

На правах рукописи



**КОЗЛОВ ДМИТРИЙ ИГОРЕВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И  
НАНЕСЕНИЯ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ  
НА ТРУБНЫЕ УЗЛЫ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ**

Специальность – 25.00.19 – Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,  
баз и хранилищ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ухта – 2014

Работа выполнена на кафедре «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов» ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Кузьбожев Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

Торопов Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов» ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет»

Аленников Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, начальник технического отдела ООО «Газпром трансгаз Ухта»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «22» октября 2014 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета и на сайте [www.ugtu.net](http://www.ugtu.net).

Автореферат разослан «22» августа 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Мария Михайловна Бердник

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** Для предотвращения развития коррозионных повреждений внешние поверхности соединительных деталей и запорной арматуры магистральных трубопроводов покрываются защитными полиуретановыми покрытиями. Длительная устойчивость защитных покрытий к воздействию внешних факторов закладывается на этапах подготовки исходных компонентов покрытий, подготовки поверхностей изделий перед нанесением, нанесения покрытий.

К показателям, характеризующим качество нанесения защитного покрытия, относятся адгезионная прочность, отсутствие внутренних напряжений в покрытии, характеристики механических свойств и толщина покрытия.

Несоответствие показателей нормативным требованиям способствует снижению срока эксплуатации покрытия, а также снижает его способность воспринимать внешние нагрузки без развития повреждений. Нарушение технологии нанесения покрытия снижает его способность воспринимать внешние нагрузки, способствует развитию повреждений покрытий при хранении на открытых площадках. К повреждениям покрытия, формирующимся при хранении трубных изделий, относятся растрескивание и отслаивание на участках поверхности, характеризующихся сложностью формы.

Впоследствии при строительстве трубопровода, при монтаже соединительных деталей или запорной арматуры, атмосферные повреждения могут получить развитие под действием теплового поля, формируемого в металле изделия при сварке. Температурные деформации, возникающие в покрытии, могут способствовать его отслаиванию, причем данный процесс будет характерен преимущественно для поверхностей со сложной геометрией.

Современная технология нанесения покрытия на поверхности фасонных изделий, реализуемая на предприятиях, не позволяет обеспечить равномерного распределения наносимых слоев покрытия, соответственно, переизбыток или недостаток материала на определенных участках покрытия будет снижать качество его нанесения и приводить к снижению эксплуатационных характеристик.

Поэтому совершенствование методов нанесения полиуретановых покрытий на трубные узлы сложной конфигурации является актуальной задачей.

**Цель работы** – совершенствование методов диагностирования и нанесения полиуретановых покрытий на трубные изделия сложной конфигурации.

### **Задачи исследования:**

- на основании обзора и анализа выполнить выбор и обоснование оптимальных способов диагностирования покрытий соединительных деталей и запорной арматуры на этапе атмосферного хранения;
- разработать классификацию характерных дефектов защитного покрытия фасонных изделий, возникающих на этапе хранения, на основании которой будет выполняться прогноз изменения климатической устойчивости покрытий;
- разработать рациональные схемы диагностирования состояния защитных покрытий фасонных изделий с учетом особенностей их геометрии и хранения;
- разработать рациональные схемы нанесения покрытия на трубные детали магистральных трубопроводов с учетом характеристик применяемого оборудования.

### **Научная новизна:**

– выявлены закономерности ухудшения климатической устойчивости защитных покрытий фасонных трубных изделий с удалением баз хранения в северном направлении с максимальным приростом дефектов до 20 % на 58<sup>0</sup> – 70<sup>0</sup> северной широты, при этом максимально допустимый срок атмосферного хранения изделий с покрытием составляет 2,7 – 4,3 года с ошибкой прогнозирования  $\pm 10$  %;

– выявлены закономерности в неравномерности распределения толщины защитного покрытия фасонных изделий с максимальным коэффициентом вариации толщины покрытия 32,7 % для шаровых кранов, на основании которых введена балльная система оценок необходимости проведения дополнительного контроля на отслаивание защитного покрытия трубных изделий с превышением граничного значения коэффициента вариации толщины покрытия более 40 %, позволяющая оптимизировать объемы детального контроля покрытий на отслаивание;

– выявлены индивидуальные закономерности в траекториях движения инструмента для распыления покрытия и параметрах применяемого оборудования с однородностью толщины покрытия трубных изделий, позволяющие предложить рациональные схемы нанесения покрытия, обеспечивающие однородность толщины покрытия трубных изделий с коэффициентом вариации не более 14 %.

### **Защищаемые положения:**

– выявление новых закономерностей нарушения защитных покрытий фасонных изделий в зависимости от мест размещения площадок их хранения, позволяющих определить максимально допустимый срок атмосферного хранения изделий с покрытием;

– экспериментальное обоснование корреляционных связей участков поверхности покрытий фасонных изделий со склонностью к образованию дефектов, позволяющее оптимизировать объемы детального контроля покрытий трубных изделий на отслаивание;

– рациональные схемы нанесения покрытия при проведении восстановительного ремонта покрытий фасонных изделий, обеспечивающие однородность толщины покрытия с коэффициентом вариации не более 14 %.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке стандарта организации ООО «Газпром трансгаз Ухта» «Рекомендации по контролю и мониторингу состояния защитных покрытий труб, запорной арматуры, соединительных деталей, настройке ЭХЗ МГ при эксплуатации в нестабильных мерзлых грунтах», регламентирующего использование разработанных методик при диагностировании и ремонте защитных покрытий заводского нанесения на запорной арматуре и фасонных изделиях. Разрабатываемые предложения и рекомендации по совершенствованию технологии диагностирования и нанесения защитных покрытий трубных узлов позволят устранить условия для развития повреждений покрытий, не допустить развития коррозионных повреждений, обеспечить надежность эксплуатации трубопроводов. Разработанные рекомендации внедрены в ходе строительства газопровода Бованенково – Ухта, а также на площадках временного хранения труб в структурных подразделениях ООО «Газпром трансгаз Ухта». Эффективность методов определяется сокращением объемов детального контроля покрытий на отслаивание и значением индекса эффективности не менее 3,5.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на XIII международной молодежной научной конференции «Севергеоэко-тех – 2012» (21 – 23 марта 2012 г., Ухта);
- научно-технической конференции преподавателей и сотрудников УГТУ (17 – 20 апреля 2012 г., Ухта);
- VIII международной учебно-научно-практической конференции Трубопроводный транспорт – 2012 (Уфа, 2012);
- XIII научно-технической конференции молодёжи ОАО «Северные МН» (г. Ухта, 12 – 14 дек. 2012 г.);
- международном семинаре «Рассохинские чтения» (8 – 9 февраля 2013 г., Ухта);
- XIV международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех – 2013» (20 – 22 марта 2013 г., Ухта);
- научно-технической конференции преподавателей и сотрудников УГТУ (16 – 19 апреля 2013 г., Ухта);
- V открытой научно-практической конференции молодых работников и специалистов Инженерно-технического центра (г. Ухта, 26 – 28 июня 2013 г.);
- международном семинаре «Рассохинские чтения» (6 – 7 февраля 2014 г., Ухта).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них три в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК Минобрнауки РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 138 страниц текста, 61 рисунок, 31 таблицу и список литературы из 100 наименований.

#### **Содержание работы.**

Во введении обоснованы актуальность и значимость выбранной темы, охарактеризованы задачи исследования и научно-методические пути их решения.

В первой главе выполнен обзор и анализ свойств защитных покрытий фасонных изделий и запорной арматуры и методик их диагностирования, раскрыты проблемы, возникающие при нанесении защитных покрытий на трубные узлы сложной конфигурации.

Исследованиями проблем защитных покрытий фасонных изделий и запорной арматуры в разное время занимались различные научные институты (среди которых следует выделить ООО «Институт ВНИИСТ» и ООО «Газпром ВНИИГАЗ»). Среди отечественных ученых следует выделить А.В. Алексахина, Б.И. Борисова, С.Г. Низьева, Н.А. Петрова, В.Н. Протасова, А.П. Сазонова, А.Т. Санжаровского, И.В. Стрижевского.

В качестве покрытий фасонных соединительных деталей магистральных трубопроводов в 80-е гг. применялись различные полимерные материалы. Однако применяемые покрытия не обеспечивали требуемого уровня адгезии, что приводило к различным дефектам в виде отслаивания и растрескивания. При наличии сквозного дефекта изоляционного покрытия, наблюдается «провал потенциала». При проведении электрометрического контроля покрытий в местах запорной арматуры наблюдается уменьшение защитного потенциала до значений, не обеспе-

чивающих полноту катодной защиты, что приводит к ухудшению состояния электрохимзащиты на протяженных участках трубопроводах.

В настоящее время при строительстве и реконструкции участков трубопроводов в качестве покрытий фасонных соединительных деталей наибольшую популярность получили полиуретановые защитные покрытия.

Вопрос с заводской технологией нанесения полиуретановых покрытий изучен и проработан достаточно хорошо. Однако нанесение защитных покрытий в трассовых условиях сопровождается целым рядом технологических особенностей: отрицательное влияние погодных условий; сложная конфигурация поверхности изделий (наличие труднодоступных мест и теневых зон). В связи с этим, наблюдается неоднородность толщины покрытия, что может вызывать снижение прочности адгезии.

К основным методам контроля защитных покрытий, реализуемых при хранении и монтаже фасонных изделий, можно отнести: визуально-измерительный контроль; контроль толщины; контроль сплошности; оценка адгезионной прочности.

Во второй главе выполнено исследование особенностей поведения защитных покрытий фасонных изделий в условиях атмосферного хранения.

Выполнен анализ характерных дефектов защитных покрытий типа «Кортекс» (рисунок 1, а) и «Уризол» (рисунок 1, б) и в общем (рисунок 1, в) фасонных изделий, находящихся на площадках атмосферного хранения.

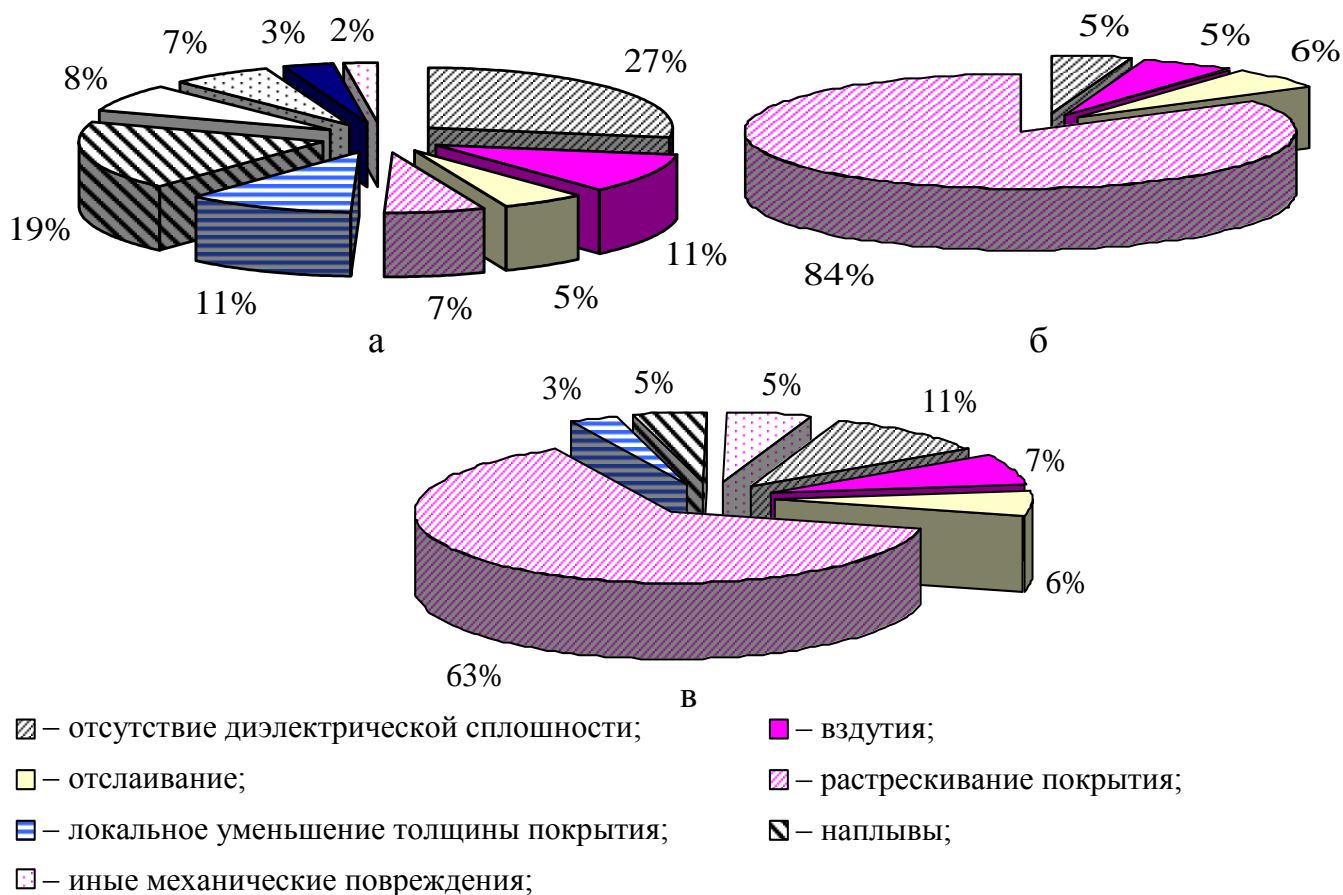


Рисунок 1 – Распределение дефектов покрытия по видам

Проанализировав рисунок 1, видно, что для покрытия типа «Кортекор-867» основными дефектами являются: отсутствие диэлектрической сплошности, наплывы. Для покрытия типа «Уризол» основным дефектом является растрескивание. При этом основным дефектом покрытий фасонных изделий является растрескивание, что составляет 63 % от общего количества дефектов.

Для предотвращения образования дефектов покрытия следует изучить причины их образования. Различают следующие причины: механические и климатические. Климатические причины связаны с воздействием атмосферных явлений на слой покрытия. При длительном действии низких температур покрытие приобретает хрупкость, что проявляется в виде развития нарушений в адгезионном соединении с отделением внешнего полимерного слоя от металла трубного узла.

К механическим повреждениям покрытия относят следующие: сдир изоляции, сколы покрытия с поверхности металла, оплавление кромок покрытия, непрокрасы, несквозные царапины, срез покрытия, вмятины. К климатическим повреждениям покрытия относят: вздутия, отсутствие диэлектрической сплошности, растрескивание и отслаивание. На рисунке 2 представлено абсолютное  $W$  и относительное  $w$  соотношение причин образования повреждений покрытий, на рисунке 3 – плотность исследуемых дефектов (поверхностная –  $\sigma$ , удельная –  $\tau$ ).

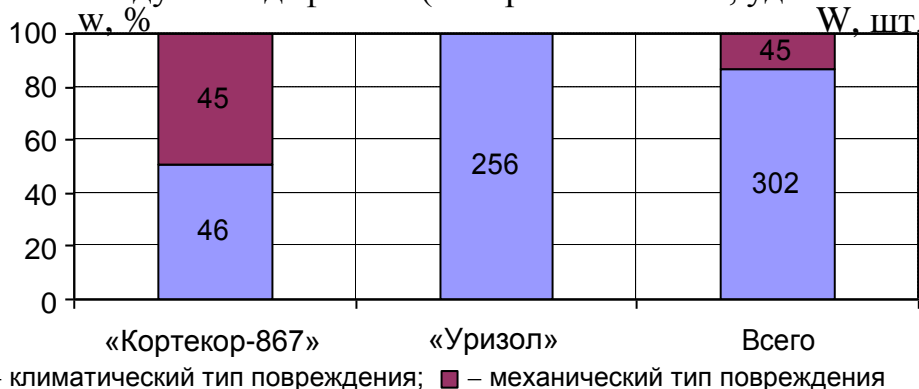
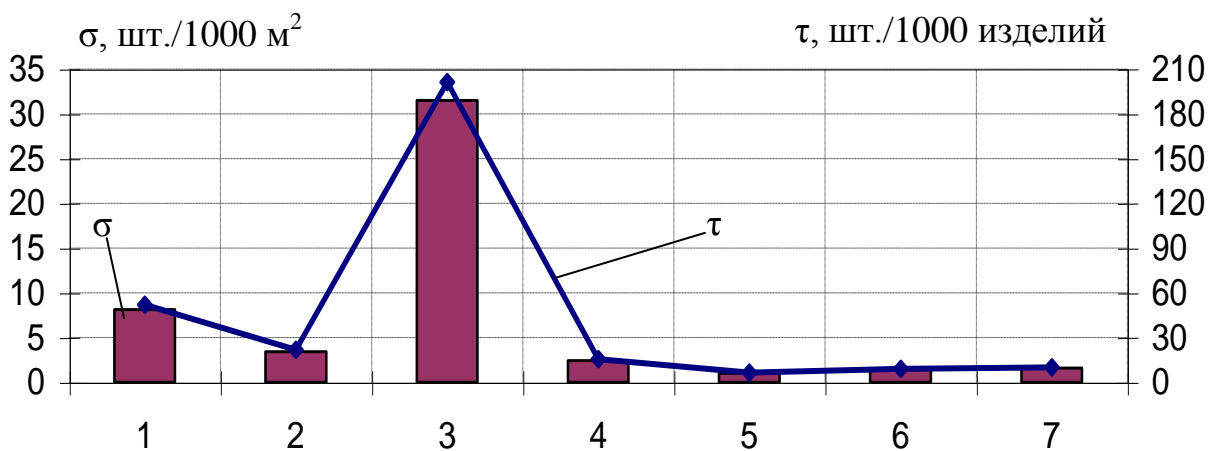


Рисунок 2 – Характер повреждения покрытия соединительных деталей

Очевидным является преобладание климатического фактора над механическим в  $302/45=6,7$  раза.



1 – отслаивание; 2 – вздутия; 3 – растрескивание; 4 – наплывы; 5 – коррозия металла в месте растрескивания покрытия; 6 – локальное уменьшение толщины покрытия; 7 – иные дефекты

Рисунок 3 – Сводная статистика по дефектам покрытия

На основании имеющейся статистики повреждений покрытия был выполнен анализ изменения его климатической устойчивости (АЗ) для различных баз хранения (КС Байдарацкая, Инта, Кожим, Косью, Кожва, Малая Пера, Сосногорск, КС «Бабаевская», КС «Грязовецкая») в соответствии с ГОСТ 9.401-91. Поскольку базы хранения размещены в зоне с умеренной континентальностью климата, то на климатическую устойчивость покрытия влияет в основном координата широты ( $\varphi$ ).

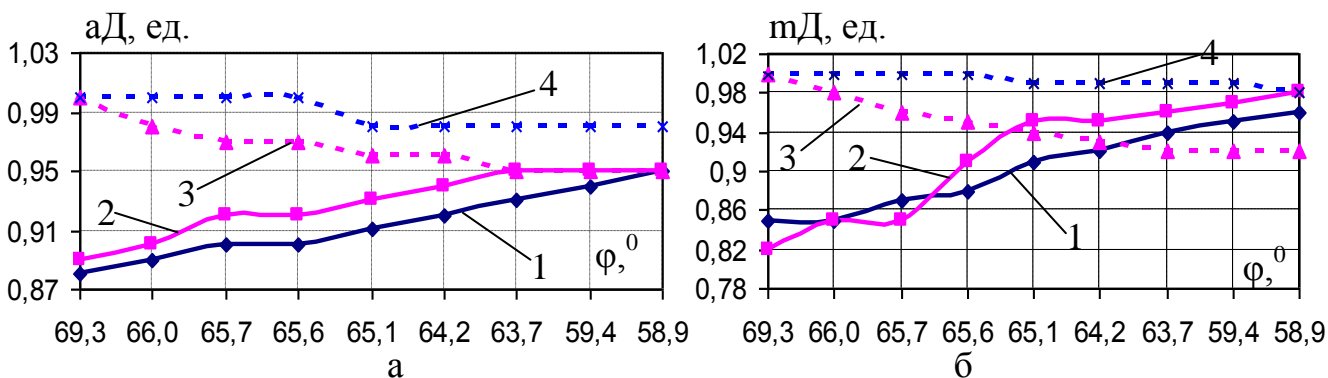
На защитные свойства покрытия влияют следующие виды дефектов: Т – растрескивание, С – отслаивание, П – образование вздутий, К – коррозия металла. Количественную оценку климатической устойчивости рассчитывают по формуле:

$$AZ = X_1 \cdot T + X_2 \cdot C + X_3 \cdot П + X_4 \cdot K, \quad (1)$$

где  $X_i$  – коэффициент весомости каждого вида разрушения,  $X_1 = 0,18$ ,  $X_2 = 0,25$ ,  $X_3 = 0,20$ ,  $X_4 = 0,37$ ; Т, С, П, К – количественные оценки растрескивания, отслаивания, образования вздутий, коррозии металла в месте растрескивания покрытия, величины которых рассчитывают по формуле:

$$D = 0,6 \cdot aD + 0,4 \cdot mD, \quad (2)$$

где D – исследуемый дефект покрытия; aD, mD – относительные оценки дефекта покрытия в зависимости от его площади (рисунок 4, а) и размера (рисунок 4, б).



1 – растрескивание; 2 – отслаивание; 3 – вздутия; 4 – коррозия металла в месте растрескивания  
Рисунок 4 – Зависимость параметров дефектов покрытия от координаты широты базы хранения трубных изделий

Видно, что с увеличением координаты широты процесс растрескивания и отслаивания покрытия протекает более интенсивно. Количество вздутий с увеличением координаты широты уменьшается из-за уменьшения хода разности температур теплого и холодного периодов. Явной зависимости коррозии металла не выявлено, наблюдается ее небольшое уменьшение. В целом заметно, что с уменьшением координаты широты базы хранения наблюдается снижение процесса образования дефектов, следовательно, увеличивается срок атмосферного хранения. Поэтому оценим влияние климатических условий на срок атмосферного хранения трубных изделий с покрытием. Согласно И.С. Филатову температурное влияние на слой покрытия может быть описано уравнением химической кинетики первого порядка:

$$-dAZ(t)/dt = K \cdot AZ(t), \quad (3)$$

где K – константа скорости процесса,  $c^{-1}$ .



Поскольку изделия, поступившие на базы хранения, не имели исследуемых дефектов покрытия, то  $A3(0) = 1$ . Тогда, решая уравнение (3), определим прогнозируемый срок хранения трубных изделий с покрытием в атмосферных условиях:

$$t = \frac{\ln A3_{кр}}{\ln A3} \cdot t_{и}, \quad (4)$$

где  $A3_{кр}$  – критическая обобщенная оценка климатической устойчивости покрытия,  $A3_{кр} = 0,8$ ;  $t_{и}$  – время проведения испытаний, годы (срок атмосферного хранения).

Результаты расчетов представлены на рисунке 5.

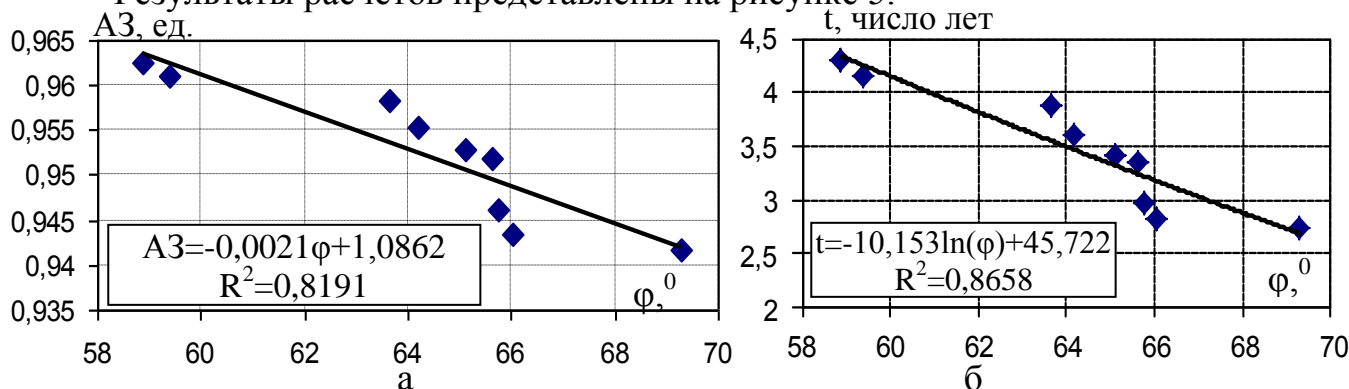


Рисунок 5 – Зависимость климатической устойчивости покрытия (а) и срока хранения трубных изделий с покрытием (б) от координаты широты

Таким образом, установлено, что с увеличением координаты широты происходит ухудшение климатической устойчивости покрытия.

В третьей главе выполнены:

- компьютерное моделирование распределения напряжений в слое защитного покрытия на этапах строительства и эксплуатации трубопровода;
- экспериментальные исследования неоднородности толщины защитного покрытия фасонных изделий.

Целями моделирования распределения напряжений и диагностирования покрытий являются:

- выявление основных факторов, повлекших образование неоднородности толщины покрытий;
- определение участков поверхности покрытий потенциально склонных к ослаблению адгезионной прочности, в которых является обязательным проведение контроля сплошности.

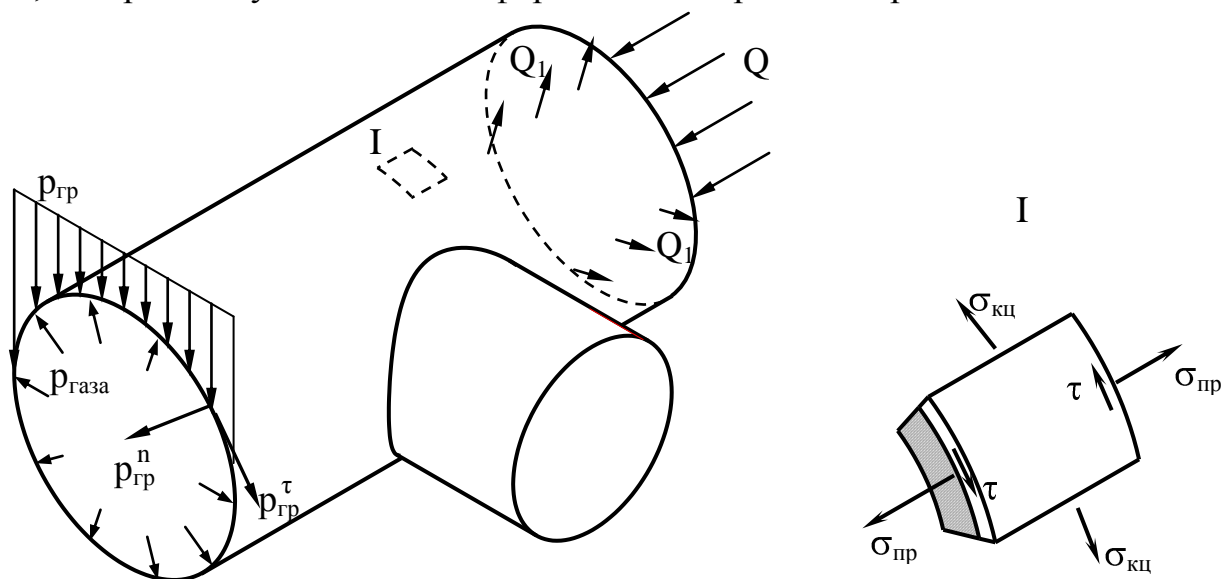
Основным фактором, уменьшающим защитную способность покрытий, является совокупность механических и температурных нагрузок на этапах строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов.

Согласно Б.И. Борисову к основным нагрузкам, воздействующим на покрытие, относятся:

- усилия, вызванные температурным перепадом  $\Delta t$ ;
- усилия от внутреннего давления в трубном узле;
- вертикальное давление грунта.

Под влиянием нагрузок защитное покрытие находится в сложном напряженном состоянии, работая одновременно на сжатие, растяжение и сдвиг (рису-

нок 6). Вследствие этого в покрытии возникают внутренние напряжения второго рода, которые могут вызывать деформации материала покрытия.



$p_{гр}^n$ ,  $p_{гр}^τ$  – нормальная и тангенциальная составляющие вертикального давления грунта  $p_{гр}$ ;  $p_{газа}$  – внутреннее давление транспортируемого газа;  $\sigma_{кц}$  – кольцевые напряжения в слое покрытия;  $\sigma_{пр}$  – продольные напряжения в слое покрытия;  $\tau$  – касательные напряжения в слое покрытия;  $Q$  – теплота источника сварки (расходуется на нагрев покрытия);  $Q_1$  – теплота конвективной теплоотдачи от поверхности покрытия в окружающую среду

Рисунок 6 – Схема основных усилий, действующих на слой защитного покрытия корпуса тройника

При этом отслаивание покрытия будет происходить в том случае, когда эквивалентные напряжения будут превышать величину адгезионной прочности покрытия на сдвиг. Выполнено компьютерное моделирование распределения напряжений в слое защитного покрытия тройникового соединения. Исходной моделью для расчета являлась модель тройникового узла, свойства материалов корпуса и покрытия приведены в таблице 1.

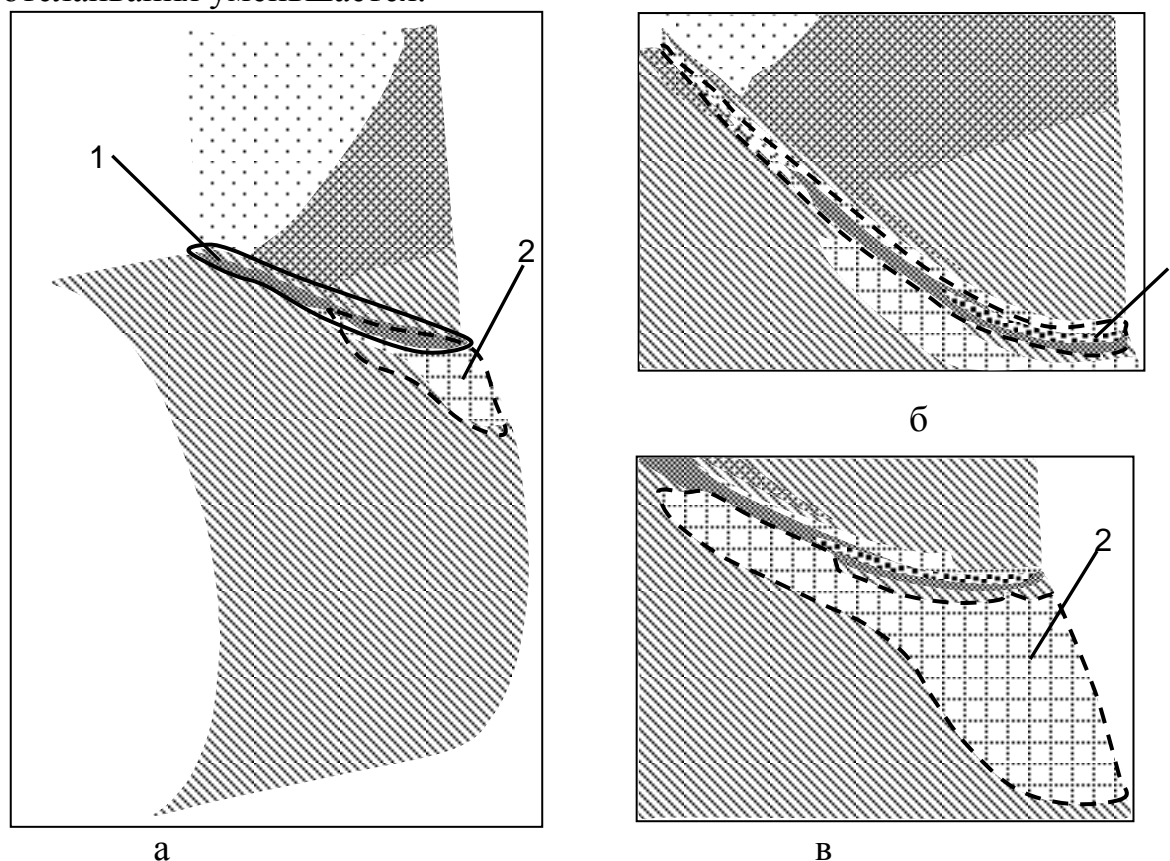
Таблица 1 – Значения исходных данных для расчета

Параметр	Значение
Геометрия основной трубы и патрубка	
Внешний диаметр основной трубы, мм	1420
Толщина стенки трубы, мм	16
Внешний диаметр патрубка, мм	1020
Толщина стенки патрубка, мм	11
Механические характеристики трубы и патрубка	
Модуль упругости, МПа	210000
Коэффициент Пуассона	0,28
Механические характеристики покрытия	
Модуль упругости, МПа	500
Коэффициент Пуассона	0,25

Продолжение таблицы 1

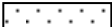




Параметр	Значение
Геометрия покрытия	
Толщина слоя покрытия, мм	4,5
Характеристики грунта	
Объемный вес грунта, Н/м <sup>3</sup>	20000
Коэффициент бокового давления грунта	0,25
Угол внутреннего трения засыпки о стенки траншеи, градус	18
Ширина траншеи, м	2,13
Сцепление засыпки со стенками траншеи, Па	20000
Влажность грунта, %	30
Прочие факторы	
Давление транспортируемого газа, МПа	7,5
Расстояние от поверхности грунта до верха тройникового узла, м	0,8
Коэффициенты линейного расширения трубной стали, 1/°С	$1,25 \cdot 10^{-5}$
Коэффициенты линейного расширения покрытия, 1/°С	$2,6 \cdot 10^{-4}$

Используя результаты компьютерного моделирования, устанавливали участки на поверхности покрытия, предрасположенные к развитию деформаций и отслаивания, которые требуют проведения первоочередного диагностирования при входном и эксплуатационном контроле (рисунок 7, таблица 2). Как видно из результатов расчета максимальная вероятность отслаивания покрытия наблюдается в зоне стыка магистрали и патрубка. По мере удаления от данной зоны вероятность отслаивания уменьшается.



а – общий вид модели; б, в – участки концентрации напряжений в слое покрытия  
 Рисунок 7 – Результаты расчета оценки вероятности отслаивания покрытия

Таблица 2 – Интерпретация цветовой шкалы напряжений

Характеристика цвета	Вероятность отслаивания покрытия, %
	10 – 21,3
	21,3 – 32,7
	32,7 – 43,3
	43,3 – 54,7
	54,7 – 65,3
	65,3 – 76,7
	76,7 – 88
	88 – 98,7
	98,7 – 100

Таким образом, при вероятности отслаивания более 50 % участки поверхности покрытия рекомендуются для проведения контроля на отслаивание.

При анализе результатов диагностирования покрытия были введены следующие диапазоны изменения толщины покрытий:

- менее 2 мм – не соответствует техническим требованиям;
- 2 – 4,5 мм – оптимальная толщина покрытия;
- более 4,5 мм – вероятно снижение прочности адгезии.

Следовательно, повышенное значение толщины покрытия является дополнительным фактором по увеличению вероятности его отслаивания.

Полученные результаты по определению потенциально опасных участков были перепроверены экспериментальным путем. Для этого на базах хранения было продиагностировано покрытие 10 крутоизогнутых отводов, 10 тройников и семи шаровых кранов, находящихся на площадках хранения. Изделия условно разбивались на характерные конструктивные зоны. Каждая зона разбивалась на контрольные сечения, в которых измерения проводились по окружности с дискретностью 1 ч. Для оценки результатов измерений введем следующие обозначения:

–  $V$  – коэффициент вариации (характеризует неоднородность толщины покрытия), %;

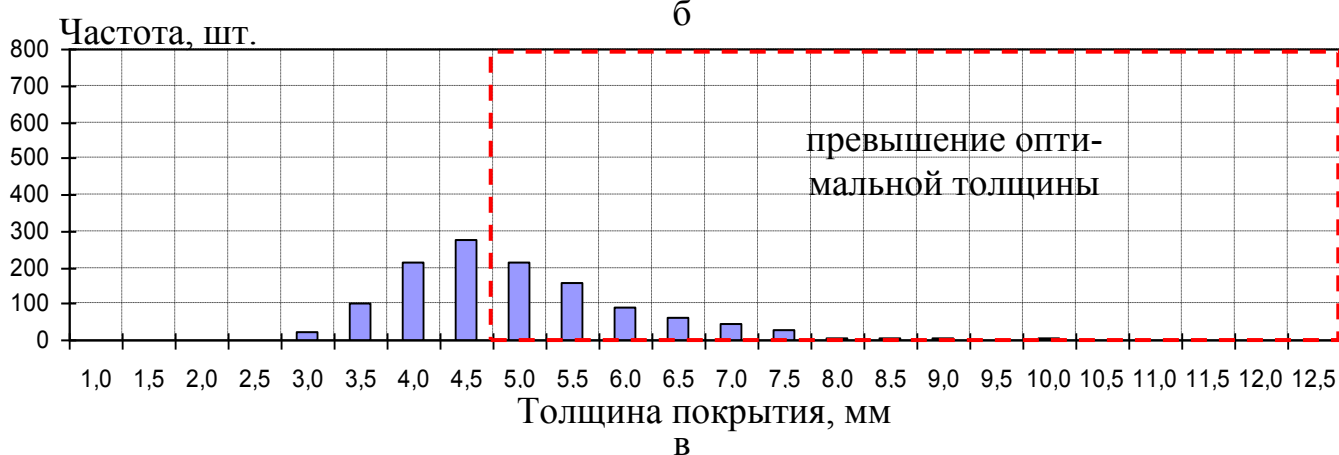
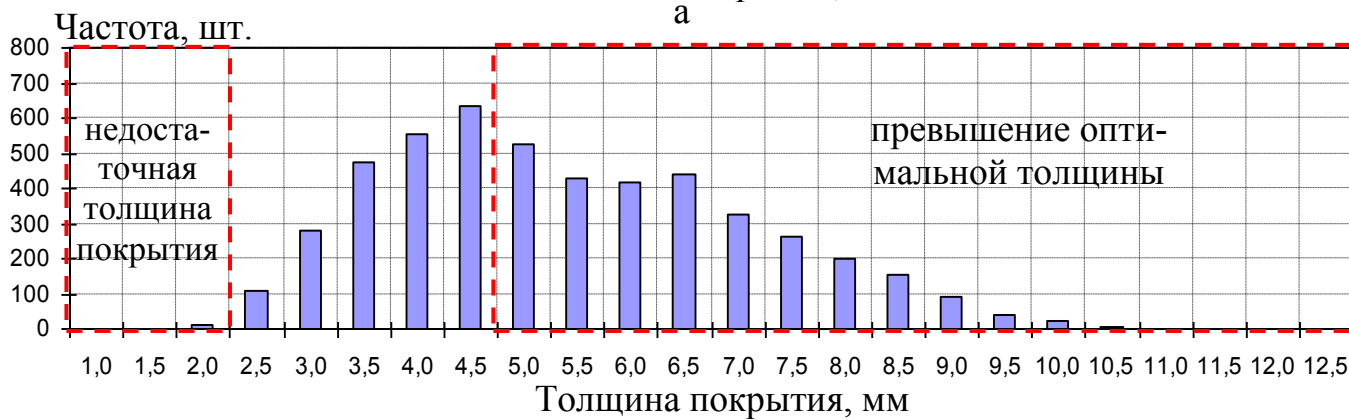
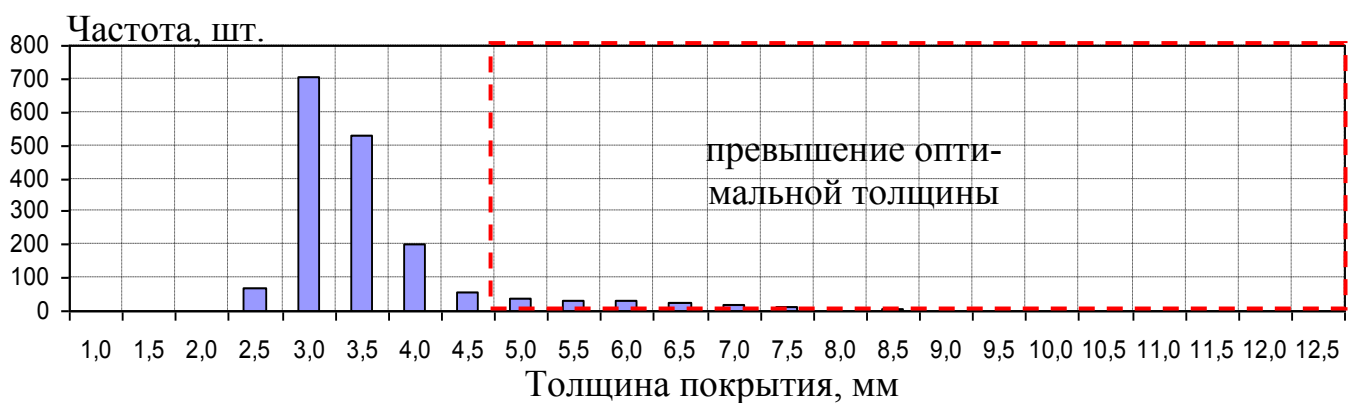
–  $n$  – доля измерений, находящихся вне диапазона оптимальных значений толщины покрытия, %.

–  $\delta_{cp}$  – среднее значение толщины покрытия, мм.

На рисунке 8 и в таблице 3 представлены статистические характеристики толщины покрытия для различных фасонных изделий.

Таблица 3 – Основные статистические характеристики толщины покрытия

Статистический параметр	Тройники	Шаровые краны	Отводы
Среднее, мм	3,35	5,16	4,70
Стандартное отклонение, мм	0,95	1,69	1,10
Дисперсия выборки, мм <sup>2</sup>	0,89	2,85	1,21
Коэффициент вариации, %	28,23	32,70	23,40
Доля измерений, находящихся вне диапазона оптимальных значений, %	9,74	58,9	49,67

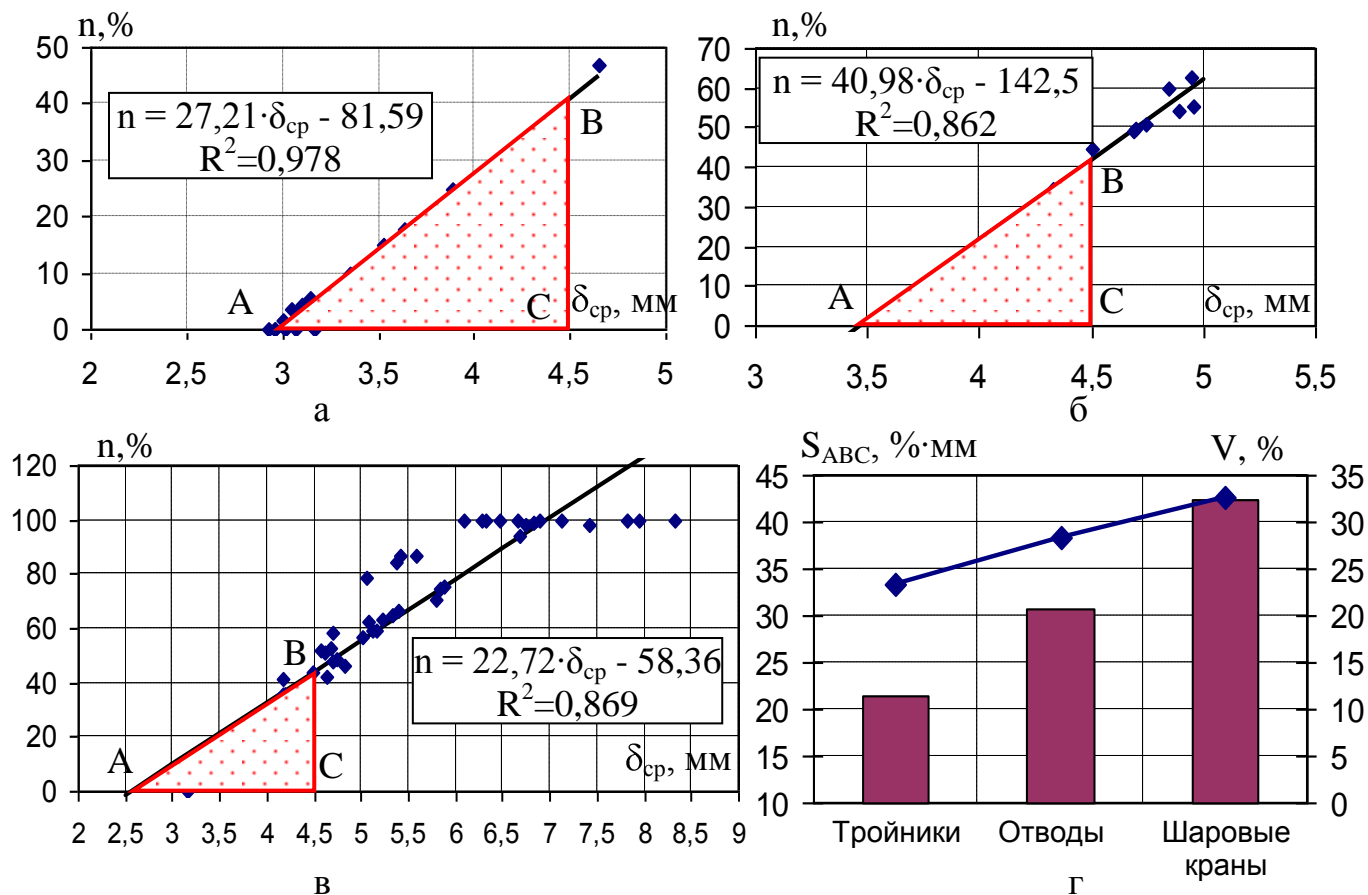


а – тройники; б – шаровые краны; в – отводы

Рисунок 8 – Статистические характеристики толщины покрытия

Таким образом, установлено, что наибольшая неравномерность толщины покрытия наблюдается на шаровых кранах (только 40 % поверхности шаровых кранов имеет покрытие с оптимальной толщиной). Так же видно, что с увеличением средней толщины покрытия доля поверхности покрытия, имеющего толщину вне диапазона оптимальных значений, увеличивается (рисунок 9).

При равномерном нанесении покрытия величина  $n$  должна равняться нулю при значениях  $\delta_{cp} = 2 - 4,5$  мм. Однако этого не наблюдается, что подтверждается положительным значением площади  $S_{ABC}$ . Зависимость данной площади от неоднородности толщины покрытия следующая:  $S_{ABC} = 2,274 \cdot V - 31,68$  с  $R^2 = 0,991$  (рисунок 9, г). Следовательно, максимально допустимая неоднородность толщины покрытия для фасонных изделий составляет 14 %.



а – тройники; б – отводы; в – шаровые краны; г – общая по изделиям  
 Рисунок 9 – Результаты оценки равномерности толщины покрытия

На основании статистических параметров толщины покрытия установим критерий выбора участков для контроля сплошности на основании балльной системы оценок (таблица 4).

Таблица 4 – Балльная система оценки очередности проведения контроля сплошности покрытия на основе статистических характеристик

Показатель	Количественная оценка	Балл	Показатель	Количественная оценка	Балл
V	0 – 14	0	n	0 – 1	0
	14 – 33	1		1 – 3	1
	33 – 40	2		3 – 5	2
	Более 40	3		5 – 10	3
delta_cp	0 – 2	1		10 – 30	4
	2 – 4,5	0		30 – 50	5
	Более 4,5	2	Более 50	6	

Для каждого участка поверхности покрытия полученные баллы I складываются, и получается интегральный балл ΣI. Проведение контроля сплошности необходимо, когда ΣI ≥ 3. При этом первоочередными для контроля являются участки с наибольшим значением ΣI. Далее представлен анализ толщины покрытия для каждой зоны фасонных изделий.

Измерения на тройниках проводили в следующих зонах: магистраль, отвод, стыковое соединение, сварной шов.

По результатам измерений установлено, что на магистрали тройников толщина покрытия соответствует оптимальному значению. Наблюдаются незначительные наплывы на тройнике № 3. При этом наплывы расположены у кромок, что объяснимо ориентацией тройников при нанесении покрытия.

Установлено, что качественное нанесение покрытия затруднено в зоне соединения магистрали и штуцера, а также в окрестности сварных швов. Соответственно в данных зонах возможно снижение прочности адгезии. Результаты измерений для тройников представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Показатели равномерности нанесения покрытия на тройниковые соединения

Конструктивные зоны тройников	V	n	$\delta_{cp}$	$\Sigma I$
Магистраль	16,45	1,57	3,00	2
Отвод	12,21	0	3,07	0
Стыковое соединение	33,26	24,83	3,89	6
Сварной шов	28,79	12,96	3,49	5

Из таблицы 5 видно, что проведение контроля сплошности покрытия необходимо в области стыкового соединения и сварного шва.

Измерения на шаровых кранах проводили в следующих зонах: корпус, присоединяемые патрубки, опоры корпуса, проушины.

По результатам измерения установлено, что на корпусе кранов наблюдаются наплывы покрытия в следующих зонах: верхняя и нижняя части корпуса, участки присоединения опор и иных выступающих частей.

Установлено, что на присоединяемых патрубках наплывы наблюдаются в зоне стыка патрубка и корпуса. По результатам измерений установлено, что в местах присоединения опор корпуса наблюдались наплывы покрытия. Результаты измерений для запорной арматуры представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Показатели равномерности нанесения покрытия на элементы шарового крана

Конструктивные зоны шаровых кранов	V	n	$\delta_{cp}$	$\Sigma I$
Корпус	32,04	57,1	5,01	9
Присоединяемые патрубки	33,29	48,64	4,71	9
Опоры корпуса	17,89	97,93	6,75	9
Проушины	25,63	33,3	4,15	6

Таким образом, во всех исследуемых зонах поверхности покрытия шаровых кранов наблюдается значительное отклонение толщины покрытия от оптимального диапазона значений. Из таблицы 6 видно, что проведение контроля сплошности покрытия необходимо по всей поверхности шаровых кранов.

Измерения на отводах проводили в следующих зонах: труба отвода, сварной шов. На поверхностях отводов наблюдаются наплывы покрытия в следующих зо-

нах: на кромках покрытия, на боковых образующих. В зоне сварных швов наплывы расположены в середине зоны сварного шва. Длина участка с наплывами составляет треть длины сварного шва. Результаты измерений для отводов представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Показатели равномерности нанесения покрытия на отводы

Конструктивные зоны отводов	V	n	$\delta_{cp}$	$\Sigma I$
Труба отвода	24,71	50,85	4,74	9
Сварной шов	14,71	44,44	4,51	8

Из таблицы 7 видно, что проведение контроля сплошности покрытия необходимо по всей поверхности отводов.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- выявлены закономерности в неравномерности распределения толщины защитного покрытия фасонных изделий;
- введена новая балльная система оценок необходимости проведения дополнительного контроля на отслаивание защитного покрытия трубных изделий, позволяющая оптимизировать объемы детального контроля покрытий трубных изделий на отслаивание.

В четвертой главе представлены основные организационно-методические рекомендации по улучшению технологии нанесения покрытия труднодоступных участков деталей и узлов сложной конфигурации.

При нанесении покрытия на изделия сложной конфигурации процесс нанесения покрытия следует начинать с наиболее труднодоступных участков, а затем равномерно покрывать остальную поверхность изделия. В трассовых условиях, когда фасонные изделия расположены в траншее, перечень труднодоступных зон с учетом часовой ориентации представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Труднодоступные участки поверхности фасонных изделий для нанесения покрытия в трассовых условиях

Наименование изделия	Труднодоступные зоны поверхности фасонных изделий
Тройник	Нижняя образующая магистрального патрубка
	Нижняя образующая ответвления
	Участок поверхности стыкового соединения в окрестности нижних образующих магистрального патрубка и ответвления
Шаровый кран	Нижняя часть корпуса
	Участок поверхности в пределах нижней образующей присоединяемых патрубков
	Опоры корпуса крана
	Внутренняя поверхность транспортировочных проушин
	Линии импульсного газа
Отвод	Нижняя образующая



Выполнение оптимизации траектории движения распылительного инструмента необходимо:

- для нанесения гладкого слоя покрытия одинаковой толщины;
- сокращения времени на процесс нанесения;
- экономии материала покрытия.

Основными факторами, которые влияют на оптимизацию технологии нанесения покрытия, являются:

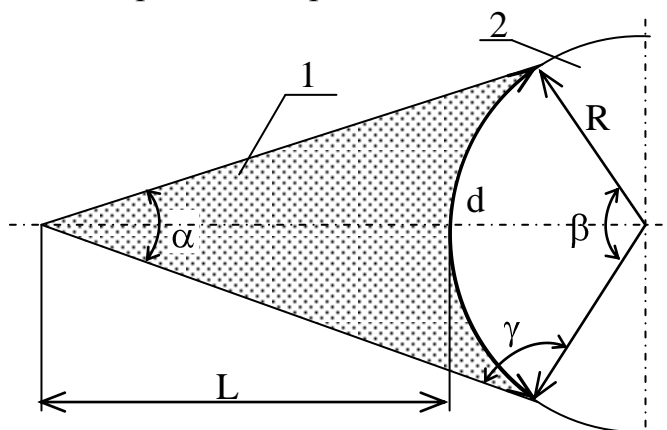
- расстояние между инструментом и металлической поверхностью  $L$ ;
- угол между инструментом и металлической поверхностью;
- степень перекрытия следующей полосой предыдущей полосы;
- скорость перемещения распылительного инструмента  $V$ .

Скорость перемещения распылительного инструмента  $V$  напрямую зависит от расхода  $Q$  и ширины полосы покрытия  $d$  и может быть приблизительно определена из следующего выражения:

$$V = \frac{Q}{d \cdot \delta}. \quad (5)$$

Поэтому необходимо выполнять нанесение покрытия с той скоростью, при которой толщина покрытия будет соответствовать оптимальному диапазону значений. При перемещении со скоростью выше оптимальной образуются непрокрасы, при ниже оптимальной – наплывы и потеки.

Ширина полосы покрытия  $d$  определяется согласно схеме на рисунке 10.



1 – струя покрытия; 2 – металлическая поверхность с радиусом кривизны  $R$

Рисунок 10 – Схема нанесения покрытия на криволинейную поверхность

Согласно теореме синусов угол  $\gamma$  составит:

$$\frac{R}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{L + R}{\sin \gamma} \Rightarrow \gamma = \arcsin \left( \frac{L + R}{R} \sin \frac{\alpha}{2} \right). \quad (6)$$

Угол  $\beta$  составит:  $\beta = 360 - 2\gamma - \alpha$ . Ширина полосы покрытия  $d$  составит:

$$d = \frac{\pi R \beta}{180}. \quad (7)$$

В таблице 9 представлено соответствие размеров элементов фасонных изделий характеристикам распылительного инструмента.

Таблица 9 – Рекомендуемые характеристики распылителя в зависимости от геометрии поверхности нанесения

Типоразмер элемента изделия	Характеристики сопла
Цилиндрические и сферические поверхности диаметром 1020 – 1420 мм	$L=40 - 50$ см, $\alpha=50 - 70^0$
Цилиндрические и сферические поверхности диаметром 820 – 1020 мм	$L=30 - 40$ см, $\alpha=35 - 50^0$
Цилиндрические и сферические поверхности диаметром 630 – 820 мм	$L=20 - 30$ см, $\alpha=25 - 35^0$
Цилиндрические и сферические поверхности диаметром 320 – 630 мм	$L=15 - 20$ см, $\alpha=20 - 25^0$
Цилиндрические и сферические поверхности диаметром < 320 мм	$L=10 - 15$ см, $\alpha=10 - 20^0$
Элементы шарового крана (транспортировочные проушины, линии импульсного газа, ребра жесткости)	$L=10 - 15$ см, $\alpha=10 - 20^0$
Стыковое соединение корпуса и штуцера тройника	На 2 позиции ниже, чем корпус тройника
Стык корпуса крана и присоединяемых патрубков	На 2 позиции ниже, чем корпус крана

Варианты перемещения пистолета-распылителя при напылении покрытия приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Траектория движения пистолета-распылителя

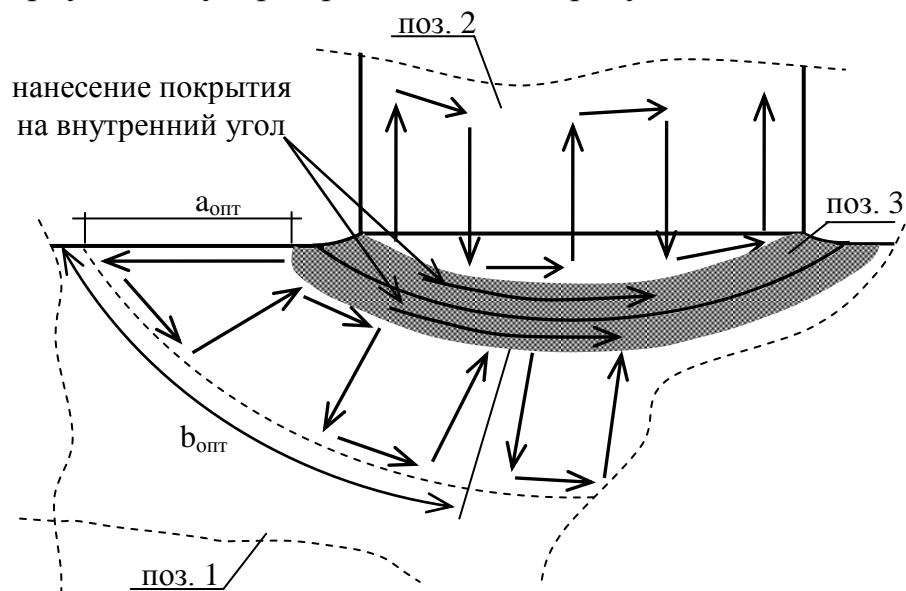
Характеристика движения	Схема движения пистолета-распылителя
Продольно-поперечные движения следует применять при нанесении покрытия на цилиндрические поверхности. Размеры $a$ и $b$ следует принимать для удобства ручной досягаемости человека (оптимальные размеры $a_{\text{опт}}$ и $b_{\text{опт}}$ для поверхностей диаметром 1020 – 1420 мм составляют примерно 50 – 90 см, в иных случаях принимаются пропорционально размерам рабочей поверхности)	
Продольные движения следует использовать при нанесении покрытия на края и углы сопряженных поверхностей, и при нанесении на цилиндрические изделия малого сечения. В данном случае вертикальный размер равен ширине полосы покрытия	
Точечные движения следует применять при нанесении до заполнения при необходимости. Расстояние между центрами пятен покрытия зависит от их ширины, при этом должно быть обеспечено перекрытие по площади 10 – 15 %	

В таблице 11 представлен характер движения пистолета-распылителя для участков поверхности фасонных изделий.

Таблица 11 – Характер движения пистолета-распылителя для участков поверхности фасонных изделий

Вид движения	Фасонное изделие		
	Тройник	Шаровый кран	Отвод
Продольно-поперечные	Корпус и штуцер тройника	Корпус крана, присоединяемые патрубки, зона присоединения стойки привода, опоры корпуса	Поверхность отвода
Продольные движения	Стыковое соединение корпуса и штуцера	Транспортировочные проушины, ребра жесткости, стык корпуса крана и присоединяемых патрубков, линии импульсного газа	—
Точечные	—	Транспортировочные проушины, ребра жесткости, опоры корпуса, стык корпуса крана и присоединяемых патрубков	—

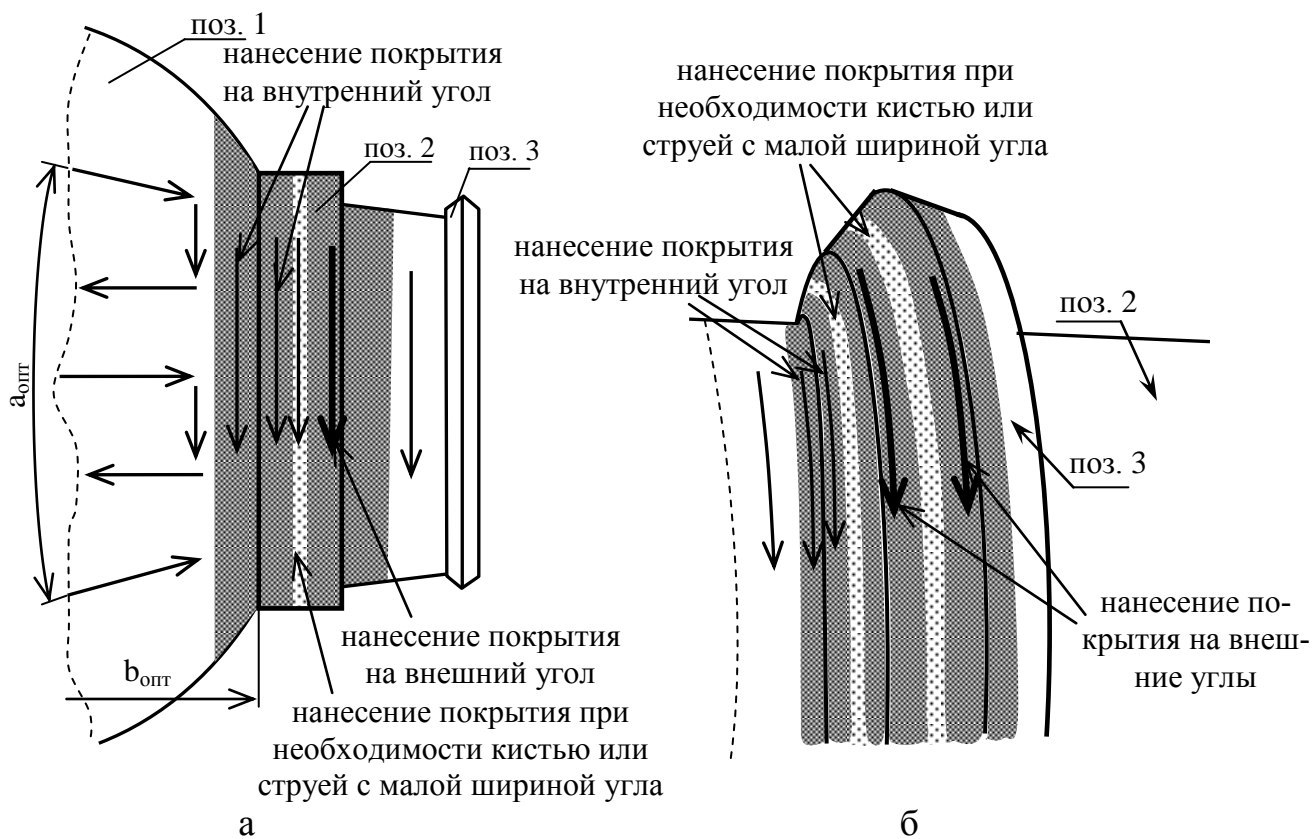
На зону стыка корпуса и штуцера тройника покрытие следует наносить следующим образом: покрытие наносится на стык корпуса и штуцера продольными движениями; нанесение покрытия производится на обе стороны от стыка продольно-поперечными движениями. Схема нанесения покрытия на стыковое соединение корпуса и штуцера представлена на рисунке 11.



1, 2 – магистраль и штуцер тройника; 3 – стыковое соединение

Рисунок 11 – Траектория движения инструмента при нанесении покрытия на стыковое соединение корпуса и штуцера

Нанесение покрытия в области стыка корпуса крана и присоединяемых патрубков следует выполнять продольными движениями (рисунок 12, а). Таким же методом следует наносить покрытия на ребра жесткости (рисунок 12, б).



1 – корпус крана; 2 – присоединяемый патрубок; 3 – ребро жесткости

Рисунок 12 – Схема нанесения покрытия на отдельные элементы шарового крана: стыка корпуса крана и присоединяемых патрубков (а); ребро жесткости на присоединяемом патрубке (б)

Опоры корпуса крана имеют достаточное количество сопряженных поверхностей и незначительные размеры в сравнении с остальными элементами шаровых кранов, а также характеризуются наличием множества выступов и стыков. В данном случае слой покрытия следует наносить равномерно на всю поверхность (см. рисунок 13, а).

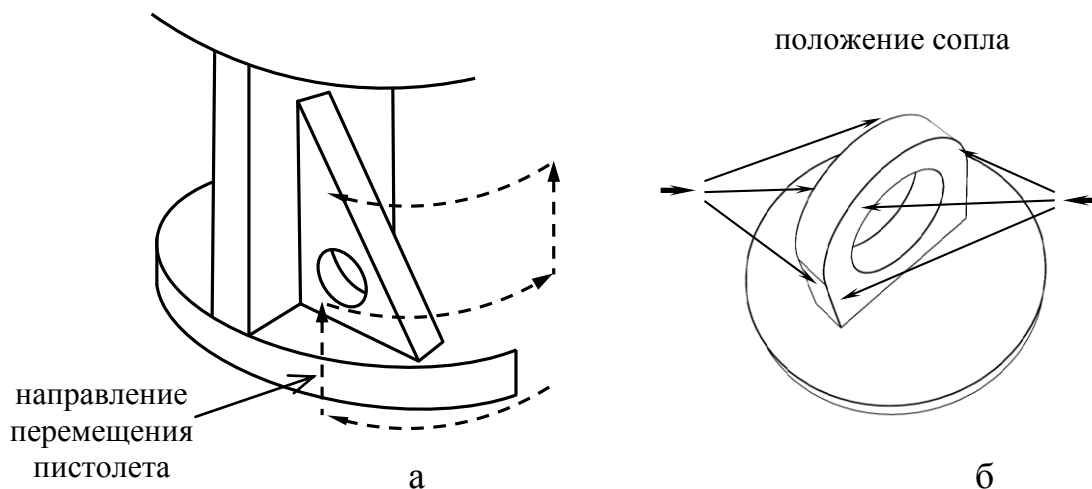


Рисунок 13 – Схема нанесения покрытия на опору корпуса (а) и транспортировочную проушину (б)

На транспортировочную проушину покрытие следует наносить в два этапа (рисунок 13, б):

- продольным движением распылительного инструмента по кругу покрытие наносится на поверхности проушины;
- продольным движением покрытие наносится на зону присоединения проушины к корпусу (радиус зоны составляет 100 – 150 мм).

Наносить покрытия на линии импульсного газа шарового крана следует вертикальными проходами пистолета-распылителя в два этапа, чтобы получить полное покрытие (рисунок 14 а, б). Чтобы избежать потеков или перекосов слоев, рекомендуется увеличить скорость прохода пистолета-распылителя. Допускается наносить покрытие вручную кистью на труднодоступные участки (рисунок 14, б).

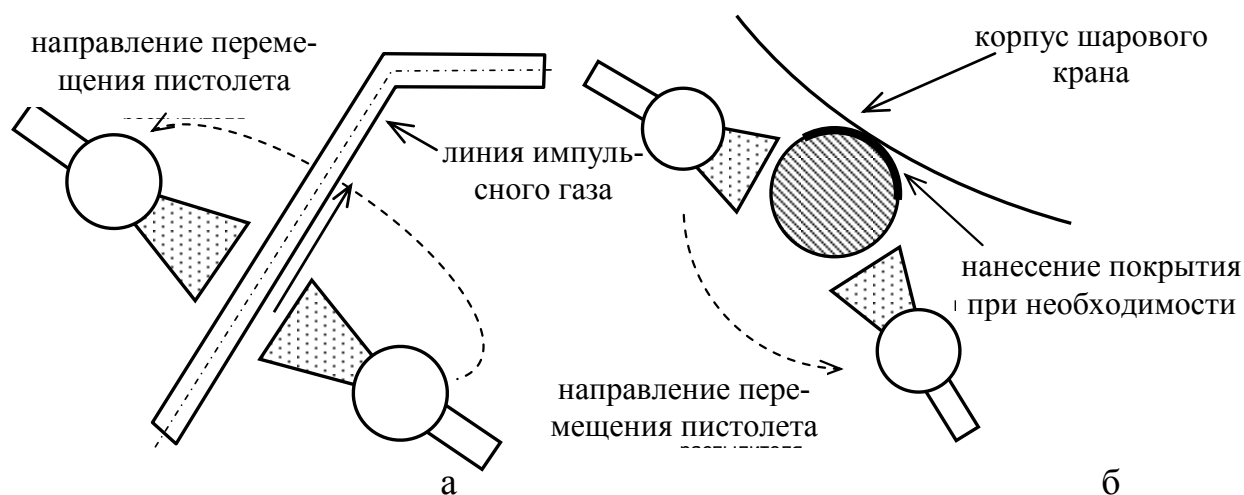


Рисунок 14 – Схема нанесения покрытия на линии импульсного газа шарового крана: общий вид (а); поперечное сечение (б)

Также дополнительной рекомендацией по оптимизации процесса нанесения покрытия является использование армирующих материалов и наполнителей.

#### Основные выводы:

1. Выполнена классификация характерных повреждений покрытия соединительных деталей и запорной арматуры на площадках хранения в зонах с умеренной континентальностью климата для диапазона  $58^{\circ}$  –  $70^{\circ}$  северной широты. Установлено, что распространены следующие виды повреждений покрытия: растрескивание покрытия (63 %), отслаивание (17 %), вздутия (7 %), наплывы (5 %), локальное уменьшение толщины (3 %), срезы (2 %), сколы (2 %).

2. Установлены закономерности изменения климатической устойчивости защитных покрытий запорной арматуры и фасонных изделий, на основании которых предлагаются критерии определения работоспособности покрытия в зонах умеренной континентальности климата с ошибкой прогнозирования  $\pm 10$  %. Установлено, что с увеличением координаты широты площадки хранения от  $58^{\circ}$  до  $70^{\circ}$  северной широты происходит ухудшение климатической устойчивости покрытия, а также уменьшение допустимого срока хранения трубных изделий с покрытием в атмосферных условиях от 4,3 до 2,7 лет.

3. Разработаны и реализованы новые рациональные схемы диагностирования покрытий фасонных изделий магистральных трубопроводов, с избиратель-

ным первоочередным контролем участков имеющих значение итогового балла не менее 3. Проведение входного контроля покрытия необходимо в зонах со сложной геометрией поверхности. У корпусов кранов к таким зонам относятся окрестности опор, окрестности транспортировочных проушин, ребра жесткости. У тройников покрытие равномерное по толщине, за исключением стыковых зон и зон в окрестности продольных сварных швов. У отводов требуется проведение контроля всей поверхности. Таким образом, покрытие в данных зонах наиболее склонно к образованию дефектов.

4. Разработаны рациональные схемы нанесения покрытия при проведении восстановительного ремонта покрытий фасонных изделий диаметром до 1420 мм на основании параметров применяемого оборудования, позволяющие выполнить оптимизацию толщины наносимого покрытия до значений 2,0 – 4,5 мм.

5. Практическая значимость работы заключается в разработке стандарта организации ООО «Газпром трансгаз Ухта» «Рекомендации по контролю и мониторингу состояния защитных покрытий труб, запорной арматуры, соединительных деталей, настройке ЭХЗ МГ при эксплуатации в нестабильных мерзлых грунтах», позволяющего оптимизировать объемы детального контроля покрытий трубных изделий на отслаивание. Эффективность данных рекомендаций подтверждается значением индекса эффективности не менее 3,5.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Кузьбожев А.С., Шишкин И.В., Новоселов Ф.А., Козлов Д.И. Оценка погрешности выявления границ отслоения полимерного покрытия труб ультразвуковым методом // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 4. – С. 45 – 49.

2. Кузьбожев А.С., Шишкин И.В., Новоселов Ф.А., Козлов Д.И. Опыт применения импедансного метода для контроля защитного покрытия труб // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 6. – С. 22 – 25.

3. Кузьбожев А.С., Шишкин И.В., Козлов Д.И. Моделирование распределения напряжений в слое защитного покрытия // Практика противокоррозионной защиты. – 2013. – № 4. – С. 18 – 23.

4. Козлов Д.И. Статистический анализ состояния защитных покрытий крановых узлов и фасонных деталей магистральных газопроводов на основе данных интенсивных электроизмерений // Материалы XIII международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех – 2012» (21 – 23 марта 2012 г., Ухта): в 6 ч.; ч. 6. – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 97 – 99.

5. Козлов Д.И. Анализ характерных повреждений защитного покрытия фасонных деталей на основе трассового сопровождения строительства магистрального трубопровода // Материалы XIII международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех – 2012» (21 – 23 марта 2012 г., Ухта): в 6 ч.; ч. 6. – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 100 – 102.

6. Козлов Д.И., Кузьбожев А.С. Особенности проведения контроля защитного покрытия фасонных изделий // Материалы научно-технической конференции (17 – 20 апреля 2012 г., Ухта): в 3 ч.; ч. 1 / Под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2012. – С. 175 – 178.

7. Козлов Д.И. Доверительность акустического метода выявления границ отслоения полимерного покрытия труб // Материалы VIII международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2012» / Редкол.: А.М. Шаммазов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2012. – С. 67 – 68.
8. Козлов Д.И. Анализ методов контроля технического состояния защитных покрытий трубопроводов // Материалы VIII международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2012» / Редкол.: А.М. Шаммазов и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2012. – С. 69 – 70.
9. Козлов Д.И. Совершенствование методов расчета площади сквозного повреждения защитного покрытия крановых узлов по падению защитного потенциала материалы XIII научно-технической конференции молодежи ОАО «Северные МН» (г. Ухта, 12 – 14 дек. 2012 г.) / Под ред. А.В. Полякова. – Ухта: УГТУ, 2012. – С. 35 – 36.
10. Козлов Д.И., Кузьбожев А.С. Особенности расчета механических напряжений в трубных изделиях сложной формы // Материалы международного семинара «Рассохинские чтения» (8 – 9 февраля 2013 г., Ухта): в 2 ч.; ч. 2 / Под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 51 – 57.
11. Козлов Д.И., Кузьбожев А.С. Методика автоматизированного расчета напряженного состояния защитного полимерного покрытия на трубных деталях для газопроводов // Материалы международного семинара «Рассохинские чтения» (8 – 9 февраля 2013 г., Ухта): в 2 ч.; ч. 2 / Под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 57 – 62.
12. Козлов Д.И. Анализ дефектов защитных покрытий соединительных деталей и запорной арматуры с указанием методов их ремонта // Материалы XIV международной молодежной научной конференции «Севергеозкотех – 2013» (20 – 22 марта 2013 г., Ухта): в 5 ч.; ч. 2. – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 97 – 99.
13. Козлов Д.И., Кузьбожев А.С. Анализ параметров эксплуатационного диагностирования защитного покрытия запорной арматуры // Материалы научно-технической конференции (16 – 19 апреля 2013 г., Ухта): в 3 ч.; ч. 1 / Под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2013. – С. 262 – 265.
14. Козлов Д.И. Анализ особенностей диагностирования защитных покрытий запорной арматуры и соединительных деталей магистральных газопроводов // Материалы V открытой научно-практической конференции молодых работников и специалистов Инженерно-технического центра (г. Ухта, 26 – 28 июня 2013 г.). – С. 20.
15. Козлов Д.И., Кузьбожев А.С., Колтаков С.М., Бурдинский Э.В. Разработка методики анализа неоднородности толщины защитных покрытий на трубных изделиях сложной конфигурации // Материалы международного семинара «Рассохинские чтения» (6 – 7 февраля 2014 г., Ухта): в 2 ч.; ч. 2 / Под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2014. – С. 62 – 66.
16. Козлов Д.И., Кузьбожев А.С., Колтаков С.М., Бурдинский Э.В. Разработка требований к технологии нанесения покрытия труднодоступных участков деталей и узлов сложной конфигурации // Материалы международного семинара «Рассохинские чтения» (6 – 7 февраля 2014 г., Ухта): в 2 ч.; ч. 2 / Под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2014. – С. 66 – 70.