые магниты имеют пористую структуру. В связи с этим являются хрупкими, и при сильных ударах могут раскалываться, что приводит к потере магнитных свойств.

В виду указанного недостатка, для того чтобы избежать во время удара разрушения магнита при прямом контакте с участком трубы, конструкция магнитного колеса предусмотрена таким образом, что постоянный магнит кольцевой формы, намагниченный аксиально, расположен между двумя опорными дисками-магнитопроводами. Периферия магнита удалена от опорной поверхности трубы, но магнитопроводы опираются на нее. Магнитный поток



сцепления проходит через тело магнита и примыкающие к нему магнитопроводы. Поток замыкается в ферромагнитном материале трубы и пандеромоторная сила прижимает конструкцию к поверхности трубы.

Таким образом, в описанной конструкции магнитного колеса опорные диски-магнитопроводы, изготовленные из более прочного материала, например, из стали, изолируют хрупкий неодимовый магнит от непосредственного контакта с поверхностью трубы и напрямую воспринимают ударную нагрузку, возникающую при действии пандеромоторной силы.

Для построения 3D-модели конструкции каретки детекторного модуля на основе магнитных колес и дальнейшего динамического расчета было использовано программное обеспечение SolidWorks.

SolidWorks – это программный комплекс САПР для автоматизированного механико-машиностроительного конструирования, относится к классу средних и является интенсивно развиваемой системой проектирования на основе трехмерного гибридного параметрического моделирования деталей, сборок, узлов и изделий, интегрированных средствах электронного документооборота и широком спектре специализированных проектировочных модулей.

#### **4.1 Построение CAD-модели**

Характерными чертами программного обеспечения SolidWorks являются большое разнообразие способов создания твердотельных параметрических моделей, управляемая размерами геометрия, поддержка библиотек стандартных элементов машиностроения, автоматическая генерация чертежей на основании созданных трехмерных моделей, работа со сборочными единицами, удобный графический пользовательский интерфейс, наличие средств обмена данными с другими системами, средств импорта и экспорта файлов в различных форматах и т.д. Указанные возможности позволяют создавать трехмерные модели и чертежи, которые могут быть переданы в системы инженерных расчетов или в системы генерации управляющих программ для станков с ЧПУ, а также

генерировать полностью законченные рабочие чертежи деталей или полное описание сборочных единиц.

Проектирование изделия в SolidWorks состоит из нескольких этапов: выбор конструктивной плоскости для создания двумерного эскиза, преобразование эскиза в твердотельный элемент, формирование детали из различных элементов, компоновка созданных деталей в сборку. При этом гибкие инструменты конструктора SolidWorks позволяют изменять значения любого размера, накладывать взаимосвязи на взаимное расположение объектов в течение всего процесса проектирования. Процесс создания трехмерных моделей основан на принципах добавления и снятия материала, аналогичных методам реальных технологических процессов.

Используя возможности и инструменты программного обеспечения SolidWorks, переходим к этапу разработки 3D-модель конструкции каретки детекторного модуля на основе магнитных колес, используемой при проведении неразрушающего контроля кольцевых сварных соединений магистральных трубопроводов методом рентгеновской дефектоскопии.

Проектирование 3D-модели каретки начинаем с формирования основания, на которое в дальнейшем будут крепиться магнитные колеса, детектор ионизирующего излучения и другие приспособления. Для этого создаем прямоугольную площадку длиной 300 мм, шириной 250 мм и высотой 10 мм (рисунок 57).

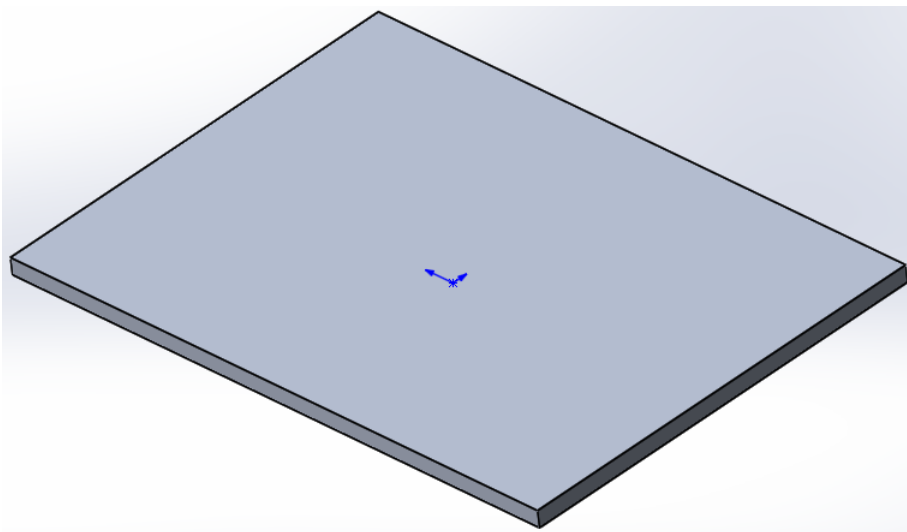


Рисунок 57 – Основание каретки детекторного модуля

Далее непосредственно строим составные элементы конструкции самого магнитного колеса, представляющие собой постоянный магнит кольцевой формы 1, намагниченный аксиально, который расположен между двумя опорными дисками-магнитопроводами 2 (рисунок 58). Значение диаметра магнита составляет 80 мм, значение толщины – 10 мм. Диаметр и толщина магнитопровода равны 90 и 5 мм соответственно. Данные составные части имеют посадочное отверстие диаметром 15 мм для крепления на оси.

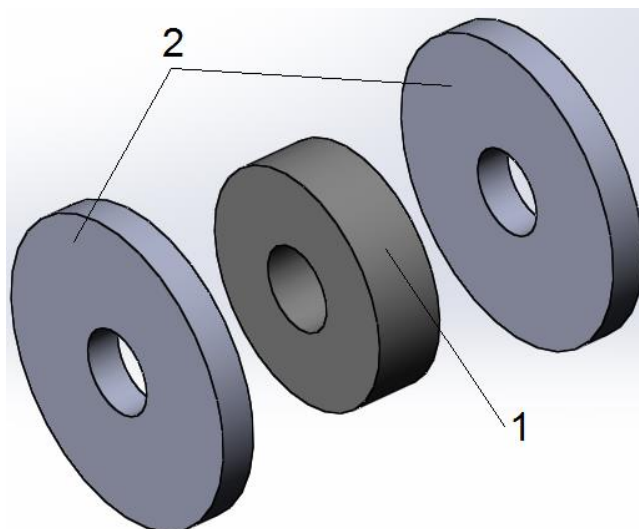


Рисунок 58 – Составные элементы конструкции магнитного колеса: 1 – постоянный кольцевой магнит; 2 – опорные диски-магнитопроводы

На следующем этапе проектирования 3D-модели создаем ось, с помощью которой установленное на ней магнитное колесо будет крепиться к основанию каретки (рисунок 59).

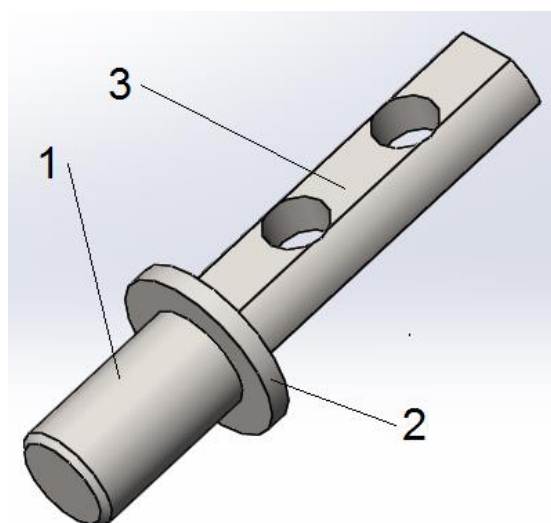


Рисунок 59 – Трехмерная модель оси

Разрабатываемая конструкция каретки детекторного модуля является упрощенной в том плане, что не предусматривает приводной механизм для обеспечения вращения магнитных колес, установленных на осях, которые неподвижно прикреплены к основанию каретки при помощи болтового соединения. Так как при проведении испытания каретки на ударную нагрузку, возникающую под действием силы магнитного притяжения, и последующем анализе напряженно-деформированного состояния магнитных колес, определяющее значение имеет их непосредственный контакт с участком трубопровода, массовые характеристики общей конструкции и величина пондеромоторной силы.

Полученная трехмерная модель оси, изображенная на рисунке 59, имеет три конструктивных участка: 1 – посадочное место диаметром 15 мм и длиной 25 мм под магнитное колесо; 2 – буртик диаметром 25 мм и толщиной 3 мм для упора колеса; 3 – участок длиной 50 мм для крепления оси к основанию каретки с двумя отверстиями под болты диаметром М8.

Далее в режиме сборки устанавливаем магнитное колесо 1 на ось 2 так, чтобы одной стороной оно упиралось в буртик. С другой стороны фиксируем колесо при помощи специальной упорной гайки 3 диаметром 30 мм и толщиной 3 мм, надеваемой со свободной стороны оси и закручиваемой по резьбе (рисунок 60).

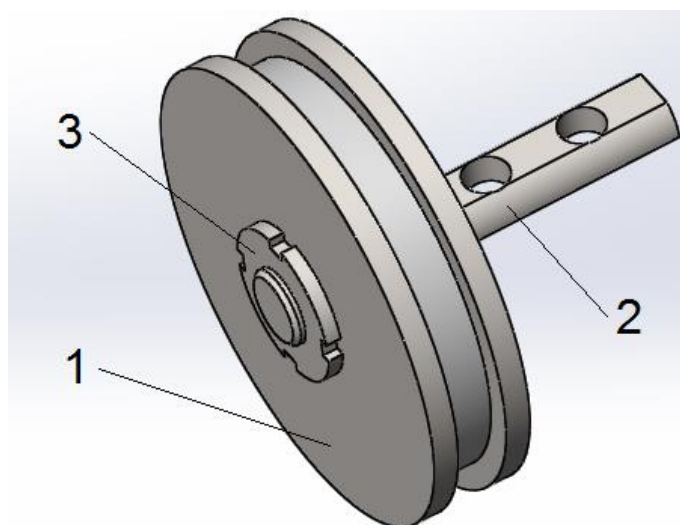


Рисунок 60 – Трехмерная модель магнитного колеса, установленного на оси

Детектор ионизирующего излучения условно изображаем в виде параллелепипеда в связи с разнообразием и сложностью реальных конструкций устройства (рисунок 61). Также данная условность объясняется тем, что для расчета каретки на ударную нагрузку, возникающую под действием силы магнитного притяжения, необходимо обеспечить только требуемую массу существующих детекторов в пределах от 10 до 20 кг в независимости от их геометрических характеристик.

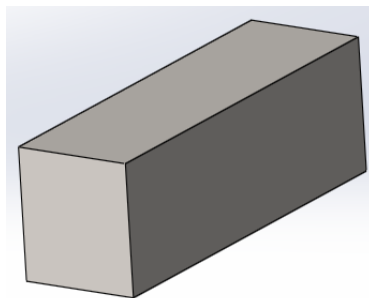


Рисунок 61 – Условное трехмерное изображение модели детектора ионизирующего излучения

Крепление детектора ионизирующего излучения к основанию каретки осуществляется за счет разъемного соединения типа ласточкин хвост, представляющего собой две пары сопрягаемых деталей. При этом на охватывающей детали выполняется один или несколько пазов трапецевидной формы, а на охватываемой – шипы соответствующей формы и количества (рисунок 62). Основные геометрические размеры профилей охватываемой и охватывающей направляющих для создания трехмерной модели данного соединения были взяты из справочника конструктора-машиностроителя [16, с. 569].

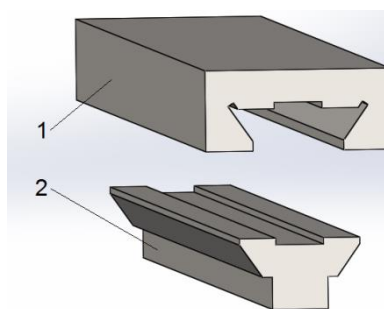


Рисунок 62 – Разъемное соединение типа ласточкин хвост: 1 – охватывающая деталь; 2 – охватываемая деталь

Охватывающие направляющие крепятся к детектору ионизирующего излучения (рисунок 63).

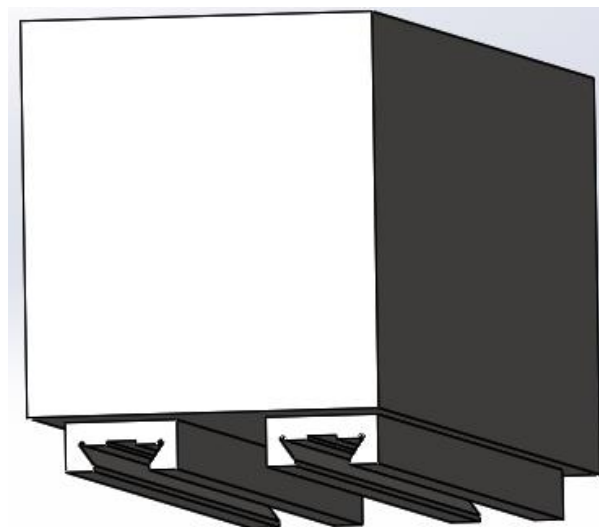


Рисунок 63 – Детектор ионизирующего излучения с охватывающими направляющими

Охватываемые детали имеют четыре отверстия с диаметром под резьбу М4 и посредством болтового соединения фиксируются на основании каретки (рисунок 64).

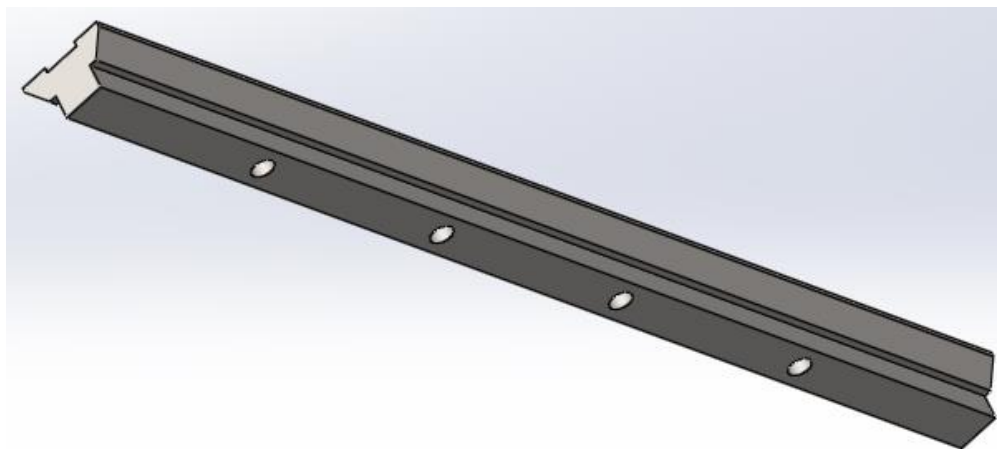


Рисунок 64 – Охватываемая направляющая с отверстиями для болтового соединения

Удобство и легкость переноса, быстрота и эффективность установки и демонтажа каретки детекторного модуля самоходного рентгеновского дефектоскопа при проведении неразрушающего контроля кольцевых сварных швов магистральных трубопроводов обеспечивается за счет применения специальных ручек в виде двух перегородок высотой 150 мм и шириной 50 мм, между которыми крепится цилиндрический стержень диаметром 10 мм при помощи двух болтов М4, закрученных по одному на каждой из сторон.

Отверстия в перегородках служат для облегчения веса конструкции. Полученная трехмерная модель держателя представлена на рисунке 65.

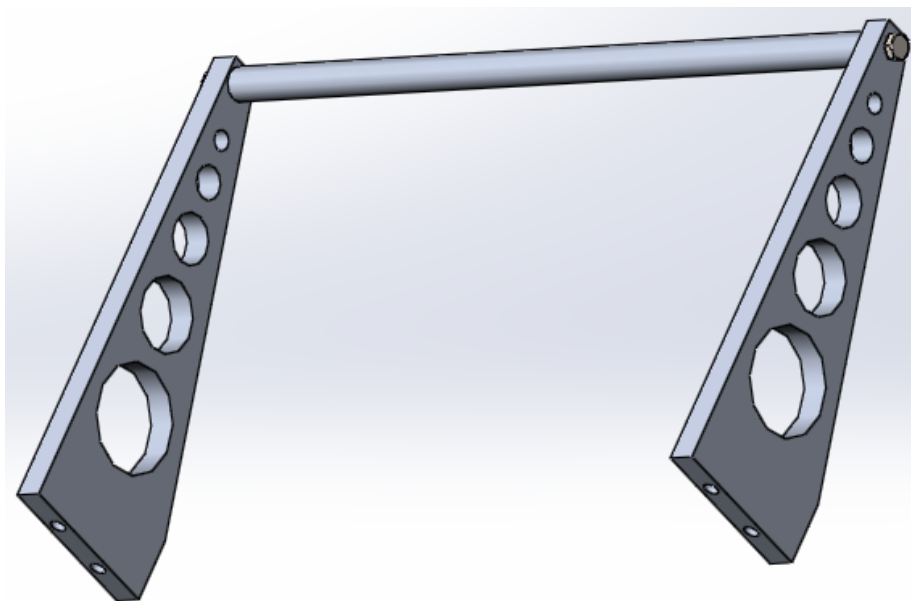


Рисунок 65 – Специальное приспособление для переноса и удержания каретки

В каждой перегородке толщиной 8 мм данного специального приспособления имеются по два отверстия с диаметром под болт М4 для установки держателя на основание каретки.

Довольно высокое значение действующей силы магнитного притяжения затрудняет ручной демонтаж каретки. Для того чтобы по завершении процедуры дефектоскопии снять конструкцию с участка трубопровода, было разработано отжимное приспособление, которое представляет собой быстросъемный замок 1, монтируемый при помощи болтового соединения к основанию каретки, и эксцентрик (кулачок) 2, расположенный на установленной в отверстиях замка оси 3. Вращение кулачка вокруг оси происходит за счет поворота съемного рычага 4 в виде цилиндрического стержня с рукояткой. Длина кулачка превышает диаметр магнитных колес на 20 мм. Данного расстояния достаточно, чтобы значительно уменьшить значение ponderomotive силы и вручную, без особого труда, поднять оборудование. Трехмерная модель описанного отжимного приспособления изображена на рисунке 66.

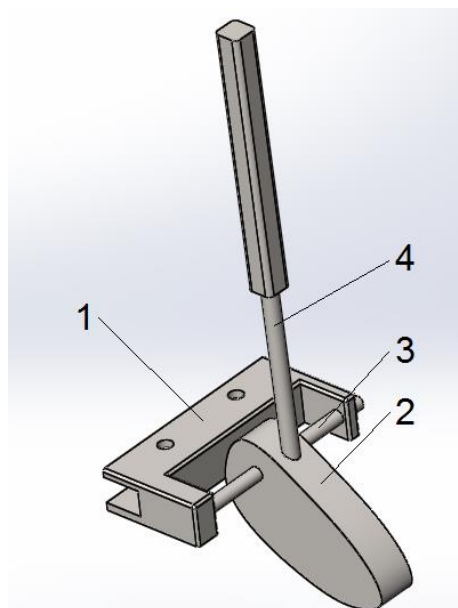


Рисунок 66 – Специальное отжимное приспособление для снятия каретки: 1 – замок; 2 – эксцентрик (кулачок); 3 – ось; 4 – поворотный рычаг

Следующим шагом является создание сквозных отверстий в основании каретки для обеспечения крепления при помощи болтового соединения всех спроектированных элементов конструкции: осей с магнитными колесами, детектора ионизирующего излучения, специальных держателей и отжимного приспособления. Трехмерная модель основания каретки с отверстиями под крепеж представлена на рисунке 67.

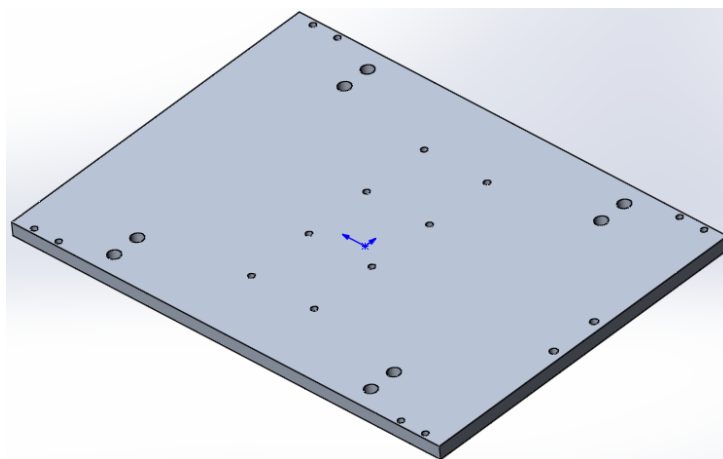


Рисунок 67 – Основание каретки детекторного модуля с отверстиями под крепеж

После того, как разработаны и спроектированы все детали каретки детекторного модуля самоходного дефектоскопа, созданы необходимые отверстия для обеспечения их крепления к основанию, переходим к этапу сборки всех элементов конструкции. Полученная 3D-модель конструкции



каретки детекторного модуля на основе магнитных колес в окончательной сборе показана на рисунке 68.

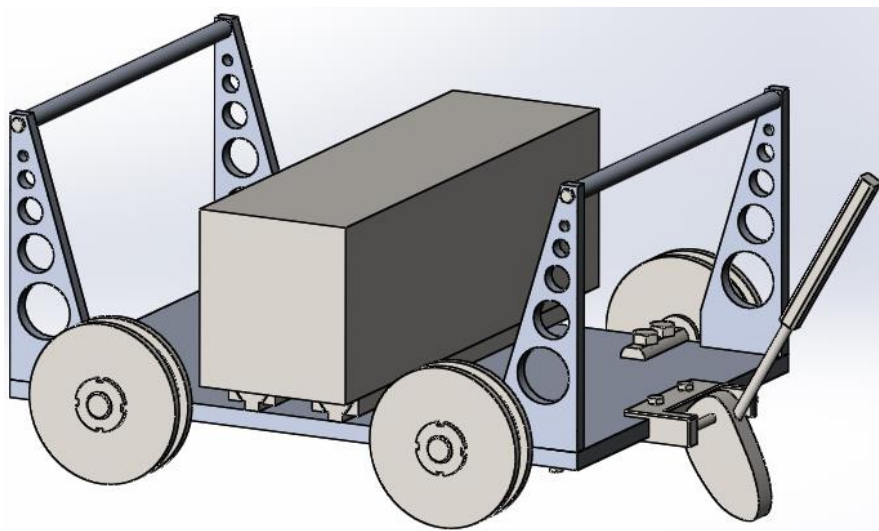


Рисунок 68 – Разработанная 3D-модель конструкции каретки детекторного модуля самоходного дефектоскопа на основе магнитных колес

Для более реального и наглядного вида каретки установим ее непосредственно на участке трубопровода диаметром 1020 мм с толщиной стенки 20 мм (рисунок 69).

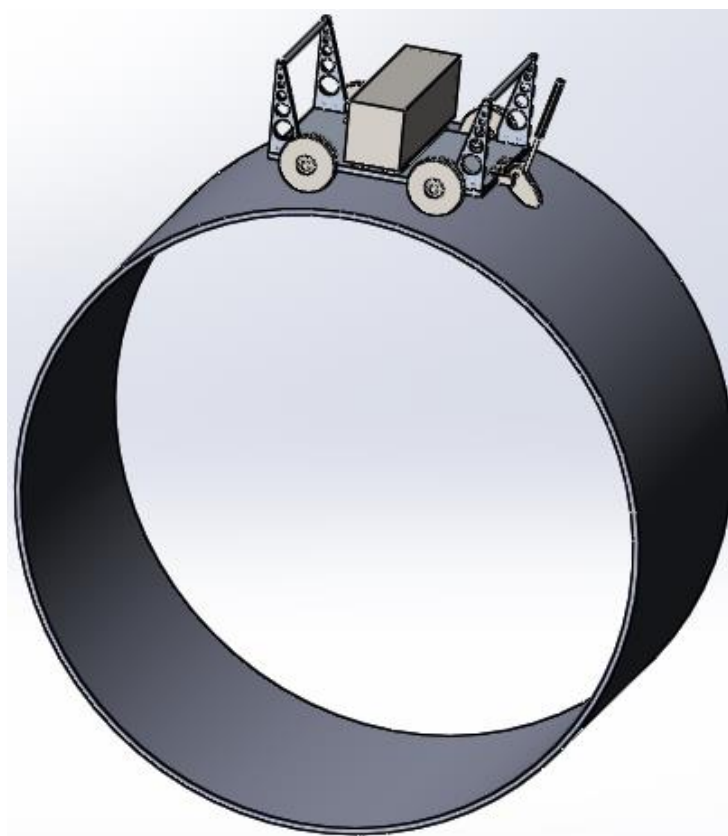


Рисунок 69 – Каретка детекторного модуля, установленная на участке трубопровода

## **4.2 Решение задачи в SolidWorks методом конечных элементов**

Программный комплекс SolidWorks для решения различного типа задач использует семейства расчетных модулей, которые в качестве математического аппарата применяют метод конечных элементов (МКЭ).

В основе метода лежит дискретизация объекта с целью решения уравнений механики сплошной среды в предположении, что эти соотношения выполняются в пределах каждой из элементарных областей. Эти области называются конечными элементами. Они могут соответствовать реальной части пространства, как, например, пространственные элементы, или же быть математической абстракцией, как элементы стержней, балок, пластин или оболочек. В пределах конечного элемента назначаются свойства ограничиваемого им участка объекта (это могут быть, например, характеристики и жесткости и прочности материала, плотность и т.д.) и описываются поля интересующих величин (применительно к механике твердого тела это перемещения, деформации, напряжения и т.д.) Параметры из второй группы назначаются в узлах элемента, а затем вводятся интерполирующие функции, посредством которых соответствующие значения можно вычислить в любой точке внутри элемента или на его границе. Задача математического описания элемента сводится к тому, чтобы связать действующие в узлах факторы. В механике сплошной среды это, как правило, перемещения и усилия.

Семейство расчётных модулей SolidWorks Simulation выполняет прочностные статические и динамические исследования (линейные и нелинейные) на основе метода конечных элементов (МКЭ). Семейство SolidWorks Simulation включает следующие модули:

- SolidWorks Simulation;
- SolidWorks Simulation Standard;
- SolidWorks Simulation Professional;
- SolidWorks Simulation Premium.

Создание исследований и выполнение расчётов происходит непосредственно в среде SolidWorks на основе собственных моделей или же деталей и сборок на базе произвольной импортированной геометрии. К видам исследований данного расчетного модуля относятся статический расчет; прогнозирование многоциклового усталостного разрушения; расчёт резонансных форм и частот; расчёт форм и нагрузок потери устойчивости в линейной постановке; тепловой расчёт без учёта движения среды; имитации падения; расчёт сосудов давления по стандартам ASME с категоризацией нагрузок и линеаризацией напряжений; исследование подмодели; линейная динамика: модальный анализ, анализ случайных колебаний, гармонический анализ, анализ спектра отклика; физическая нелинейность – нелинейные модели пластичности, ползучести, вязкоупругости, гиперупругости, с эффектом памяти формы, сыпучая среда; геометрическая нелинейность – модели больших деформаций и перемещений; нелинейная динамика с явным и неявным решателями; многослойные композитные оболочки.

Семейство модулей SolidWorks Flow Simulation предназначено для проведения газо- и гидродинамического анализа (внутреннее и внешнее течение; ламинарное, турбулентное течение и переходный режим; нестационарное течение; дозвуковое, трансзвуковое и сверхзвуковое течение; расчёт относительной влажности в газах; одновременный теплообмен теплопередачей и теплопереносом; теплопередача в телах; течение с учётом гравитации; моделирование движения капель и частиц с прилипанием, отражением, частичным отражением и тепловым воздействием от среды без столкновения, разделения и агрегации и влияния на среду; кавитация; протекание постоянного тока и джоулев нагрев) в среде SolidWorks. В состав семейства входит базовый пакет Flow Simulation и дополнительные прикладные модули Electronics Cooling Module и HVAC (Heat Ventilating Air Conditioning) Module. Математической основой является метод конечных объёмов.

SolidWorks Motion предназначен для кинематического и динамического анализа механизмов. Модуль использует информацию, содержащуюся в

сборках SolidWorks, с возможностью уточнения расчётной модели в интерфейсе SolidWorks Motion. В основе используемой математики лежит численное решение уравнений динамики. Тела предполагаются жёсткими, однако податливость может быть учтена контактах, соединениях и в некоторых виртуальных сущностях.

Модуль SolidWorks Plastics – предназначен для конечно-элементного анализа процессов литья термопластичных пластмасс под давлением и решения сопутствующих задач. SolidWorks Plastics помогает инженеру предусмотреть и исправить технологические дефекты на ранних стадиях проектирования детали и/или пресс-формы, избежать дорогостоящих переделок и улучшить качество выпускаемой продукции. Математический аппарат основан на методе конечных элементов применительно к задачам гидродинамики.

EMS – модуль 3D-симуляции эффектов, возникающих в электромагнитном поле, основанный на методе конечных элементов. EMS предназначается для четырех областей электротехники: электромеханика, электромагнетизм, силовая электроника и поведение тел в электромагнитном поле. Это делает его полезным для разработки и тестирования моделей электромоторов, генераторов, трансформаторов, металлоискателей, моделирования вихревых токов, индуктивного нагрева, намагничивания и других задач.

HFWorks – полнофункциональный 3D-симулятор для расчёта параметров электромагнитных излучений в диапазоне ВЧ/СВЧ (свыше 1 ГГц) и беспроводных устройств.

OptisWorks – семейство модулей SolidWorks, предназначенные для оптического и светотехнического анализа и проектирования. Они основаны на трассировке (стохастической или детерминированной) лучей с полноценной имитацией всех эффектов взаимодействия света с телами и средой с последующей оценкой восприятия света человеком. Вне зависимости от поставки продукта получается единая геометрическая и оптическая модель, пригодная для анализа всеми инструментами. Оптические характеристики

объектов вводятся на уровне детали SolidWorks, что облегчает их повторное использование в различных конструкциях.

Для решения поставленной задачи по определению прочностных характеристик магнитных колес каретки детекторного модуля в результате действия ударной нагрузки, возникающей в момент их контакта с участком трубопровода, использовался расчетный модуль SolidWorks Simulation, позволяющий проводить динамические исследования.

Используя полученную 3D-модель конструкции каретки детекторного модуля на основе магнитных колес (рисунок 68), создаем новое исследование «Испытание на ударную нагрузку» в SolidWorks Simulation (рисунок 70).

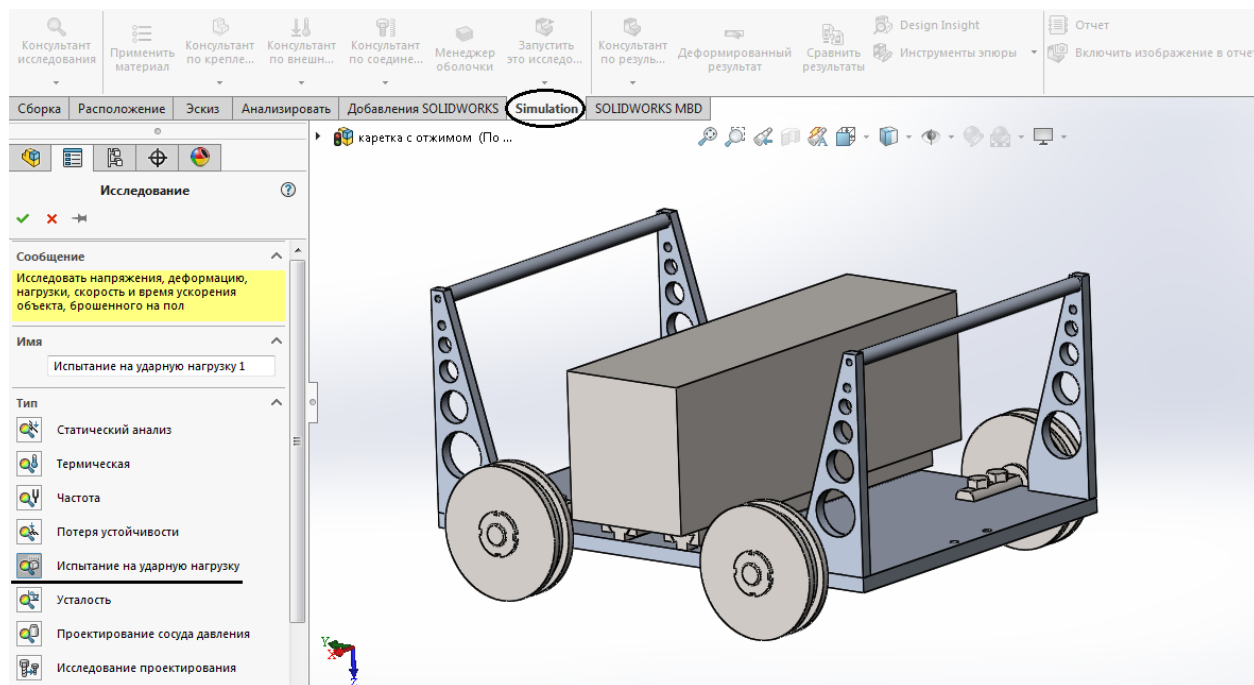


Рисунок 70 – Создание исследования в SolidWorks Simulation

Для выполнения указанного исследования, результатом которого будут являться картины распределения напряжений, деформаций и перемещений в каретке, необходимо:

- 1) выбрать материал для каждой детали модели;
- 2) задать граничные условия и нагрузку;
- 3) создать сетку конечных элементов;
- 4) запустить решение.

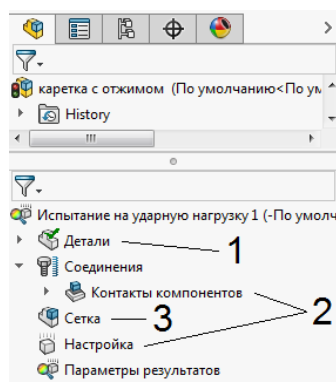


Рисунок 71 – Дерево исследования

### 4.3 Выбор свойств материала

Перед началом исследования, следует установить все необходимые свойства материала, требуемые для данного типа анализа, для каждой детали разработанной 3D-модели каретки детекторного модуля. Свойства материала могут быть установлены в любое время, до начала анализа. Все свойства материала устанавливаются, при помощи диалогового окна «Материал».

Каркасным элементам конструкции каретки (основанию вместе со специальным приспособлением для транспортирования и монтажа) задаем легкий и пластичный материал из алюминиевого сплава Д16Т, который выбираем из библиотеки материалов SolidWorks с указанными физическими и механическими свойствами (рисунок 72).

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	7e+010	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0.3897	Не применимо
Модуль сдвига	2.7e+010	Н/м <sup>2</sup>
Массовая плотность	2780	кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при растяжении	440000000	Н/м <sup>2</sup>
Предел прочности при сжатии		Н/м <sup>2</sup>
Предел текучести	290000000	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения	2.4e-005	/К

Рисунок 72 – Алюминий Д16Т

Аналогичным образом для осей и опорных дисков магнитных колес, охватывающей и охватываемой направляющих разъемного соединения ласточкин хвост, условной модели детектора ионизирующего излучения, всех деталей специального отжимного приспособления устанавливаем материал

сталь 45 – сталь конструкционная углеродистая качественная со следующими физическими и механическими свойствами (рисунок 73).

Легированную сталь 40X выбираем в качестве материала для всех крепежных деталей (болтов, гаек, шайб), участвующих в соединении (рисунок 74).

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.100000031e+011	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0.28	Не применимо
Модуль сдвига	7.9e+010	Н/м <sup>2</sup>
Массовая плотность	7800	кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при растяжении	750000000	Н/м <sup>2</sup>
Предел прочности при сжатии		Н/м <sup>2</sup>
Предел текучести	355000000	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения	1.1e-005	/К

Рисунок 73 – Сталь 45

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	2.100000031e+011	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0.28	Не применимо
Модуль сдвига	7.9e+010	Н/м <sup>2</sup>
Массовая плотность	7800	кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при растяжении	800000000	Н/м <sup>2</sup>
Предел прочности при сжатии		Н/м <sup>2</sup>
Предел текучести	560000000	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения	1.1e-005	/К

Рисунок 74 – Сталь 40X

Из-за отсутствия в библиотеке SolidWorks, материал магнитов – редкоземельный сплав неодим-железо-бор конфигурируем вручную, назначая известные физические и механические свойства (рисунок 75).

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	1.5e+011	Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона	0.24	Не применимо
Модуль сдвига		Н/м <sup>2</sup>
Массовая плотность	7400	кг/м <sup>3</sup>
Предел прочности при растяжении	130000000	Н/м <sup>2</sup>
Предел прочности при сжатии	1120000000	Н/м <sup>2</sup>
Предел текучести		Н/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплового расширения		/К
Теплопроводность		W/(м·К)

Рисунок 75 – Редкоземельный сплав неодим-железо-бор

#### 4.4 Задание граничных условий и нагрузок

Нагрузки и ограничения необходимы для определения условий эксплуатации модели. Результаты анализов непосредственно зависят от заданных нагрузок и ограничений. Нагрузки и ограничения прикладываются к геометрическим объектам как элементы, которые полностью соответствуют форме и автоматически подстраиваются к изменениям формы.

Задание граничных условий и нагрузок при проведении испытания 3D-модели конструкции каретки детекторного модуля на основе магнитных колес заключается в выборе контактирующих поверхностей при ударе, определении и указании параметров, характеризующих динамический процесс.

Контакт каретки и трубопровода происходит при ударе, который возникает за счет пондеромоторной силы, действующей между магнитными колесами и участком трубы. Поэтому, в качестве контактирующих поверхностей выбираем опорные магнитопроводящие диски колес, используя вкладку «Контакты компонентов» в дереве исследования (рисунок 76).

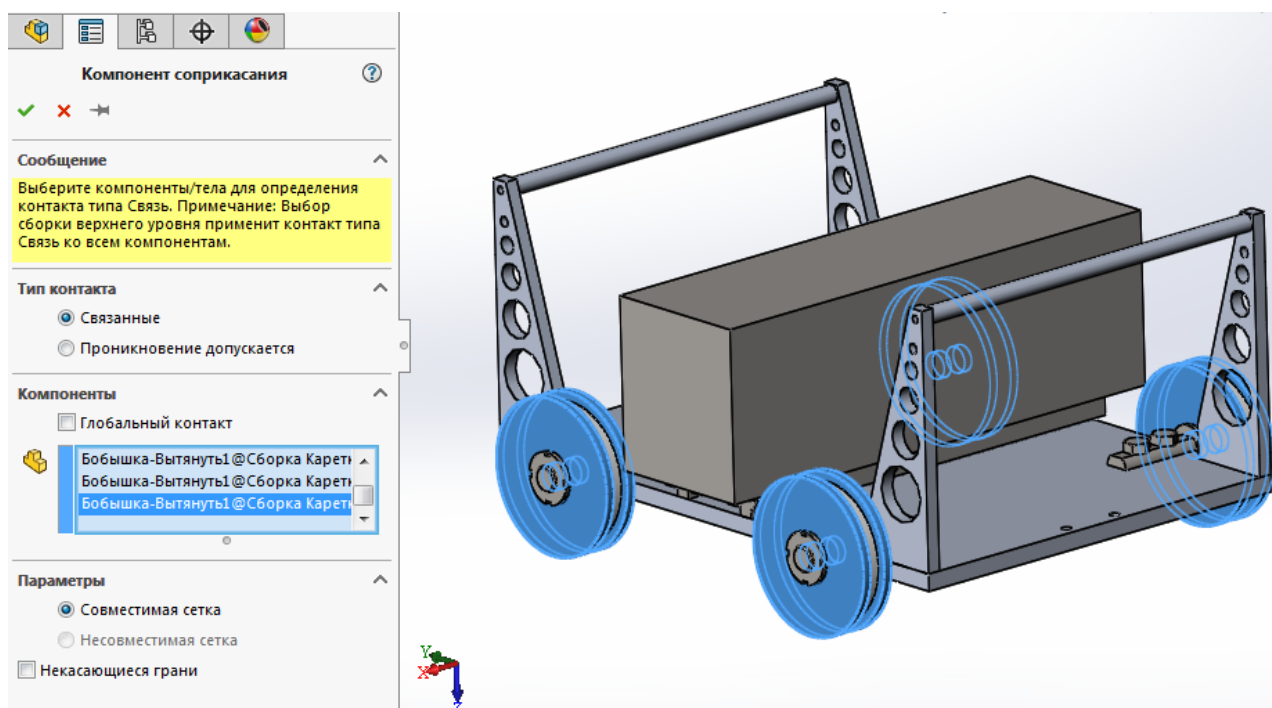


Рисунок 76 – Выбор поверхностей контакта



Нагрузка от собственного веса каретки и нагрузка от действия силы магнитного притяжения колес к диагностируемому участку трубопровода являются основными параметрами, определяющими прочность конструкции при ударе.

Собственный вес конструкции напрямую зависит от ее общей массы. Полученное программным расчетом значение массы каретки равняется  $m = 20,45$  кг. Следовательно, вес конструкции:

$$P = m \cdot g = 20,45 \cdot 9,81 = 200,61 \text{ Н.} \quad (1)$$

Сила магнитного притяжения каретки к участку трубопровода определяется коэрцитивной силой магнита в колесе и его геометрическими параметрами. Значение пондеромоторной силы, рассчитанное при помощи программного комплекса ELCUT в пункте 3.5.5, для предложенной и описанной модели колеса с постоянным кольцевым магнитом на основе редкоземельного сплава неодим-железо-бор с коэрцитивной силой  $H_c = 955$  кА/м, диаметром 80 мм и толщиной 10 мм равняется  $F_m = 453$  Н.

Данная величина изменяется в зависимости от расстояния до поверхности соприкосновения. Для получения среднего значения силы магнитного притяжения, необходимого для выполнения динамического расчета, был проведен ряд аналогичных магнитостатических исследований в ELCUT, в ходе которых расстояние между колесом и поверхностью трубопровода постепенно увеличивалось до 30 мм. В результате чего был построен график зависимости (рисунок 77).

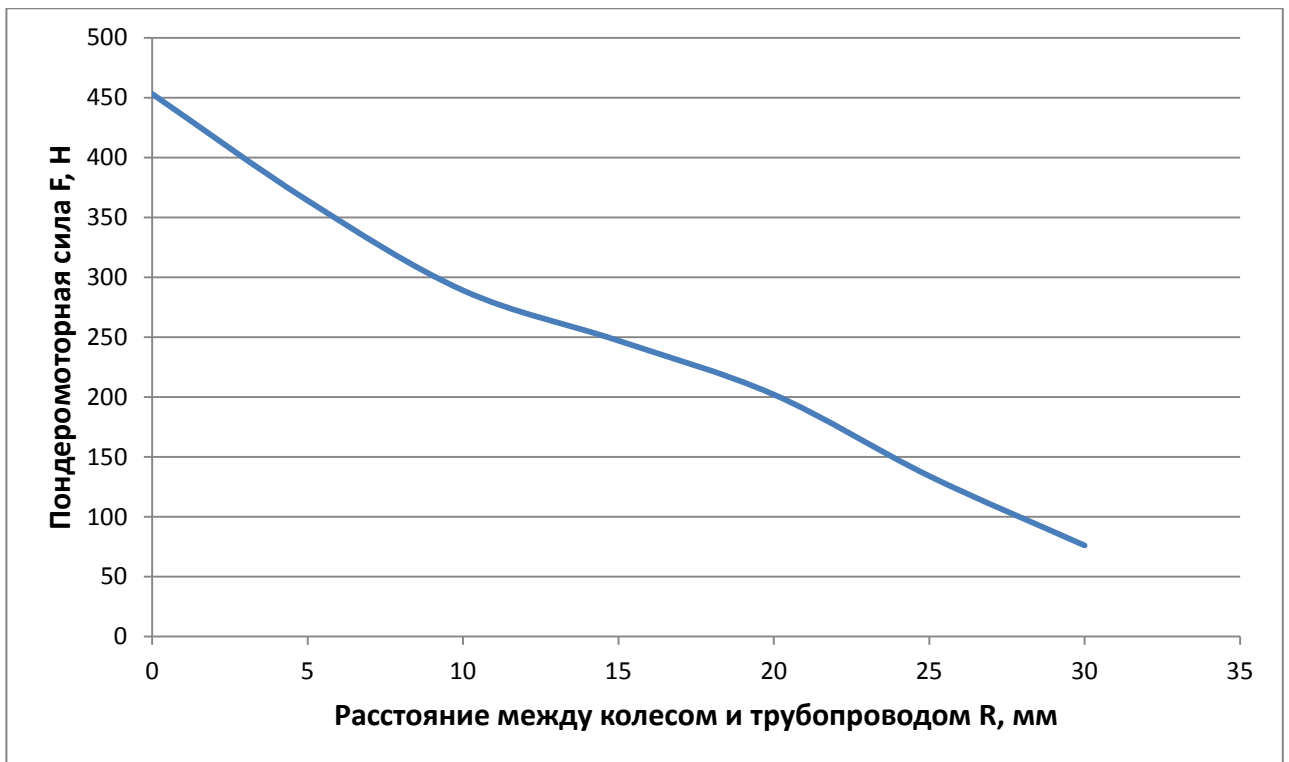


Рисунок 77 – Зависимость пондеромоторной силы от расстояния между колесом и трубопроводом

Для проведения испытания разработанной конструкции каретки детекторного модуля на ударную нагрузку, из полученного графика зависимости, берем приблизительно среднее значение пондеромоторной силы  $F_M = 200$  Н, действующей на расстоянии  $h = 20$  мм. Суммарное значение силы магнитного притяжения каретки к трубопроводу  $F_M = 800$  Н складывается из четырех, по одной от каждого колеса.

Данная нагрузка, характеризующая ударный процесс, задается через скорость каретки  $V$  в момент удара и ускорение свободного падения  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> (рисунок 78).

$$V = \sqrt{2 \cdot a \cdot h}, \quad (2)$$

где  $a$  – ускорение каретки под действием силы магнитного притяжения и веса конструкции;

$h$  – расстояние между магнитными колесами и участком трубопровода, в момент значения пондеромоторной силы  $F_M = 800$  Н.

Ускорение  $a$  определяем через уравнение сил по второму закону Ньютона:

$$P + F_M = m \cdot a; \quad (3)$$

$$a = \frac{P + F_M}{m} = \frac{200,61 + 800}{20,45} = 48,93 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \quad (4)$$

В результате находим скорость каретки  $V$  в момент удара:

$$V = \sqrt{2 \cdot 48,93 \cdot 0,02} = 1,38 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

После того, как установлены необходимые ограничения, определена и задана ударная нагрузка через скорость каретки в момент удара и ускорение свободного падения, переходим к этапу создания сетки конечных элементов.

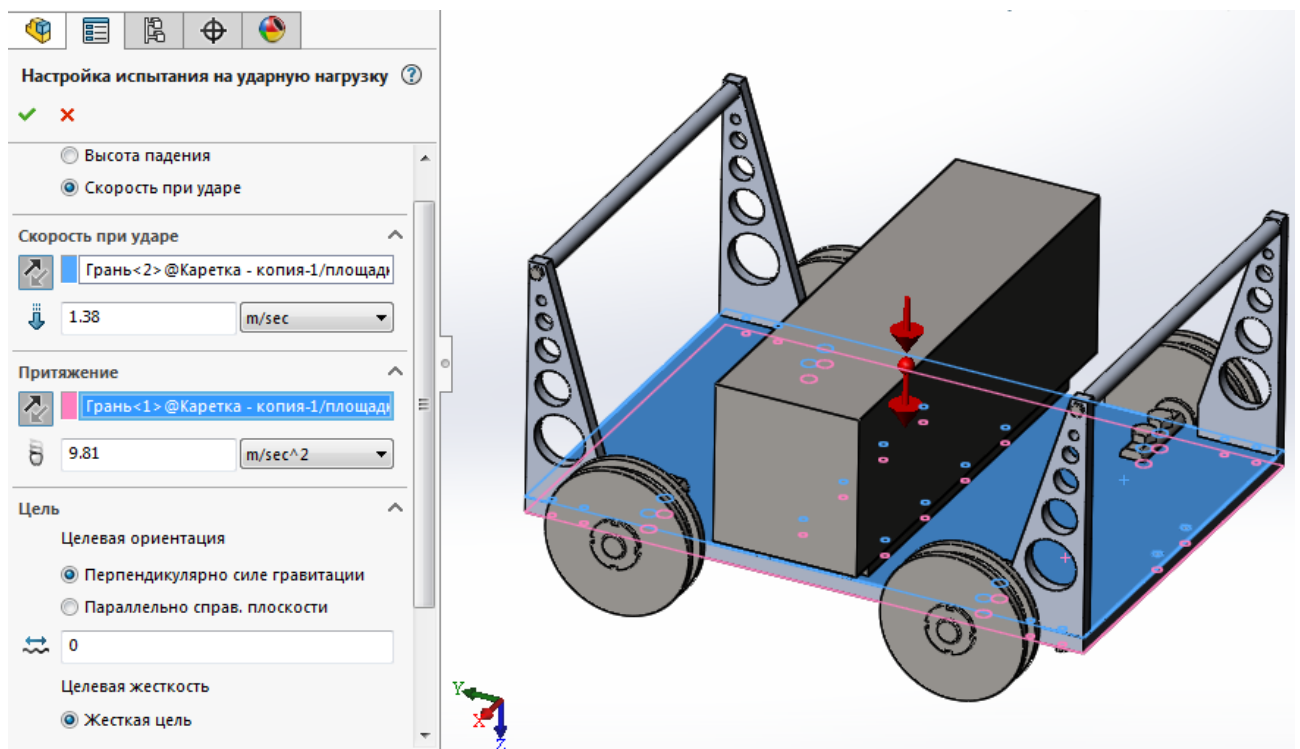


Рисунок 78 – Задание нагрузки ударного процесса

#### 4.5 Создание сетки конечных элементов

Анализ конечных элементов (АКЭ) предоставляет надежный цифровой метод анализа технических конструкций. Процесс начинается с создания геометрической модели. Затем программа делит модель на маленькие части простой формы (элементы), соединенные в общих точках (узлах). Программы анализа конечных элементов рассматривают модель как сеть дискретных связанных между собой элементов.

Метод конечных элементов (МКЭ) прогнозирует поведение модели при помощи сопоставления информации, полученной от всех элементов, составляющих модель.

Создание сетки – очень важный этап в анализе конструкций. Автоматический создатель сетки в программе создает сетку на основе глобального размера элемента, допуска и характеристик локального управления сеткой. Управление сеткой позволяет задать разные размеры элемента для компонентов, граней, кромок и вершин.

Программа определяет размер элемента для модели, принимая во внимание ее объем, площадь поверхности и другие геометрические характеристики. Размер создаваемой сетки (количество узлов и элементов) зависит от геометрии и размеров модели, допуска сетки, параметров управления сеткой и характеристик контакта. На ранних стадиях анализа конструкций, где могут подойти приблизительные результаты, можно задать больший размер элемента для более быстрого решения. Для более точного решения может потребоваться меньший размер элемента.

Создание сетки дает трехмерные тетраэдральные твердотельные элементы, двумерные треугольные элементы оболочки и одномерные элементы балки. Сетка состоит из элементов одного типа, если не задан тип комбинированной сетки. Твердотельные элементы обычно подходят объемистых моделей. Элементы оболочки обычно подходят для моделирования тонкостенных деталей (листовые металлы), а балки и стержни – для элементов конструкций.

Для разработанной трехмерной модели каретки детекторного модуля создаем стандартную сетку из линейных тетраэдральных элементов глобальным размером 10 мм и допуском 0,5 мм (рисунок 79).

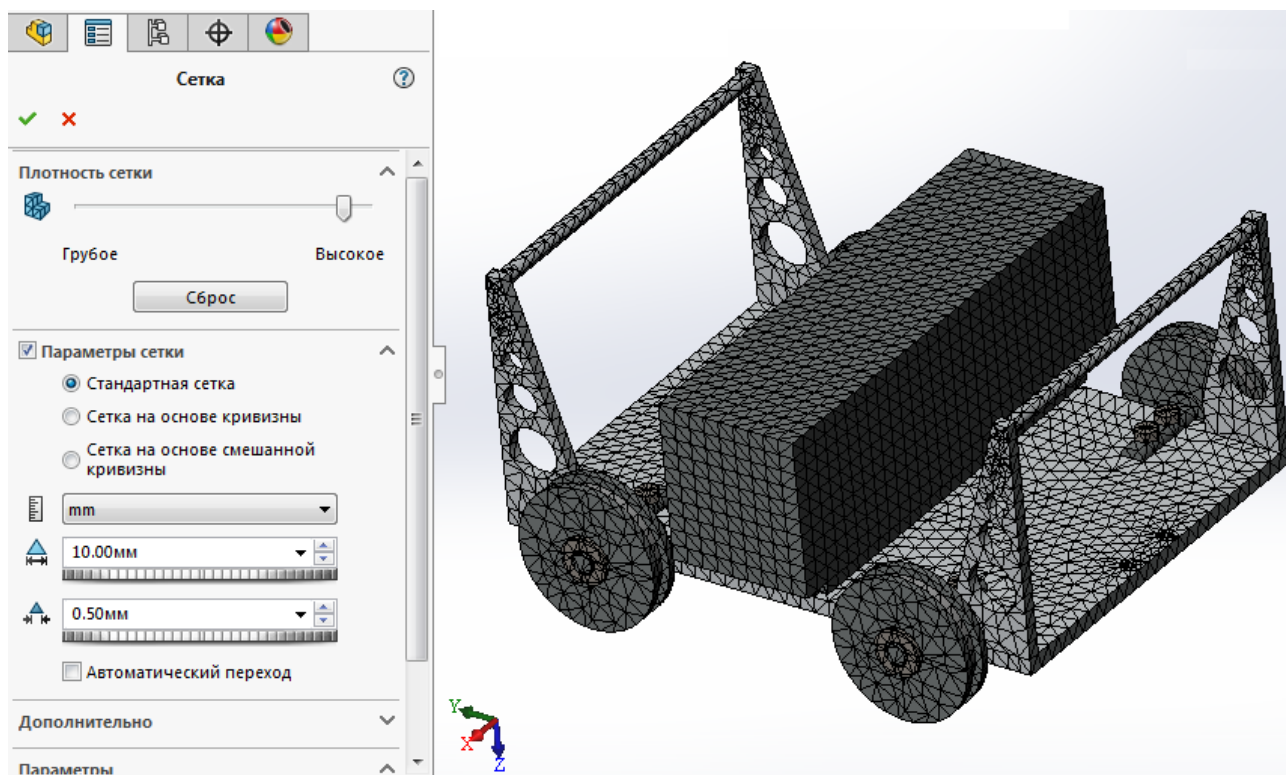


Рисунок 79 – Создание сетки конечных элементов

После того, как все параметры исследования установлены (выбран материал для каждой детали модели, заданы граничные условия и нагрузка, создана сетка конечных элементов), запускаем испытание каретки на ударную нагрузку. В результате проведенного динамического расчета получены картины распределения напряжений, деформаций и перемещений, анализ которых приведен в пункте 4.6.

#### 4.6 Анализ результатов

Результатом проведенного испытания разработанной трехмерной модели каретки детекторного модуля на ударную нагрузку, возникающую при магнитном взаимодействии колес с диагностируемым участком трубопровода, в программном комплексе SolidWorks методом конечных элементов являются картины распределения напряжений, деформаций и перемещений.

Согласно полученным картинам (рисунок 80, 81), наибольшее напряжение при ударе каретки возникает в местах контакта магнитных колес с поверхностью трубопровода. Максимальное значение в опорных

магнитопроводящих дисках из стали 45 составляет 197,7 МПа. Пиковое значение напряжений в осях не превышает 120 МПа.

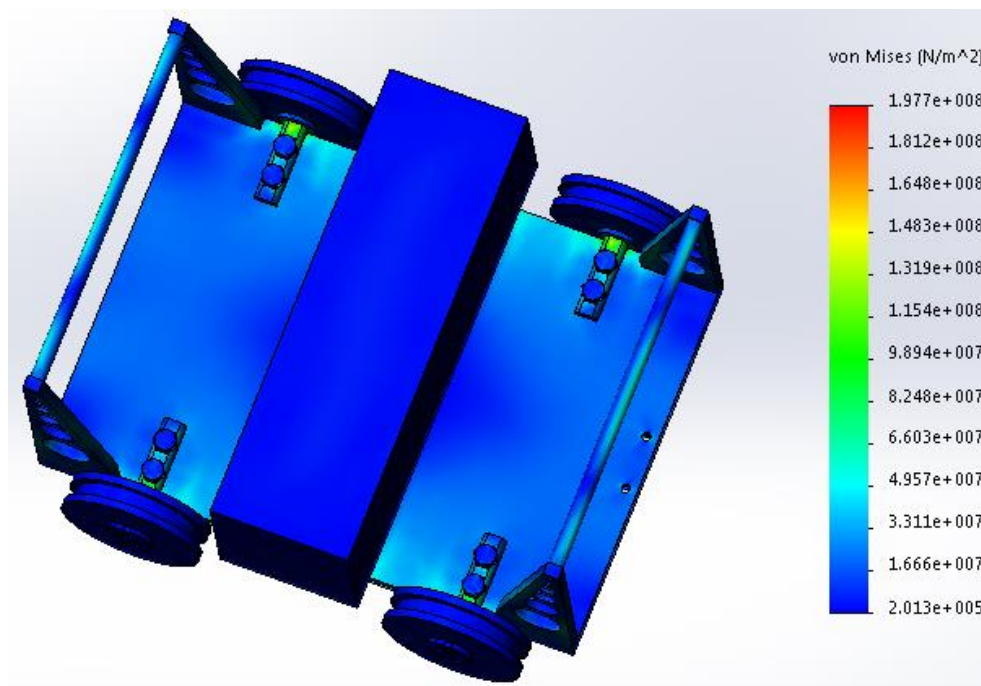


Рисунок 80 – Общая картина распределения напряжений

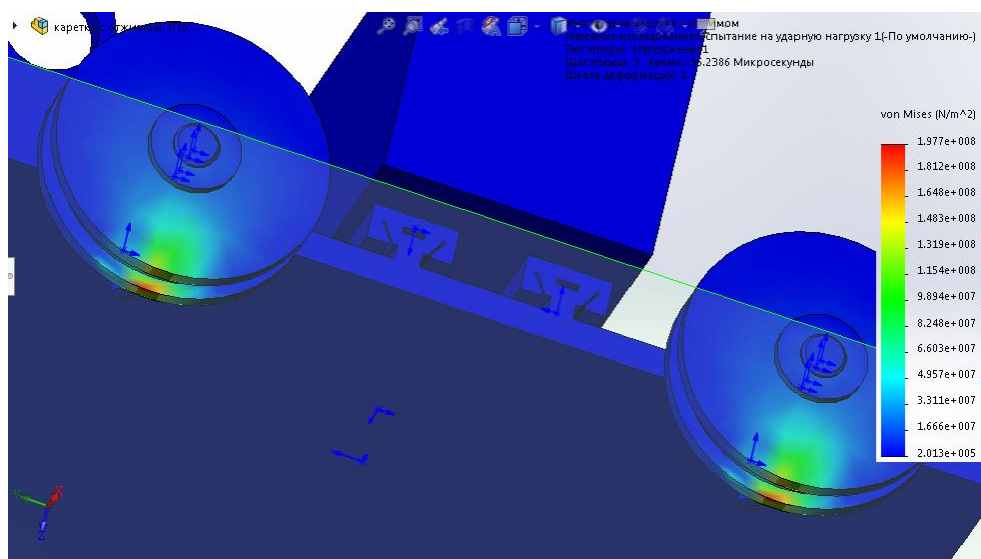


Рисунок 81 – Картина распределения напряжений в магнитных колесах

Для того чтобы оценить прочность данной конструкции, необходимо сравнить полученные расчетные напряжения с допускаемыми. Допускаемое напряжение – наибольшее напряжение, которое можно допустить в элементе конструкции при условии его безопасной, долговечной и надежной работы:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{[n]}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{пред}}$  – предельное напряжение (состояние), при котором конструкция перестает удовлетворять эксплуатационным требованиям.

Для конструкций из пластичных материалов, каким является сталь, при определении допускаемых напряжений используют предел текучести  $\sigma_T$ . Это связано с тем, что в случае его превышения деформации резко возрастают при незначительном увеличении нагрузки и конструкция перестает удовлетворять условиям эксплуатации. Допускаемое напряжение в этом случае определяют как:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{[n]}, \quad (6)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала;

$[n]$  – нормативный коэффициент запаса прочности.

Запас прочности – отношение предельно допустимой теоретической нагрузки к той нагрузке, при которой возможна безопасная работа конструкции с учетом случайных перегрузок, непредвиденных дефектов и недостоверности исходных данных для теоретических расчетов.

Нормативный коэффициент запаса прочности зависит от класса конструкции, намечаемого срока эксплуатации, условий эксплуатации, вида нагружения, неточности задания величины внешних нагрузок, неточности расчетных схем и приближенности методов расчета и других факторов.

Предел текучести стали 45 равняется  $\sigma_T = 355$  МПа. Исходя из этого, определяем допускаемое напряжение:

$$[\sigma] = \frac{355 \text{ МПа}}{1,3} = 273,1 \text{ МПа}.$$

Таким образом, полученные в результате выполнения программного динамического расчета напряжения (максимальное значение в опорных магнитопроводящих дисках составляет 197,7 МПа) не превышают допускаемого (273,1 МПа). Следовательно, ударная нагрузка от действия силы магнитного притяжения между кареткой и диагностируемым участком трубопровода не приведет к возникновению пластических деформаций в магнитных колесах и не повлияет на прочность конструкции в целом.



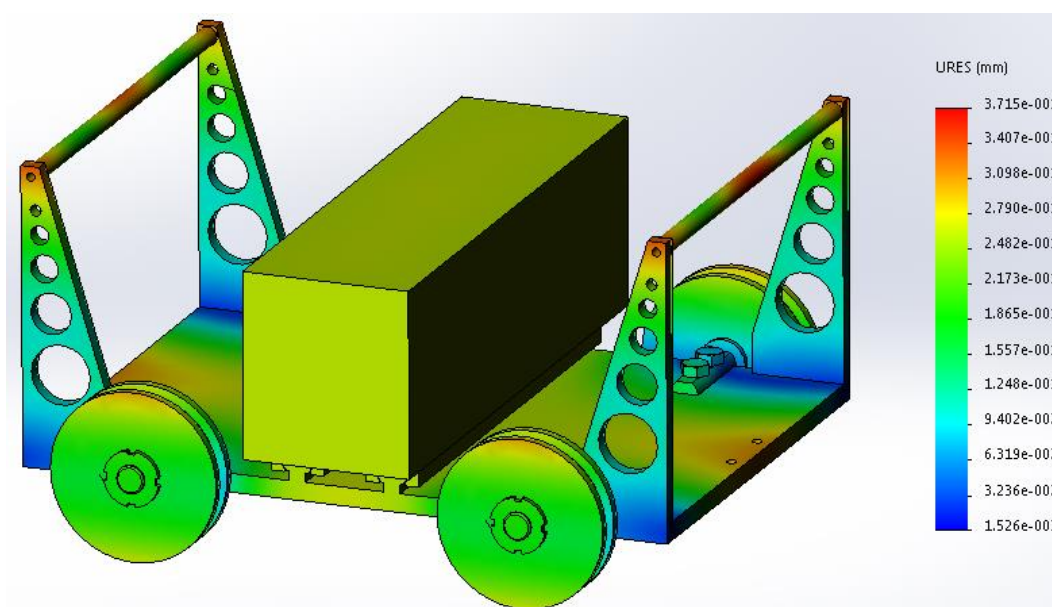


Рисунок 82 – Картина распределения перемещений

Незначительные перемещения, возникшие в каретке под действием ударной нагрузки, исходя из полученной в результате проведения заданного исследования картины распределения (рисунок 82), не оказывают влияния на надежность и работоспособность конструкции. Максимальное значение перемещения при ударе, в момент магнитного сцепления каретки с участком трубопровода, равняется 0,0037 мм.

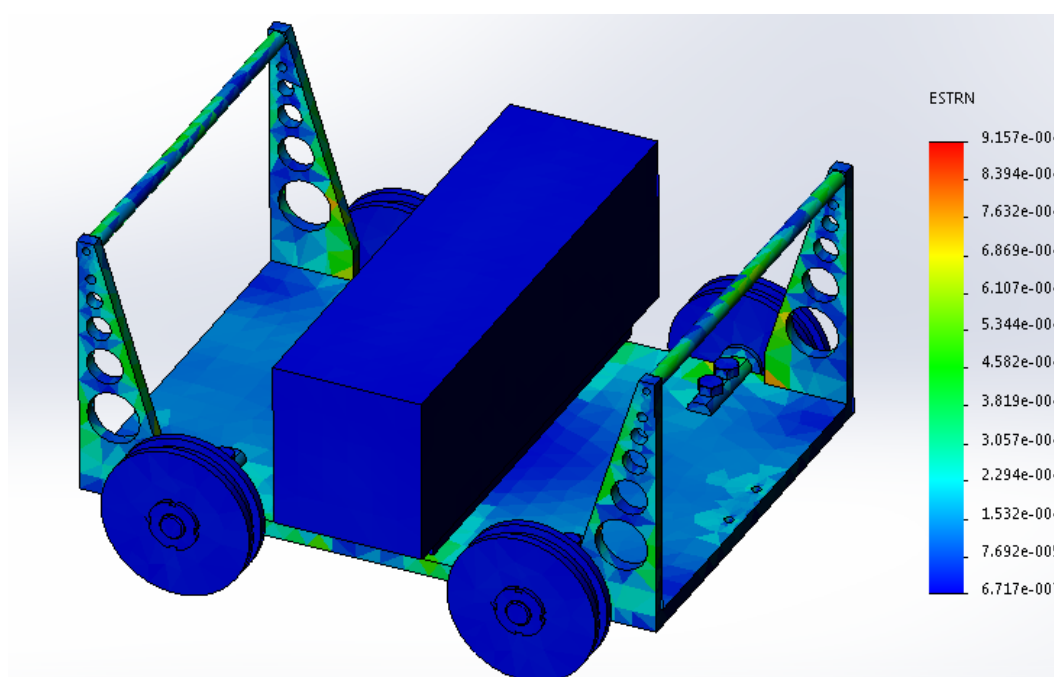


Рисунок 83 – Общая картина распределения деформаций



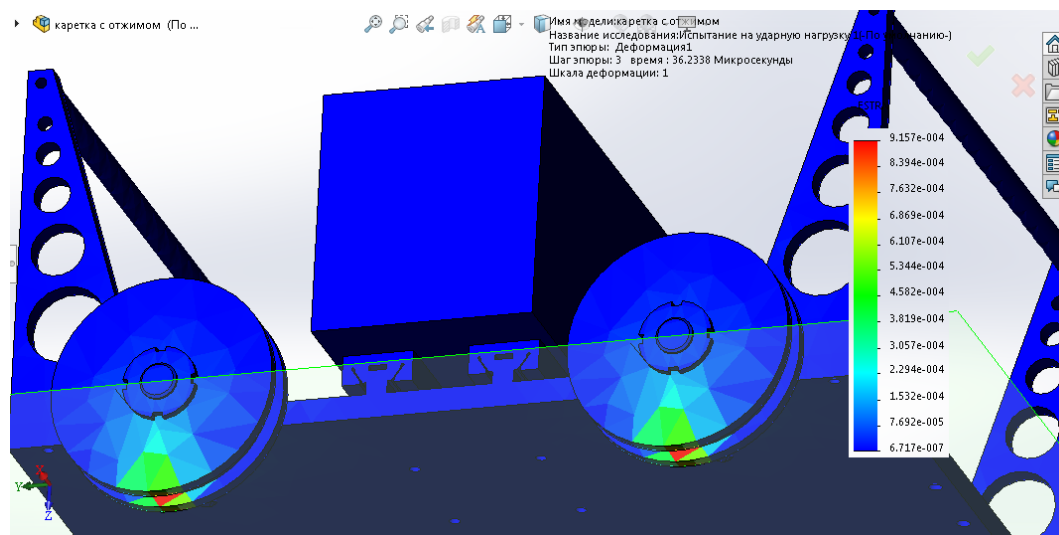


Рисунок 84 – Картина распределения деформаций в магнитных колесах

В результате анализа картин распределения деформаций (рисунок 83, 84), можно сделать вывод о том, что наибольшие деформации ( $\varepsilon = 9,2 \cdot 10^{-4}$ ) при ударе каретки возникают в магнитных колесах: в местах контакта опорных магнитопроводящих дисков с поверхностью трубопровода. Указанное максимальное значение является несущественным, так как не оказывает влияния на надежность и работоспособность конструкции при ее эксплуатации.

Таким образом, в результате решения поставленной динамической задачи, был проведен анализ напряженно-деформированного состояния разработанной трехмерной модели каретки детекторного модуля, который показывает, что расчетные напряжения в магнитных колесах и всей конструкции в целом не превышают допустимых. Максимальное напряжение (197,7 МПа) при ударе каретки возникает в местах контакта магнитных колес с поверхностью трубопровода, а именно в опорных магнитопроводящих дисках, которые, тем самым, изолируют хрупкий постоянный кольцевой магнит от действия ударной нагрузки. Расчетные деформации и перемещения, возникающие в конструкции под действием ударной нагрузки, являются незначительными, что свидетельствует об обеспечении прочности и жесткости конструкции.

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Для инженерной разработки очень важным параметром является её коммерческая ценность, которая объединяет в себя множество факторов и позволяет инвесторам оценить перспективность разработки, не углубляясь в её суть. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить коммерческий потенциал и перспективность проведения научных исследований;
- определить возможные альтернативы проведению научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- спланировать научно-исследовательскую работу;
- рассчитать бюджет затрат на исследования;
- произвести оценку научно-технического уровня исследований и оценку рисков.

Обеспечение надежной и безопасной эксплуатации магистральных трубопроводов является первоочередной задачей для нефтегазовых предприятий. Своевременное проведение мониторинга текущего технического состояния трубопроводов позволяет обнаруживать зарождающиеся и развивающиеся дефекты стенки трубопровода, определять остаточных ресурс трубопровода, тем самым предотвращать возникновение аварийных ситуаций и инцидентов, а также уменьшать затраты на ликвидацию последствий аварий.

Данная выпускная квалификационная работа предполагает на основе результатов компьютерного моделирования и проведенных программных расчетов разработку макета конструкции опорной каретки на магнитных колесах орбитально перемещающегося самоходного дефектоскопа для неразрушающего контроля кольцевых сварных соединений магистрального трубопровода рентгеновским методом.

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

К научно-исследовательским работам 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 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований**


### **5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование (таблица 6).

Таблица 6 – Карта сегментирования рынка

		Способ крепления самоходного дефектоскопа к трубопроводу		
		Без специальных приспособлений	Металлический пояс	Магнитные колеса
Размер компании	Крупные			
	Средние			
	Мелкие			

 – ПАО «Газпром нефть»;

 – ПАО «Татнефть»;

 – ООО «КомсомольскНефть».

Карта сегментирования рынка показывает, что при проведении неразрушающего контроля рентгеновским методом кольцевых сварных соединений трубопровода большинство компаний использует оборудование, позволяющее перемещать излучатель и рентгенографическую панель по специальным металлическим поясам (бандажам), охватывающим трубу в районе исследуемого шва. Такие схемы компоновки являются энергоэффективными, поскольку значительно снижают трудо- и энергозатраты при монтаже оборудования по сравнению со способом креплением без специальных приспособлений, также позволяют эксплуатировать источники излучения в оптимальном режиме. Использование пояса создает определенные сложности, так как, пояса обычно имеют определенную длину, соответствующую только одному типоразмеру трубы и для полноценного контроля необходимо иметь полный комплект поясов.

Конструкция опорной каретки самоходного дефектоскопа на основе магнитных колес позволяет орбитально перемещать диагностирующее оборудование без применения дополнительных опорных элементов (поясов, цепей, ремней), поскольку, механизм опирается непосредственно на трубу. Единственным ограничением является использование таких механизмов на трубах из ферромагнитных материалов.

Однако, такой тип крепления конструкции к трубопроводу практически не используется при рентгеновском методе неразрушающего контроля, а обычно применяется для проведения ультразвукового контроля, оборудование для которого отличается меньшими массогабаритными характеристиками по сравнению с рентгеновскими излучателями.

Поэтому разработка оптимальной конструкции опорной каретки на магнитных колесах орбитально перемещающегося самоходного дефектоскопа имеет важное значение и позволит усовершенствовать проведение неразрушающего контроля кольцевых сварных соединений магистрального трубопровода рентгеновским методом.

### **5.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты.

Таблица 7 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>Ф</sub>	Б <sub>К1</sub>	Б <sub>К2</sub>	К <sub>Ф</sub>	К <sub>К1</sub>	К <sub>К2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Простота конструкции	0,12	5	3	4	0,60	0,36	0,48
2. Универсальность использования	0,11	5	4	5	0,55	0,44	0,55
3. Надежность	0,11	5	4	4	0,55	0,44	0,44
4. Легкость установки	0,12	5	3	4	0,60	0,36	0,48
5. Скорость контроля	0,12	5	4	4	0,60	0,48	0,48
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Стоимость конструкции	0,12	5	4	4	0,60	0,48	0,48
3. Уровень проникновения на рынок	0,08	2	5	4	0,16	0,40	0,32
3. Себестоимость единичного контроля	0,11	5	4	4	0,55	0,44	0,44
4. Трудоемкость контроля	0,11	5	3	4	0,55	0,33	0,44
<b>Итого:</b>	<b>1</b>	42	34	37	4,76	3,73	4,11

Б<sub>Ф</sub> – крепление каретки детекторного модуля самоходного дефектоскопа к трубопроводу при помощи магнитных колес;

Б<sub>К1</sub> – крепление каретки детекторного модуля самоходного дефектоскопа к трубопроводу при помощи металлического пояса;

Б<sub>К2</sub> – крепление каретки детекторного модуля самоходного дефектоскопа к трубопроводу при помощи цепи.

Исходя из составленной оценочной карты, рассчитаем коэффициенты конкурентоспособности приведенных технических решений:

$$k_1 = \frac{K_{\Phi}}{K_{K1}} = \frac{4,76}{3,73} = 1,28; \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{K_{\Phi}}{K_{K2}} = \frac{4,76}{4,11} = 1,16. \quad (8)$$

В результате анализа конкурентных технических решений, можно сделать вывод о том, что каретка детекторного модуля на магнитных колесах обладает рядом существенных преимуществ (стоимость и простота конструкции, легкость установки, универсальность использования, высокая скорость контроля) по сравнению с конструкциями крепления оборудования при помощи металлического пояса или цепи.

### **5.1.3 SWOT-анализ**

SWOT-анализ представляет собой комплексный анализ инженерного проекта. Его применяют для того, чтобы перед организацией или менеджером проекта появилась отчетливая картина, состоящая из лучшей возможной информации и данных, а также сложилось понимание внешних сил, тенденций и подводных камней, в условиях которых научно-исследовательский проект будет реализовываться.

В первом этапе обычно описываются сильные и слабые стороны проекта, а также возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

*Сильные стороны научно-исследовательского проекта:*

С1. Простота конструкции (отсутствие дополнительных опорных элементов).

С2. Низкие трудо- и энергозатраты при монтаже оборудования.

С3. Невысокая стоимость конструкции.

*Слабые стороны научно-исследовательского проекта:*

Сл1. Затраты на дополнительные исследования.

Сл2. Ограничение, связанное с использованием конструкции только на трубах из ферромагнитных материалов.

*Возможности:*

В1. Появление дополнительного спроса.

В2. Прогнозируемый специалистами рост цен на нефть.

*Угрозы:*

У1. Широкое распространение конкурентных технологий.

У2. Развитие альтернативных нефти источников энергии.

После того как сформулированы четыре области SWOT переходим к реализации второго этапа.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Интерактивная матрица проекта представлена в таблице 8, таблице 9, таблице 10, таблице 11.

Таблица 8 – Интерактивная матрица возможностей и сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		C1	C2	C3
	B1	0	0	+
	B2	-	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выделить следующие сильно коррелирующие возможности и сильные стороны проекта: B1C3.

Таблица 9 – Интерактивная матрица возможностей и слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта			
Возможности проекта		Сл1	Сл2
	B1	+	-
	B2	0	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выделить следующие сильно коррелирующие возможности и слабые стороны проекта: B1Сл1.

Таблица 10 – Интерактивная матрица угроз и сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта				
Угрозы проекта		C1	C2	C3
	У1	-	+	+
	У2	0	0	0

При анализе данной интерактивной таблицы сильно коррелирующие угрозы и сильные стороны проекта: У1С2С3.



Таблица 11 – Интерактивная матрица угроз и слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта			
Угрозы проекта		Сл1	Сл2
	У1	-	-
	У2	+	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выделить следующие сильно коррелирующие угрозы и сильные стороны проекта: У2Сл1.

В рамках третьего этапа составляем итоговую матрицу SWOT-анализа (таблица 12).

Таблица 12 – Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> С1. Простота конструкции (отсутствие дополнительных опорных элементов). С2. Низкие трудо- и энергозатраты при монтаже оборудования. С3. Невысокая стоимость конструкции.	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> Сл1. Затраты на дополнительные исследования. Сл2. Ограничение, связанное с использованием конструкции только на трубах из ферромагнитных материалов.
<b>Возможности:</b> В1. Появление дополнительного спроса. В2. Прогнозируемый специалистами рост цен на нефть.	В1С3. 1. Выбирается стратегия минимизации затрат для повышения привлекательности планируемого товара для потребителей.	В1Сл1. 1. Положительный результат проведенных исследований может стать причиной дополнительного спроса на данный продукт в связи с преимуществами.
<b>Угрозы:</b> У1. Широкое распространение конкурентных технологий. У2. Развитие альтернативных нефти источников энергии.	У1С2С3. 1. Позиционирование товара с точки зрения его сильных сторон. 2. Использование преимуществ с целью повышения конкурентоспособности товара.	У2Сл1. 1. Поиск и реализация проекта в сфере деятельности, отличной от нефтегазовой.

## 5.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

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 устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе составим перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проведем распределение исполнителей по видам работ.

Работу выполняло два человека: руководитель проекта, исполнитель (студент). Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ работы	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель проекта
Выбор направления исследований	2	Календарное планирование работ по теме	Руководитель проекта, исполнитель
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель
	4	Проведение патентных исследований	Исполнитель

Продолжение таблицы 13

Теоретические и экспериментальные исследования	5	Выполнение магнитостатического расчета	Исполнитель
	6	Построение 3D-модели каретки детекторного модуля и проведение прочностного расчета	Исполнитель
Обобщение и оценка результатов	7	Анализ полученных результатов	Исполнитель
	8	Оценка результатов исследования	Руководитель проекта, исполнитель
Оформление отчета по НИР	9	Составление пояснительной записки	Руководитель проекта, исполнитель

### 5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

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

$$t_{ожи} = \frac{3t_{мини} + 2t_{маxi}}{5}, \quad (9)$$

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

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

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

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как

удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65%.

$$T_{pi} = \frac{t_{oji}}{ч_i}, \quad (10)$$

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

$t_{oji}$  – 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

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (11)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (12)$$

где  $T_{\text{кал}} = 365$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}} = 104$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 14$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48.$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  округляем до целого числа.

Все рассчитанные значения сведены в таблице 14.

Таблица 14 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях, $T_{ki}$
	$t_{min}$ , чел-дни	$t_{max}$ , чел-дни	$t_{ож}$ , чел-дни			
Составление и утверждение технического задания	1	3	1,8	Руководитель проекта	2	3
Календарное планирование работ по теме	1	3	1,8	Руководитель проекта, исполнитель	1	2
Подбор и изучение материалов по теме	10	15	12	Исполнитель	12	15
Проведение патентных исследований	3	6	4,2	Исполнитель	5	7
Выполнение магнитостатического расчета	8	16	11,2	Исполнитель	12	15
Построение 3D-модели и проведение прочностного расчета	10	20	14	Исполнитель	14	18
Анализ полученных результатов	1	2	1,4	Исполнитель	2	3
Оценка результатов исследования	4	8	5,6	Руководитель проекта, исполнитель	3	4
Составление пояснительной записки	10	20	14	Руководитель проекта, исполнитель	7	9

На основе таблицы 14 строим план график, представленный в таблице 15.

Таблица 15 – Календарный план график проведения НИР по теме

№ раб.	Вид работ	Испол- нители	$T_{ki}$ , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ											
				Фев.		Март			Апрель			Май			
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение тех. задания	Р	3	<div></div>											
2	Календарное планирование работ по теме	Р, И	2	<div></div>											

Продолжение таблицы 15

3	Подбор и изучение материалов по теме	И	15										
4	Проведение патентных исследований	И	7										
5	Выполнение магнитостатического расчета	И	15										
6	Построение 3D-модели и проведение прочностного расчета	И	18										
7	Анализ полученных результатов	И	3										
8	Оценка результатов исследования	Р, И	4										
9	Составление пояснительной записки	Р, И	9										

■ - руководитель проекта (Р);

□ - исполнитель (И).

### 5.3 Бюджет научно-технического исследования

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 научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

### 5.3.1 Прочие расходы

Материальные затраты и затраты на специальное оборудование в данном научно-техническом исследовании отсутствуют в связи с тем, что изготовление опытного образца не производится.

Для проведения научного исследования необходимо использование компьютера с установленным специальным программным обеспечением.

Затраты на покупку компьютера и специального программного обеспечения:

$$З = d_k + d_{по} = 25000 + 5000 = 30000 \text{ руб.}, \quad (13)$$

где  $d_k$  – стоимость компьютера;

$d_{по}$  – стоимость программного обеспечения.

Установка специального ПО для исследования и моделирования объекта производится бесплатно.

Таблица 16 – Прочие расходы

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед. руб.	Прочие расходы, (З <sub>пр</sub> ), руб.
Ручка	Шт.	4	40	160
Бумага	Шт.	200	3	600
Карандаш	Шт.	3	20	60
Итого:				820

### 5.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В данную статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, а также рабочих опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется на основе трудоемкости

выполняемых работ и действующей системы тарифных ставок и окладов. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20-30% от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы приведен в таблице 17.

Таблица 17 – Расчет основной заработной платы

№	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.
1	Составление и утверждение тех. задания	Руководитель проекта	1,8	1346	2422
2	Календарное планирование работ по теме	Руководитель проекта, исполнитель	1,8	1920	3456
3	Подбор и изучение материалов по	Исполнитель	12	574	6888
4	Проведение патентных исследований	Исполнитель	4,2	574	2410
5	Выполнение магнитостатического расчета	Исполнитель	11,2	574	6429
6	Построение 3D-модели и проведение прочностного расчета	Исполнитель	14	574	8036
7	Анализ полученных результатов	Исполнитель	1,4	574	804
8	Оценка результатов исследования	Руководитель проекта, исполнитель	5,6	1920	10752
9	Составление пояснительной записки	Руководитель проекта, исполнитель	14	1920	26880
Итого:					68077

Настоящая статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением научно-технического исследования, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (14)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – 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:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (15)$$

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

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{44447 \cdot 10,4}{216} = 2140 \text{ руб.}, \quad (16)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 18).

Таблица 18 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель проекта	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
- выходные	53	53
- праздничные	26	26
Потери рабочего времени:		
- отпуск	58	72
- невыходы по болезни	12	10
Действительный годовой фонд рабочего времени	216	204

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}}) \cdot k_p; \quad (17)$$

$$Z_m = 26300 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,3 = 44447 \text{ руб.},$$

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

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{тс}$ );

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

Тарифная заработная плата  $Z_{тс}$  находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда  $T_{ci} = 600$  руб. на тарифный коэффициент  $k_t$  и учитывается по единой для бюджетной организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии. Расчет основной заработной платы приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$ , руб.	$k_{пр}$	$k_p$	$Z_m$ , руб.	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{осн}$ , руб.
Руководитель проекта	26300	0,3	1,3	44447	2140	11	23540
Исполнитель	17000	0,3	1,3	28730	1465	51	74715
Итого $Z_{осн}$ :							98255

### 5.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}; \quad (18)$$

$$Z_{доп} = 0,12 \cdot 23540 = 2825 \text{ руб.};$$

$$Z_{доп} = 0,12 \cdot 74715 = 8966 \text{ руб.},$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12-0,15).

### 5.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}); \quad (19)$$

$$З_{внеб} = 0,271 \cdot (23540 + 2825) = 7145 \text{ руб.};$$

$$З_{внеб} = 0,271 \cdot (74715 + 8966) = 22678 \text{ руб.},$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского 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 20.

Таблица 20 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
	Исп. 1	
Руководитель проекта	23540	2825
Исполнитель	74715	8966
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Итого:	29823	

### **5.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта**

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

Таблица 21 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	98255	Пункт 4.3.3
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	11791	Пункт 4.3.4
3. Отчисления во внебюджетные фонды	29823	Пункт 4.3.5
4. Затраты на создание опытного образца	3700	Пункт 4.3.1
5. Прочие расходы	30820	Пункт 4.3.2
6. Бюджет затрат НТИ	174389	Сумма ст. 1-5

### **5.4 Определение ресурсоэффективности проекта**

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования.

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:

$$I_{\text{фин}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{174389}{174389} = 1, \quad (20)$$

где  $I_{\text{фин}}^{\text{исп } i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

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

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет высокое значение, что говорит об эффективности использования технического проекта.

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (21)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент разработки;

$b_i$  – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Таблица 22 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэф.	Магнитные колеса	Металлический пояс	Цепь
1. Простота конструкции	0,15	5	3	4
2. Универсальность использования	0,15	5	4	5
3. Надежность	0,15	5	4	4
4. Легкость установки	0,20	5	3	4
5. Скорость контроля	0,15	5	4	4
6. Срок службы	0,20	5	4	4
Итого:	1	5	3,65	4,15

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности для крепления конструкции каретки детекторного модуля при помощи:

1) магнитных колес:

$$I_{p1} = 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,20 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,20 \cdot 5 = 5;$$

2) металлического пояса:

$$I_{p2} = 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,20 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,20 \cdot 4 = 3,65;$$

3) цепи:

$$I_{p3} = 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,20 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,20 \cdot 4 = 4,15.$$

В результате полученных расчетов показателя ресурсоэффективности для различных конструкций опоры каретки детекторного модуля, исходя из значения наибольшего коэффициента интегральности, можно сделать вывод о том, что крепление оборудования к трубопроводу при помощи магнитных колес является эффективным и сохраняет высокую конкурентоспособность

В ходе выполнения данной части выпускной квалификационной работы была проанализирована конкурентоспособность разрабатываемой конструкции каретки детекторного модуля на основе магнитных колес орбитально перемещающегося самоходного дефектоскопа для неразрушающего контроля кольцевых сварных соединений магистрального трубопровода рентгеновским методом.

На основе сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта был проведен SWOT-анализ. Также был посчитан бюджет НИИ, равный 174389 руб., основная часть которого приходится на затраты по основной заработной плате исполнителей темы.

Данный раздел выполнялся на основе рекомендаций [17].

## **6 Социальная ответственность**

Трубопроводы являются важнейшим звеном в системе добычи и подготовки углеводородного сырья, поскольку осуществляют транспорт продукции, добываемой из нефтяных и газовых скважин, до пунктов переработки и доведения нефти и газа до товарных характеристик.

Обеспечение надежной и безопасной эксплуатации разветвленной системы трубопроводов является первоочередной задачей для нефтегазовых предприятий. Для осуществления комплексной оценки текущего технического состояния трубопроводов наряду с существующими методами неразрушающего контроля (НК) внедряются автоматизированные системы орбитального перемещения, применение которых позволит предотвратить возникновение аварийных ситуаций при эксплуатации системы промысловых трубопроводов и обеспечить безопасность транспорта добываемого сырья.

В данном разделе ВКР объектом исследования являются вредные и опасные факторы, которые могут возникнуть в результате проведения неразрушающего контроля трубопроводов рентгеновским методом дефектоскопии. Как наружные методы НК, так и внутритрубная дефектоскопия трубопроводов подразумевают взаимодействие специалистов и приборов с опасными производственными объектами, в связи с чем возникает необходимость в строгом нормировании условий труда, проведении мероприятий по уменьшению воздействий вредных и опасных факторов на специалистов НК и окружающую среду.

В данном разделе ВКР выполнен прогноз возможных негативных последствий производственной деятельности и охарактеризованы намеченные к реализации мероприятия для снижения негативного воздействия на компоненты окружающей среды, также проанализированы основные мероприятия, правила и требования соблюдения производственной и экологической безопасности при проведении диагностики трубопроводов.

## 6.1 Производственная безопасность

В таблице 23 представлен перечень опасных и вредных факторов, которые могут возникнуть при проведении диагностики трубопроводов методом рентгеновского неразрушающего контроля согласно ГОСТ 12.2.003-74 [28].

Таблица 23 – Опасные и вредные факторы при проведении диагностики трубопроводов

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74 [28])		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работы в ходе диагностирования: – Очистка внутренней полости трубопровода от инородных предметов; – Установка диагностирующего оборудования; – Извлечение диагностирующего устройства.	– Работа с токсичными и вредными веществами; – Повышенный уровень шума; – Отклонение показателей микроклимата в рабочей зоне; – Недостаточная освещенность рабочей зоны; – Повышенный уровень ионизирующего излучения.	– Движущиеся машины и механизмы; – Поражение электрическим током; – Оборудование и трубопроводы, работающие под давлением.	– ГН 2.2.5.552-96 [29]; – СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [30]; – ГОСТ 12.1.003-2014. ССБТ [31]; – ГОСТ 12.1.029-80. ССБТ [32]; – СанПиН 2.2.4.548-96 [33]; – СП 52.13330.2011 [34]; – ГОСТ 12.2.003-74 [35]; – ГОСТ Р 12.1.019-2009. ССБТ [36]; – ГОСТ 30852.19-2002 [37]; – ГОСТ 7512-82 [38].

### 6.1.1 Анализ вредных факторов, возможных при проведении диагностики трубопроводов и мероприятия по их устранению

#### *Работа с токсичными и вредными веществами*

При диагностировании трубопроводов в котловане при их эксплуатации возникает опасность выхода вредных веществ в воздух рабочей зоны из оборудования и трубопровода, что может привести к отравлению исполнителей ремонтных работ.

Согласно ГН 2.2.5.552-96 [29], предельно-допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, которые могут появиться при проведении диагностики трубопроводов, представлены в таблице 24.



Таблица 24 – Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

Наименование вещества	Величина ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности
Углеводороды алифатические предельные C <sub>1</sub> – C <sub>10</sub>	300	IV
Бензин – растворитель (в пересчете на углерод)	300	IV
Керосин (в пересчете на углерод)	300	IV
Сероводород в смеси с углеводородами C <sub>1</sub> – C <sub>2</sub>	3	II
Нефть сырая	10	III
Углекислый газ	9000	IV

Мероприятия по снижению негативного воздействия вредных веществ на персонал:

- исключение источников появления вредных веществ (соблюдение правил эксплуатации, противокоррозионная защита, своевременная замена уплотнений оборудования и запорной арматуры);
- применение газоанализаторов для контроля загазованности;
- применение принудительной вентиляции для снижения их концентрации в воздухе рабочей зоны;
- использование средств индивидуальной защиты (противогазы, респираторы, спецодежда, изолирующие костюмы, рукавицы, перчатки, очки, маски).

#### *Повышенный уровень шума*

Трубопроводы, в частности газоперекачивающие шлейфы-коллекторы D<sub>н</sub> > 530 мм, являются источниками производственного шума, который оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека и результат его работы. Длительное воздействие шума снижает остроту слуха, может являться причиной его потери, изменяет кровяное давление, ухудшает зрение, нарушает координацию движений.

Согласно ГОСТ 12.1.003-2014 [31], нормированный уровень шума – 80 дБ. Для снижения негативного влияния уровня шума в рабочей зоне производят

следующие мероприятия в соответствии с ГОСТ 12.1.029-80 [32]:

- замена или модернизация оборудования для исключения шумоопасных источников или снижения интенсивности шумов от них;
- установка эффективных глушителей;
- применение эффективной звукоизоляции, кожухов;
- использование средств индивидуальной защиты. Согласно инструкциям по технике безопасности предприятия применяются вкладыши, представляющие собой мягкие тампоны, пропитанные смесью парафина и воска, жесткие вкладыши из резины, звукоизолирующие наушники, звукоизолирующие шлемы.

#### *Отклонение показателей микроклимата в рабочей зоне*

Операторы автоматизированных рентгеновских систем производят управление устройствами в мобильных автолабораториях. Для обеспечения высокой работоспособности и сосредоточенности специалистов в автолабораториях должны соблюдаться необходимые показатели микроклимата, такие как относительная влажность, интенсивность теплового излучения от нагретых поверхностей, барометрическое давление, скорость движения и температура воздуха и т.д. Согласно СанПиН 2.2.4.548-96 [33], на рабочем месте должна поддерживаться температура от +21 до +23 °С в холодное время года и от +22 до +24 °С – в теплое. Относительная влажность должна находиться в пределах 40÷60%. Чтобы обеспечить оптимальное сочетание параметров микроклимата, используют системы вентиляции и отопления.

#### *Недостаточная освещенность рабочей зоны*

Уровень освещения влияет не только на функционирование зрительного аппарата специалиста, но и на его физическое и психоэмоциональное состояние. При чрезмерном или же недостаточном освещении значительно снижается работоспособность производителя диагностических работ в связи с ухудшениями условий труда. Так, согласно европейскому стандарту EN 13018:2001, перед проведением визуально-измерительного контроля участка

трубопровода должна быть обеспечена освещенность не менее 160 люкс для обзорного визуального контроля и не менее 500 люкс для локального визуального контроля.

Для компенсации недостаточной освещенности в светлое время суток используют комбинацию естественного и искусственного освещения, в темное время суток пользуются искусственным освещением согласно СП 52.13330.2011 [34]. В процессе идентификации обнаруженных дефектов и определения их параметров с применением методов НК используют источники местного освещения. Для этого применяются переносные светильники на аккумуляторе во взрывозащищенном исполнении.

#### *Повышенный уровень ионизирующего излучения*

При проведении радиографического контроля на строительстве магистральных трубопроводов во избежание поражения электрическим током и опасного воздействия на обслуживающий персонал ионизирующего излучения и вредных газов, образующихся в воздухе под действием излучения, необходимо строго соблюдать правила техники безопасности, установленные следующими нормативными документами:

- «Основными санитарными правилами работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений» (ОСП-72/80);
- «Нормами радиационной безопасности» (НРБ-76);
- «Правилами безопасности при транспортировке радиоактивных веществ» (ПБТРВ-73);
- «Санитарными правилами по радиоизотопной дефектоскопии» № 1177-74;
- «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей»;
- «Правилам техники безопасности при строительстве магистральных трубопроводов»;
- «Инструкцией по безопасному проведению работ при

радиоизотопной дефектоскопии в организациях и на предприятиях Миннефтегазстроя» (ВСН 2-88-77 Миннефтегазстрой);

Основные требования безопасности при производстве работ по радиографическому контролю приведены ниже.

Организации, где постоянно проводятся работы по радиографическому контролю, должны иметь разрешение на право производства данного вида работ, которое выдается местными органами санитарного надзора.

Помещения для радиографического контроля (в том числе дефектоскопические лаборатории), хранилища для радиоактивных веществ должны быть оборудованы согласно «Основным санитарным правилам работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений» ОСП 72/80 и «Санитарным правилам по радиоизотопной дефектоскопии» № 1174-74.

Радиографический контроль и перезарядка радиоактивных источников должны проводиться с использованием специально предназначенной для этих целей и находящейся в исправном состоянии аппаратуры.

До начала эксплуатации рентгеновских аппаратов и гамма-дефектоскопов администрация организации (предприятия) обязана на основе ОСП-72/80 и НРБ-76 разработать инструкции по радиационной безопасности, устанавливающие действие персонала, порядок проведения работ по радиоизотопной дефектоскопии, учета, хранения и выдачи источников излучения, содержания помещений и т.д.

К работе по проведению радиографического контроля допускаются лица, прошедшие специальный медицинский осмотр, инструктаж по технике безопасности и сдавшие экзамен по безопасному ведению работ в установленном порядке.

Лица, временно привлекаемые к работам, связанным с использованием рентгеновских аппаратов гамма-дефектоскопов, должны быть обучены правилам безопасности при работе с источниками ионизирующего излучения и допущены по медицинским показаниям.

Периодическая проверка знаний обслуживающим персоналом инструкций по технике безопасности и радиационной безопасности должна производиться не реже одного раза в год одновременно с периодическими проверками квалификации персонала.

Все имеющиеся в наличии рентгеновские аппараты и гамма-дефектоскопы, поступившие на предприятие, должны регистрироваться в соответствии с ОСП-72/80.

К моменту получения рентгеновских аппаратов, гамма-дефектоскопов администрация должна назначить ответственное лицо, следящее за учетом, хранением и врачей этого оборудования, а также назначить ответственного за радиационную безопасность и электробезопасность.

Перезарядка гамма-дефектоскопов (перемещение держателей с источниками из транспортно-перезарядных контейнеров в радиационные головки и обратно) должна производиться в соответствии с требованиями ОСП-72/80 в специальных помещениях при наличии штатных дистанционных приспособлений заводского изготовления.

Хранение и перезарядка гамма-дефектоскопов с источниками вне специально оборудованных мест запрещается.

Переносные гамма-дефектоскопа следует хранить в специальных помещениях-хранилищах, которые закрываются под ключ и опечатываются.

Независимо от типа источника излучения и вида защиты предельно допустимая доза облучения в местах нахождения рабочего персонала не должна превышать величин, установленных НРБ-76.

В организациях, где проводятся работы с применением источников ионизирующего излучения, должен осуществляться дозиметрический контроль, который обеспечивает соблюдение норм радиационной безопасности и получение информации о дозе облучения персонала.

Данные радиационного контроля записывают в специальный журнал.

Индивидуальный контроль за дозой внешнего облучения ведется с помощью индивидуальных дозиметров.

При проверке принимаются наибольшие показания дозиметров.

Данные о дозах облучения (переоблучения) персонала и эффективности средств защиты необходимо немедленно сообщить органам местной СЭС и администрации организации, а также контролирующему санитарному врачу (по его требованию) для принятия мер к уменьшению доз облучения.

При аварийных ситуациях, когда произошло переоблучение работающих, дозу облучения  $D$  можно рассчитать по формуле:

$$D = \frac{8,4 \cdot M \cdot t}{r^2}, \quad (22)$$

где  $D$  – доза облучения, бэр;

$M$  – гамма-эквивалент изотопа, мг-экв. радия;

$t$  – время облучения, ч;

$r$  – расстояние от источника, см.

Квартальная предельная допустимая доза облучения составляет 3 бэра. При этом допускается увеличение дозы облучения кистей рук в 5 раз.

Предельно допустимая доза облучения дефектоскописта установлена 5 бэр в год, но не более 3 бэр за квартал [38].

### **6.1.2 Анализ опасных факторов, возможных при проведении диагностики трубопроводов и мероприятия по их устранению**

#### *Движущиеся машины и механизмы*

В процессе установки внутритрубного снаряда-дефектоскопа возможен производственный травматизм рабочей бригады вследствие подвижных частей производственного оборудования, перемещений оборудования при монтаже и демонтаже, острых кромок и заусенцев на поверхностях оборудования, использования подъемных кранов для подачи дефектоскопа в камеру пуска и приема средств очистки и диагностики и т.д. Требования, предъявляемые к производственному оборудованию, подробно описаны в ГОСТ 12.2.003-74 [35].

Для предотвращения производственного травматизма рабочий персонал должен знать и соблюдать технику безопасности при работе с нефтегазовым оборудованием, а также быть обеспеченным необходимыми средствами

индивидуальной защиты: рабочая одежда, перчатки, каски и т.д.

### *Поражение электрическим током*

Источниками поражения от электрического тока при диагностике трубопроводов являются электрические приводы для подачи питания на дефектоскопические приборы и устройства.

Причины поражения электрическим током: прикосновение к токоведущим элементам, ошибочные действия персонала, нарушение изоляции токоведущих элементов, метеорологические условия (удар молнии) и аварийные ситуации. Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока проявляются в виде электротравм и профессиональных заболеваний. Требования, предъявляемые к электробезопасности производственных процессов, подробно описаны в ГОСТ Р 12.1.019.2009 [36].

Предупреждение электротравматизма на объектах достигается выполнением следующих мероприятий согласно ГОСТ 30852.19-2002 [37]:

- применение защитного зануления, защитного заземления, защитного отключения;
- обеспечение изоляции, ограждение и недоступность электрических цепей;
- использование предупредительных плакатов и знаков безопасности;
- установка молниеотводов;
- проведение инструктажей и обучения персонала безопасным методам работы с электроприборами;
- использование средств индивидуальной защиты: диэлектрических перчаток и бот, диэлектрических резиновых ковриков, инструментов с изолированными ручками.

### *Оборудование и трубопроводы, работающие под давлением*

При диагностировании дефектных участков трубопровода, находящегося в эксплуатации, основной опасностью является возможное разрушение трубопровода под действием транспортируемой продукции. Следствием аварии могут стать пожар, гибель людей, приведение оборудования в негодное

состояние, утечка транспортируемого продукта, что также негативно отразится на окружающей среде.

Для предотвращения возникновения аварийных ситуаций и инцидентов проводят комплексное диагностирование технического состояния трубопроводов с целью обнаружения дефектов геометрии труб, потери металла и трещин в сварных швах. В случае аварии трубопровод должен быть немедленно остановлен и отключен до обнаружения причины аварии и ее устранения аварийной бригадой.

## **6.2 Экологическая безопасность**

### *Воздействия объекта на атмосферу*

Перекачиваемое по трубопроводам углеводородное сырье и иные загрязняющие вещества, содержащиеся в скважинной продукции, могут попадать в атмосферу в результате образования сквозных отверстий, свищей в теле трубопровода и выхода транспортируемой продукции в окружающую среду. Также загрязнение атмосферы происходит при плановых остановках объектов подготовки нефти и газа и опорожнение технологических трубопроводов.

Для защиты атмосферы от негативного воздействия токсичный и загрязняющих веществ проводятся следующие мероприятия:

- проверка оборудования на прочность и герметичность;
- неукоснительное соблюдение согласованных технологических режимов работы оборудования;
- своевременная замена уплотнений оборудования и запорной арматуры;
- проведение диагностики трубопроводов на наличие утечек и их устранение.

### *Воздействия объекта на гидросферу*

В процессе идентификации дефектов по результатам диагностического обследования трубопроводов возможен выход скважинной продукции в



грунтовые воды, либо водный объект, если авария произошла на подводном переходе.

Для предотвращения аварийных ситуаций и загрязнения гидросферы подводные переходы и трубопровод в целом должен быть продиагностирован методами внутритрубной дефектоскопии, с применения водолазных дефектоскопических работ и при помощи самодвижущихся робототехнических систем.

#### *Воздействия объекта на литосферу*

При подготовке трубопроводов к пропуску внутритрубных дефектоскопических снарядов производят очистку внутренней полости трубопровода с применением очистных скребков. После пропуска очистных скребков в камеру приема очистных средств поступают внутритрубные отложения (например, парафины, механические примеси, продукты коррозии и т.д.), которые являются возможным источником загрязнения литосферы. Также в результате ремонтных работ образуется большое количество отходов производства.

Поэтому для защиты литосферы от загрязнения все отходы подлежат селективному сбору и последующей утилизации в соответствии с руководящей документацией.

#### *Анализ воздействия на селитебную зону*

Нефтегазовые трубопроводы являются опасными производственными объектами, которые должны располагаться на некотором удалении от жилых зон и объектов жизнедеятельности населения с целью обеспечения безопасной эксплуатации трубопровода и минимизации последствий в случае аварийной ситуации или инцидента.

Согласно ГОСТ Р 55990-2014 [39], на этапе проектирования трасса трубопровода должна быть расположена на удалении не менее (при номинальном диаметре не более 300 мм):

- 150 м от населенных пунктов, предприятий и отдельных жилых зданий;

- 240 м от железнодорожных и автобусных станций и мостов;
- 150 м от автомобильных и железных дорог общего пользования.

Также для обеспечения безопасности и целостности трубопровода назначается охранная зона по 25 метров в каждую сторону относительно оси трубопровода. На оси трубопровода устанавливаются специальные информационные и запрещающие таблички на ответственных участках трассы.

### **6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

При проведении технического диагностирования трубопроводов вероятными источниками возникновения чрезвычайных ситуаций являются:

- обнаруженные критические дефекты;
- прекращение движения очистных устройств и дефектоскопических снарядов в трубопроводе вследствие заклинивания, уменьшении проходного сечения или иных причин;
- действий специалиста, несоответствующих инструкции производства работ.

Рассмотренные выше источники техногенного характера способны привести к чрезвычайным ситуациям, таким как аварии, инциденты, пожары, несчастные случаи с летальным исходом и т.д.

Для уменьшения вероятности возникновения чрезвычайной ситуации проводятся следующие мероприятия:

1. При проведении ремонтных или дефектоскопических работ исполнители должны неукоснительно соблюдать правила и требования по работе с оборудованием и приборами, а также использовать газоанализатор для определения концентрации углеводородов в рабочей зоне; при превышении ПДК работники должны покинуть место работы до устранения причин повышения загазованности.

2. При обнаружении критического дефекта по результатам внутритрубной диагностики, способного вызвать аварию, необходимо прекратить эксплуатацию до восстановления работоспособного состояния

трубопровода.

3. Качественное проведения подготовительных мероприятий для обеспечения беспрепятственного прохождения внутритрубных инспекционных снарядов.

#### **6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Согласно ПБ 03-440-02 «Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля» [40], к проведению НК опасных производственных объектов допускаются лица, достигшие 18-летнего возраста, которые прошли медицинский осмотр и не имеют противопоказаний, и аттестованные по одному из трех уровней квалификации в независимых органах по аттестации персонала системы НК.

В соответствии с федеральным законом РФ от 28.12.2013 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда», специалисты НК сталкиваются с вредными условиями труда [41].

Компенсация за вредные условия труда и ее размер устанавливается на основании статей трудового кодекса, коллективного договора или иных внутренних документов предприятия. Законодательством предусмотрено, что люди, работающие в опасных условиях, могут получать такие гарантии и компенсации [41]:

- уменьшение количества рабочих часов до 36 часов в неделю и меньше (в зависимости от режима работы – вахтовый, постоянный);
- оплачиваемый отпуск, являющийся дополнительным и предоставляемым каждый год (не меньше 7 календарных дней);
- надбавка за вредность в размере не меньше 4% от оклада;
- бесплатное лечение и оздоровление;
- выдача спецодежды и средств индивидуальной защиты.

Поскольку проведение НК осуществляется непосредственно на дефектном участке трубопровода, организация рабочей зоны выполняется в ходе подготовительных работ. При работе в котловане специалист НК обязан

убедиться в качестве выполненных земляных работ и проверить наличие загазованности в воздухе рабочей зоны. Должен быть обеспечен удобный доступ к диагностируемому участку трубопровода.

Организация рабочей зоны зависит от применяемого метода НК, количества исполнителей работ и иных факторов.

## Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы, связанной с разработкой рекомендаций по использованию метода фиксации подвижной платформы для транспортировки детектора ионизирующего излучения с помощью магнитных колес, для оценки усилия прижатия был проведен магнитостатический расчет в программном комплексе ELCUT на основе созданной модели.

В результате чего были построены графики зависимости пондеромоторной силы от изменения различных геометрических параметров магнитных колес: изменения толщины опорных дисков-магнитопроводов; изменения толщины постоянного кольцевого магнита; изменения диаметра постоянного кольцевого магнита; изменения зазора между магнитом и трубопроводом. Также, оценено влияние увеличения количества магнитов (использование двух, трех, четырех аксиально намагниченных постоянных кольцевых магнитов) в одной компоновке магнитного колеса на притягивающее усилие.

Таким образом, согласно результатам проведенного анализа построенных графиков зависимости пондеромоторной силы от изменения различных параметров, для обеспечения необходимого усилия прижатия разрабатываемой конструкции каретки детекторного модуля к диагностируемому участку трубопровода, были выбраны магнитные колеса со следующими геометрическими характеристиками: диаметр магнита  $D_m = 80$  мм, толщина магнита  $s_m = 10$  мм, диаметр опорных магнитопроводящих дисков  $D_d = 90$  мм, толщина опорных магнитопроводящих дисков  $s_d = 5$  мм.

Результат выполнения магнитостатического исследования показал, что предложенная конструкция магнитного колеса с указанными геометрическими характеристиками обеспечивает усилие магнитного прижатия каретки детекторного модуля к диагностируемому участку трубопровод порядка 450 Н на одно колесо.

Для оценки надежности элементов конструкции магнитного колеса с точки зрения динамического воздействия при монтаже оборудования на стальную трубу было проведено испытание разработанной трехмерной модели каретки детекторного модуля на ударную нагрузку в программном комплексе SolidWorks, результатом которого являются картины распределения напряжений, перемещений и деформаций.

Нагрузка в виде силы магнитного прижатия, характеризующая ударный процесс, была задана через скорость каретки  $V$  в момент удара и ускорение свободного падения  $g$ .

Таким образом, в результате решения поставленной динамической задачи, был проведен анализ напряженно-деформированного состояния разработанной трехмерной модели каретки детекторного модуля, который показал, что расчетные напряжения в постоянных кольцевых магнитах являются минимальными, а во всей конструкции в целом не превышают допускаемых. Максимальное напряжение (197,7 МПа) при ударе каретки возникает в местах контакта магнитных колес с поверхностью трубопровода, а именно в опорных магнитопроводящих дисках, которые, тем самым, изолируют хрупкий магнит от действия ударной нагрузки. Расчетные деформации и перемещения, возникающие в конструкции под действием ударной нагрузки, являются незначительными, что свидетельствует об обеспечении прочности и жесткости конструкции.

## **Список используемых источников**

1. Богданов Е.А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: учебное пособие для вузов, Е.А. Богданов. – М.: Высшая школа, 2006. – 279 с.
2. Маслов Б.Г. Неразрушающий контроль сварных соединений и изделий в машиностроении: учебное пособие, Б.Г. Маслов. – М.: Академия, 2008. – 272 с.
3. Ключев В.В. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т., В.В. Ключев. – 2-е издание, переработанное и исправленное. – М.: Машиностроение, 2006-2008.
4. Ермолов И.Н., Ермолов М.И. Ультразвуковой контроль. Учебник для специалистов первого и второго уровня квалификации. Издание пятое, стереотипное. – М.: Высшая школа, 2006. – 208 с.
5. Назипов Р.А., Храмов А.С., Зарипова Л.Д. Основы радиационного неразрушающего контроля. Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета. – Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008. – 66 с.: ил.
6. РД-08.00-60.30.00-КТН-046-1-05. Неразрушающий контроль сварных соединений при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов.
7. Труды сессии РАН и деловой программы форума «Территория NDT 2016» / Сборник научных трудов. – М.: Спектр, 2016. – 308 с.: ил.
8. Ермолов И.Н., Останин Ю.Я. Методы и средства неразрушающего контроля качества: учеб. пособие для инженерно-техн. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 368 с.
9. Ермолов И.Л., Мор Ф.Р., Подураев Ю.В., Шведов В.В. Мобильные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов: современное состояние и перспективы развития. Мехатроника. – М.: Высшая школа, 2000.
10. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей

эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. – М.: Машиностроение, 1999. – 163 с.

11. Пархоменко П.П., Сагомоян Е.С. Основы технической диагностики. – М.: Энергоиздат, 1981. – 308 с.

12. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

13. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия – М.: Metallurgy, 1985. – 256 с.

14. Самоходные импульсные рентгеновские аппараты. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spectroflash.ru/info/articles/288/299/>.

15. Березин В.Л. Сварка трубопроводов и конструкций. – М.: Недра, 1983. – 328 с.

16. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. Т. 1 – 8-е изд., перераб. и доп. Под редакцией И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.: ил.

17. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.

18. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения.

19. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.

20. ГОСТ 21105-87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.

21. ГОСТ 24034-80. Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения.

22. ГОСТ 23764-79. Гамма-дефектоскопы. Общие технические условия.

23. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.



24. ГОСТ Р 54907-2012. Техническое диагностирование. Основные положения.
25. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
26. РД 03-606-03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю.
27. РД 51-2-97. Инструкция по внутритрубной инспекции трубопроводных систем.
28. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
29. ГН 2.2.5.552-96. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы.
30. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.
31. ГОСТ 12.1.003-2014. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
32. ГОСТ 12.1.029-80. ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.
33. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
34. СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение.
35. ГОСТ 12.2.003-74. ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
36. ГОСТ Р 12.1.019-2009. ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
37. ГОСТ 30852.19-2002. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 20. Данные по горючим газам и парам, относящиеся к эксплуатации электрооборудования.
38. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод.

39. ГОСТ Р 55990-2014. Месторождения нефтяные и газонефтяные. Промысловые трубопроводы. Нормы проектирования.

40. ПБ 03-440-02. Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля.

41. Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда».

## Приложение А

### Раздел №2

#### Техническая диагностика трубопроводов методами неразрушающего контроля

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ74	Курнашов Сергей Игоревич		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Бекишева Т.Г.			

## **Technical diagnostics of pipelines**

Various external and internal impacts occur under operating conditions. As a result, material degradation, corrosion damage, cracks that occur on the surfaces of pipes and other types of defects grow and develop. Despite the fact that the design of pipelines with the use of codes and technologies, development and implementation must ensure the use of the assigned resource, to eliminate the possibility of such defects cannot be achieved. In order to avoid serious consequences of growing defects, various studies are carried out; methods of non-destructive testing are applied.

The most universal method of non-destructive testing, which is used in almost all stages of the manufacture of products, is visual and measurement control.

Visually, the measuring control of objects (blanks, parts, semi-finished products) and welded joints is carried out at the following stages:

- input control;
- preparation of parts and assembly units for assembly;
- assembly of parts and assembly units for welding;
- welding process;
- control of finished welded joints and surfacing;
- post-repair stage;
- assessments of the state of the material and welded joints during the operation of technical devices and structures, including after the expiration of the established period of their operation.

A leak is a through defect in a welded joint or structure of an object, the size of which serves to exit the product to the outside. As for defects, they are divided into primary and secondary defects. Primary defects are formed during the formation of a weld; these include fistulas – through pores, elongated in the type of channels, hot cracks and lack of penetration with slag inclusions. Secondary defects are those that appear after some time after welding – fatigue and cold cracks, or, for example, fistula, formed under the influence of aggressive environment or dynamic load.

The method of leak detection is based on the use of a test or control substance as a working product, with the help of which a leak is detected and registered.

The minimum diameter of detectable channels in millimeters determines the degree of sensitivity of the method.

The passage of a liquid or gas through a leak obeys the laws of hydrostatics and hydrodynamics. In this case, the viscosity and molecular weight of the control (trial) substance should be taken into account, since the average diameters of the leak channels are very small.

Various gases and liquids are used as a test substance in various methods. The used gases are: air, nitrogen, helium, halides, ammonia, carbon dioxide, or mixtures of these gases. Control liquids are: water, kerosene, solutions, penetrants and others.

The method of non-destructive testing based on registration of changes in the interaction of the controlled object and the electromagnetic field is called magnetic. For the purposes of the method, an extensive spectrum of electromagnetic fields is used, ranging from constant electric and magnetic fields to alternating fields with a frequency of tens of MHz.

Using this method, surface and subsurface defects of welded joints are determined, which include discontinuities at a depth of up to 10 mm – incomplete penetration, cracks, gas pores, and slag inclusions.

Information on the presence of defects is obtained by registering and analyzing magnetic stray fields arising above the locations of defects.

The possibility of using magnetic methods to control ferromagnetic materials is based on their properties. In a normal state, in a product made of ferromagnetic material, there are spontaneously magnetized regions arranged in different ways – domains whose fields in this case compensate each other and the resulting magnetic field of the product is equal to zero. Under the influence of the magnetic field, the domains are oriented in the direction of this field, summed up and the part is magnetized. Figure 1 shows the hysteresis loop, which characterizes the magnetization process.

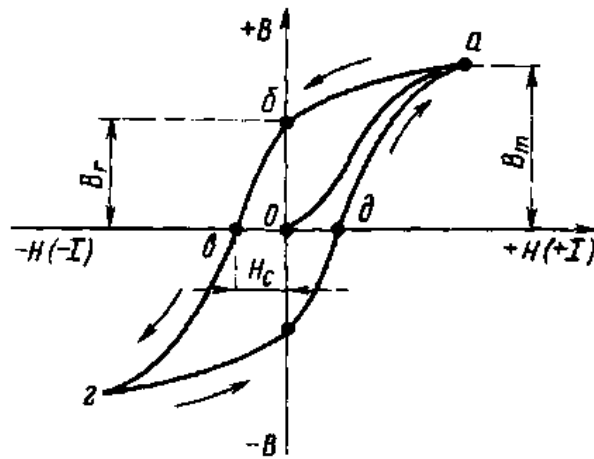


Figure 1 – Hysteresis loop

The magnetic flux in the body of a ferromagnetic material spreads uniformly over the cross section, in case if the material has a solid structure and its magnetic permeability is constant.

The continuity of the material is broken in those places where defects are localized. The resistance exerted by the magnetic flux from the side of the medium with defects is many times greater, therefore the flow is deflected as if flows around the defect. At this point, the magnetic field thickens and partially extends beyond the limits of the products, spreads through the air, and then enters the product back after the defect. This phenomenon is depicted in figure 2. In those places where the magnetic flux comes from and where it enters, magnetic poles are formed, which also remain after the removal of the magnetizing field due to residual magnetization.

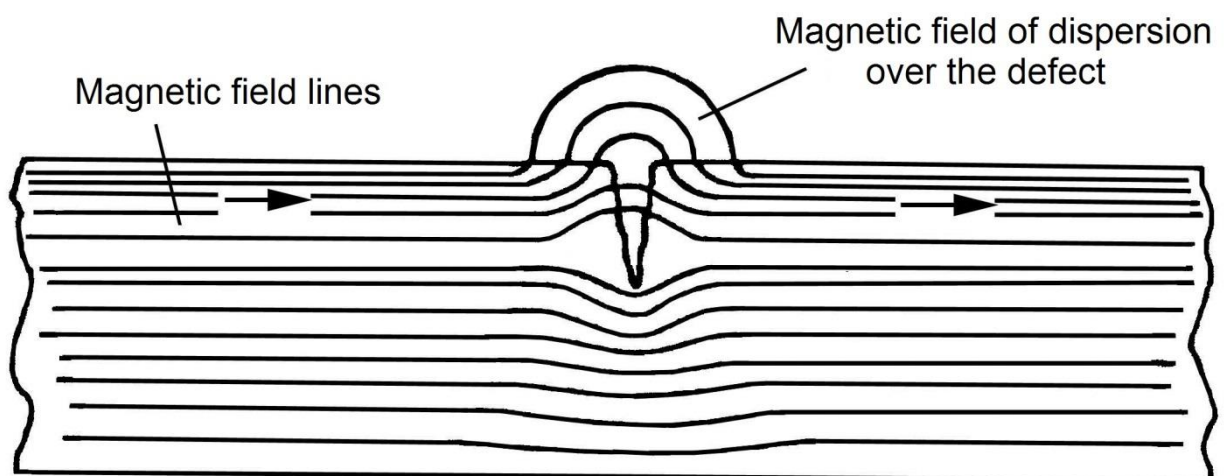


Figure 2 – Power lines in the object with a defect

The magnetic field arising above the defect is called the stray field. If the defect is located perpendicular to the direction of the magnetic flux, then the scattering effect is maximal. Therefore, controlled welded joints are magnetized both in the longitudinal and transverse directions relative to the axis of the seam. This approach allows you to identify defects located both along and across the seam, as well as located at a small angle to it.

Thus, the control by magnetic methods consists in detecting stray fields formed by defects, deciphering the nature and magnitude of the detected defects. Magnetic control methods are classified by registering methods, of which there are more than six: magnetic particle, magnetic, magnetic ferrite, induction and magnetic semiconductor. In distribution in the field of non-destructive testing of welded joints only two methods found its greatest use: magnetic particle, magnetic.

To identify surface defects such as micro cracks and cracks, a capillary control method is used. Such defects come to the surface of the product, they also include narrow incomplete penetration and small surface pores that are difficult to detect during an external examination.

In particular, this method of non-destructive testing is important for detecting defects in critical welded joints from heat-resistant, austenitic stainless and heat-resistant steels, aluminum, brass, whose properties are limited by the possibility of using other methods.

Surface defects of microscopic opening and microscopic extent (with a ratio of not more than 1:10) have the properties of capillaries. In accordance with this, and the method by which they detect such defects is called capillary.

The capillary method is based on the ability of the indicator fluid to penetrate into the cavity of surface and through defects of the material of the test objects. After penetration of the indicator fluid, indicator traces are obtained by visual means or by means of transducers.

The method is used to identify surface and end-to-end discontinuities in the test object, as well as to be able to determine their length, orientation, and location on the surface (for defects such as cracks that have a length).

By changing the contrast of the background and the image of surface defects, defects are detected. For this purpose, special light-contrast and color-contrast indicator fluid – penetrants are used.

A penetrant is applied to the previously cleaned surface from contamination, and then it is kept for some time in order to allow the liquid to fill the defect cavity. Next, the excess indicator liquid is removed and manifesting composition is applied. The liquid that remains inside the defect forms a pattern, over time, at the background according to which the presence of a defect can be considered. The main stages of the control by the capillary method are shown in figure 3.

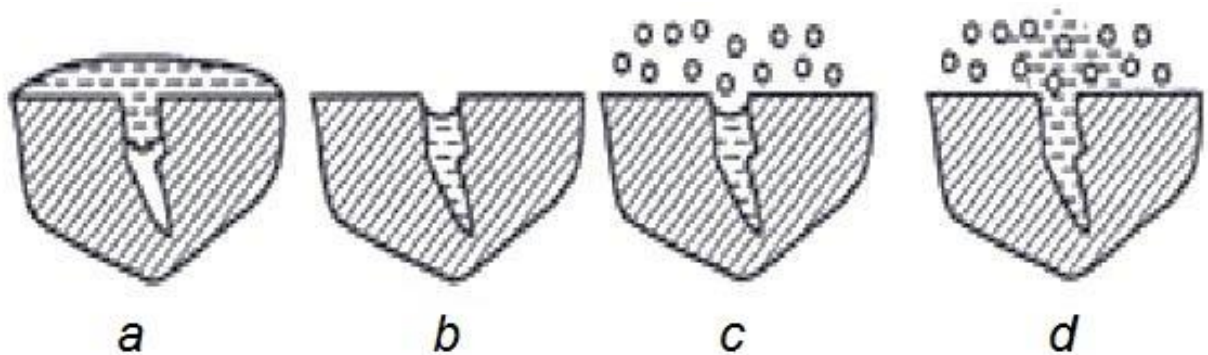


Figure 3 – Stages of capillary control: *a* – application of indicator liquid; *b* – removal of excess; *c* – application of the formulation; *d* – the formation of stains at the site of defects

### **Ultrasonic method**

One of the most widely used methods for detecting internal defects in welds is ultrasonic method. This method is based on the ability of ultrasonic waves to penetrate into materials, to be reflected and refracted when two materials with different sound permeability fall on the interface.

Using ultrasound, it is possible to detect internal macroscopic defects in casting, forgings, welding (cracks, shells, slag inclusions, gas pores, lack of penetration, etc.).

Ultrasound is elastic mechanical oscillations of medium particles whose frequency is located outside the audible range, i.e. from 20 kHz to 500 MHz.



Ultrasonic waves can be obtained by mechanical, thermal, piezoelectric and other methods. In ultrasonic flaw detection of metals and welded joints, a piezoelectric method of ultrasound is more often used.

Some natural crystals, for example, quartz, tourmaline, Rochelle salt, and others have a piezoelectric effect. The essence of the piezoelectric effect is that if a plate is cut from these crystals in a certain way, then when a plate is compressed or stretched, an electric charge appears on its surface: positive on one side and negative on the other one. For uniform distribution of electric charges on the surface of the crystals, they are carefully grind, polished and coated with metal.

If elastic mechanical oscillations (ultrasonic waves) affect the piezoelectric-crystal plate, an alternating electrical voltage arises at its electrodes with a frequency of ultrasonic vibrations acting on it. The piezoelectric effect is reversible, i.e. if an alternating voltage is applied to the plate cut from the crystal, it begins to oscillate with the frequency of the applied voltage. If the frequency of the applied voltage is higher than 20 kHz, then the plate, oscillating, will emit ultrasonic waves, and their direction is perpendicular to the surface to which the voltage is applied. In the first case, this is called direct, and in the second, the reverse piezoelectric effect. Due to the complexity of processing, natural crystals in ultrasonic flaw detection are replaced by artificial ones, which are made by pressing and sintering, most often from barium titanate powder or lead titanite zirconate.

Ultrasound propagates in a homogeneous medium in the form of a directional wave, which at high frequencies obeys the laws of the light beam, i.e. it is reflected, refracted at the boundary of dissimilar media, and is affected by interference and diffraction.

Waves are reflected from the defect only if their length is commensurate with the defect or more. Otherwise, ultrasonic waves bend around a small discontinuity without significant reflection. Therefore, increasing the sensitivity of the method requires the use of waves of the shortest possible length.

## Radiation method

Radiation flaw detection is based on the scanning of objects with ionizing radiation followed by registration and analysis of transmitted radiation by various detectors.

The block diagram of radiation monitoring consists of three main elements:

- ionizing radiation source;
- controlled object (welded joint);
- a detector recording flaw detection information.

The block diagram of the radiation monitoring is illustrated in figure 4.

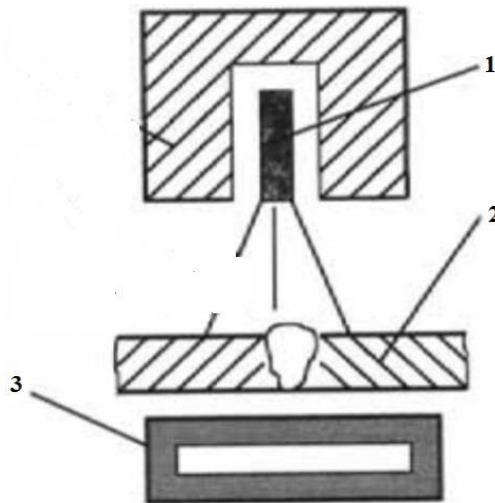


Figure 4 – Radiation monitoring scheme:

1 – X-ray emitter; 2 – object of control; 3 – detector

Passing through the substance of the product, ionizing radiation weakens; this is due to the absorption and scattering of radiation in the material of the object. How much radiation is attenuated depends on the density and thickness of the test object, as well as on the energy of the emitter itself. The radiation intensity during its passage through the gas pore is attenuated less, because the thickness of the product in this place is less. With the passage of radiation, for example, through a tungsten inclusion, which arose during argon-arc welding, its intensity sharply decreases. In other words, the radiation transmitted by the test object carries information about the

internal structure of the translucent object, which is represented as a shadow radiation image.

### **X-ray patterns**

Figures 5-7 show the basic diagrams of radiography of welded joints (butt and corner) oil pipelines, process and auxiliary pipelines.

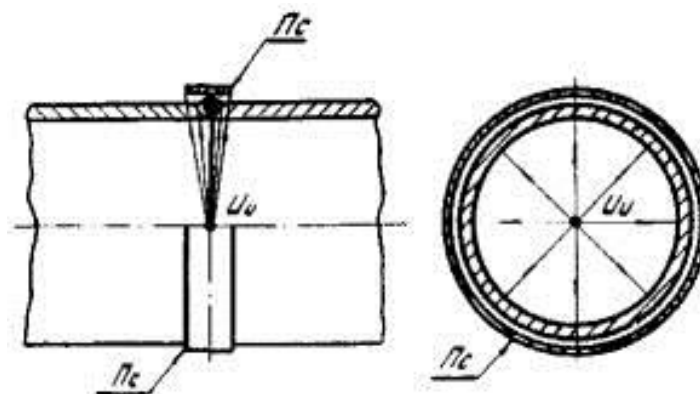


Figure 5 – Panoramic scanning pattern:

*Иu* – radiation source; *Пc* – receiving device.

Ring seams of pipelines, junctions and pipe assemblies (welding of tees, elbows) shine through one of four schemes depending on the geometric dimensions of the pipes, type and activity of the radiation source used.

Ring welds of welded products, in which free access is possible inside, are monitored for one radiation installation according to the scheme shown in figure 5 (panoramic radiography). In the future, we will be interested in precisely this pattern of translucency, since it is more relevant, for the problems that are solved in this thesis work.

The most common scheme of panoramic radiography is the installation inside the pipe of the radiation source on a moving platform, called a crawler. The radiation receiver, in this case, is installed on the outside of the pipe. Most often, X-ray-sensitive film acts as a receiver in some way attached to the test object.

The use of scintillator detectors, for example, based on cesium-iodine crystals, is promising as an X-ray detector. Such receivers are constructed similarly to a digital camera matrix and convert the shadow image of the test object into a digital form, more convenient for processing and storage.

Technical characteristics of the crawler are selected on the basis of the following parameters:

- diameter of the tube;
- wall thickness;
- sensitivity control;
- type of ionizing radiation receiver;
- ionizing radiation source;
- rate of construction of the linear part.

Welded connections of pipelines, which for any reason cannot be accessed from the inside, are controlled according to the scheme shown in figure 6 (frontal radiography). Translucence of such seams is carried out through two pipe walls for three or more installations of an ionizing radiation source. With this arrangement, the source and receiver of radiation are located on the outside of the pipe in antiphase to each other. The emitter is adjusted in such a way that the shadow image of the opposite side of the pipe and the seam falls into focus. The part of the seam, located in front of the radiator is eroded and is not registered on the receiver.

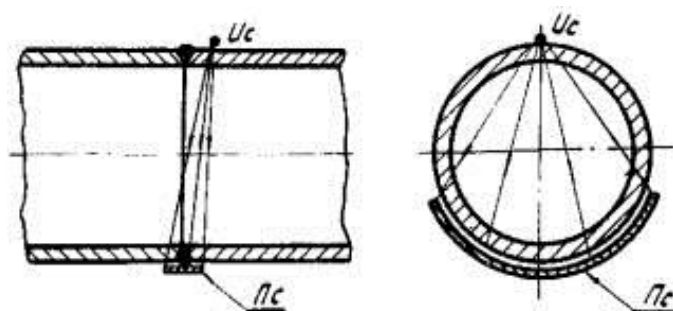


Figure 6 – Frontal scanning pattern

The main parameters of transmission according to the scheme presented in figure 6:

- the radiation source is located directly on the pipe;
- the angle between the direction of radiation and the plane of the weld should not exceed  $5^\circ$ ;
- the focal length should be equal to the outer diameter of the tube;

- the minimum number of exposures is three. At each exposure, the radiation source should be shifted by an angle of no more than  $120^\circ$ .

According to the ellipse scanning pattern, the control is carried out, as a rule, in two settings, displacing the radiation source by  $90^\circ$ .

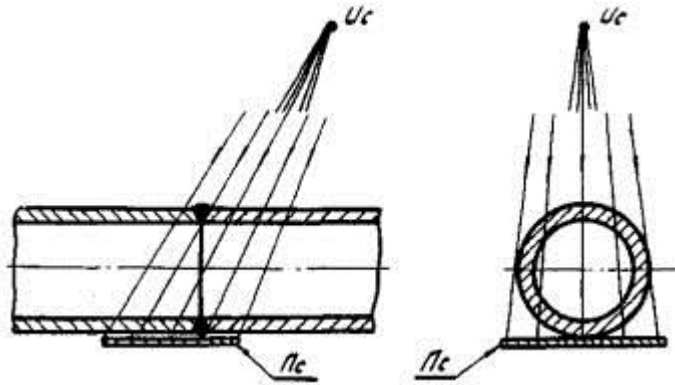


Figure 7 – Scheme of radiographic «ellipse»

As a rule, special surface preparation of the welded joint is not required before radiographic inspection. However, in cases where the surface irregularities of the weld, metal splashes can damage the radiographic film, this surface should be cleaned.

After elimination of defects of the weld, identified by the results of the previous inspection, marking of the welded joint is performed. The weld bead is divided into separate sections; the beginning and the direction of numbering are specified in a specific sequence for each image.

In the monitored areas, sensitivity standards should be set so that each image has a complete image of the standard. With panoramic scanning of ring-shaped welded joints, it is allowed to set sensitivity standards, one for each quarter of the circumference of the welded joint.

To measure the depth of a defect by darkening it in a radiographic image by the method of visual or instrumental comparison with reference grooves or holes, use canal sensitivity standards or simulators. When determining the sensitivity of control, the calculation must be carried out according to the thickness of the pipe wall on which the sensitivity standards are set.

## **X-ray crawler**

X-ray crawler is a self-propelled automatic complex used to control the quality of welded joints of various pipelines. It is a completely independent exhibiting device that does not need a wired connection and is capable of receiving commands for moving, stopping and taking radiographs from the outside using isotope and magnetic devices.

The principle of operation is based on the conversion of X-rays transmitted through the test object into a digital image. The radiation generated by the X-ray apparatus affects the matrix of a flat panel detector, which consists of a scintillation screen and a silicon photodiode array. Under the influence of X-rays, the scintillation screen starts to glow. The luminous flux enters the silicon photodiode array of the detector, in which the luminous intensity is converted into an electric current, the signal of which is amplified and converted into a digital code. In the detector's electronic circuit, a digital image of the test object is generated and transmitted to the computer of the registration and control unit.

As a construction, an X-ray crawler is a complex that is powered by batteries and consists of separate modules designed to inspect pipes of various diameters. Control of the crawler with the help of external control devices is minimized due to possible pre-setting, allowing the crawler to be adapted to work in any pipeline.

Application in modern devices of microprocessor technology provides the possibility of high performance, reliability and ease of operation with the device. Placing the inside of the pipe allows you to control the circumferential weld for one installation, while using external devices it is necessary to conduct from two and more, for large diameters of pipes, installations of the device. In addition, using a crawler, there is no need to rearrange the X-ray tube on each welding seam, and the quality of the obtained image improves, since only one wall of the tube is visible.

Figure 8 is a schematic drawing of a crawler located inside the pipeline, explaining the principle of its operation.

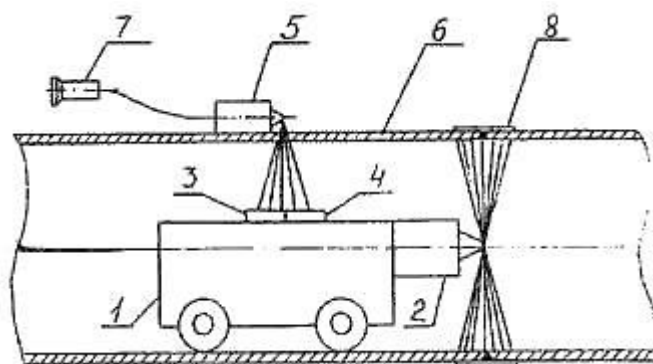


Figure 8 – Scheme of the X-ray crawler:

1 – self-propelled truck; 2 – panoramic unit; 3,4 – ionization counters;  
5 – command unit; 6 – pipe; 7 – remote control; 8 – radiation detector

As a receiver of penetrating radiation of the command apparatus, two ionizing counters are used in the crawler. Before the start of the movement of the self-propelled trolley, the command device switches on with the help of the remote control. Thanks to a special collimator, it has a narrowly directed radiation pattern strictly inside the tube. When a command vehicle emits radiation to detector 3, the crawler slows down its movement, and when detector 4 is triggered, it stops at the position when the radiation focus of the panoramic apparatus is on a line perpendicular to the controlled pipe seam and X-ray film.

### **Automated orbital motion systems**

Technologies with the use of automated orbital displacement systems for monitoring annular welds of pipelines have great potential for development. Such technologies can largely automate the process, which will reduce the time spent on the work. Along with this, introducing X-ray receiver passing through a controlled object, for example, digital radiography methods or receivers that convert radiation into electrical signals, can again significantly speed up the process and achieve more convenient and modern methods of documenting research results.

The main parameters characterizing the performance of such automated orbital systems include the monitoring speed, which depends directly on the speed of movement of the ionizing radiation detector along the diagnosed section of the

pipeline; load capacity and downforce required to hold the carriage detector. This force is provided by the method of fastening the structure to the surface of the pipe.

Already there are such systems of orbital movement of equipment for radiography, built on various principles. The equipment of the «TRANSKAN» company, for example, allows to move the radiator and the radiographic panel along special belts (bondages) covering the pipe in the region of the seam under study.



Figure 9 – Portable complex of digital radiography «TRANSKAN»

Such layout schemes are energy efficient, since they significantly reduce labor and energy costs when installing equipment and allow operating radiation sources in the optimal mode.

The use of a belt creates certain difficulties, since the belts usually have a certain length that corresponds to only one size of the pipe and for full control it is necessary to have a full set of belts.

There is a design of the mechanism of orbital movement, implemented on the so-called magnetic wheels.







Figure 11 – Filmless automated radiometric system «BARS»

However, such a scheme is used for ultrasonic testing, the equipment, which is distinguished by smaller mass-dimensional characteristics as compared to X-ray emitters.

To assess the applicability of this technology in radiography, an attempt was made to simulate the magnetic coupling of a wheel of the described construction with a tube using the ELCUT software.

Using the capabilities of the software product ELCUT, it is possible to estimate the magnitude of the pressing force of the supporting magnetic wheels of a special design to a pipe made of ferromagnetic material. Also, the data obtained can be used in the design of mechanisms for the orbital movement of equipment for non-destructive testing of annular pipe joints with the required mass-dimensional characteristics.