

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н. А.С. Кузьбожев

Ухта – 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Обзор и анализ состояния вопроса диагностирования защитного покрытия соединительных деталей и запорной арматуры	10
1.1 Виды и конструкции защитных покрытий соединительных деталей и запорной арматуры	10
1.2 Технология нанесения защитных покрытий	14
1.3 Современные полиуретановые покрытия, применяемые при строительстве магистральных трубопроводов	20
1.3.1 Анализ свойств полиуретанового покрытия марки «Уризол» соединительных деталей и запорной арматуры магистральных трубопроводов	23
1.3.2 Анализ защитной способности и устойчивости покрытия марки «Кортекор» в условиях низких температур	26
1.3.3 Анализ нормативных требований к защитным покрытиям соединительных деталей и запорной арматуры	33
1.3.4 Анализ нормативных требований к транспортировке и хранению соединительных деталей и запорной арматуры с защитными покрытиями	34
1.4 Обзор и анализ способов диагностирования защитного покрытия	36
1.4.1 Определение адгезионной прочности сцепления покрытия со сталью методом нормального отрыва	37
1.4.2 Контроль толщины покрытия	38
1.4.3 Оценка сплошности покрытия электроискровым методом	39
1.4.4 Акустический контроль сплошности покрытия	42
1.5 Постановка цели и задач диссертационной работы	45
2 Исследование особенностей поведения защитных покрытий фасонных изделий в условиях атмосферного хранения	47

2.1 Общая статистика по дефектам покрытия соединительных деталей и запорной арматуры	47
2.2 Влияние климатических условий районов Крайнего Севера на защитную способность полимерных покрытий	52
2.3 Повышение морозоустойчивости полиуретановых покрытий эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера	53
2.4 Прогнозирование климатической устойчивости защитных покрытий	56
3 Результаты экспериментального исследования и анализа неоднородности толщины защитного покрытия фасонных изделий	60
3.1 Цели и задачи анализа диагностирования защитных покрытий	60
3.2 Напряженно-деформированное состояние покрытий трубных узлов сложной конфигурации	62
3.3 Методика расчета напряженно-деформированного состояния защитного покрытия тройникового узла с применением программного пакета Ansys Mechanical	66
3.3.1 Постановка задачи расчета	66
3.3.2 Ввод исходных данных	67
3.3.3 Тепловой расчет исходной модели	70
3.3.4 Прочностной расчет исходной модели	74
3.4 Характеристики объектов диагностирования	78
3.5 Методика диагностирования состояния покрытия	85
3.5.1 Методика диагностирования защитного покрытия тройников	85
3.5.2 Методика диагностирования защитного покрытия корпуса запорной арматуры	86
3.5.3 Методика диагностирования защитного покрытия крутоизогнутого отвода	88
3.6 Анализ результатов диагностирования защитных покрытий тройников	90
3.7 Анализ результатов диагностирования защитных покрытий шаровых кранов	95

3.8 Анализ результатов диагностирования защитных покрытий крутоизогнутых отводов	101
3.9 Анализ результатов статистической обработки толщины покрытия фасонных изделий	105
4 Разработка требований к технологии трассового нанесения и ремонта защитного покрытия запорной арматуры и соединительных деталей трубопроводов	109
4.1 Общие требования к технологии трассового нанесения покрытия на узлы сложной конфигурации	109
4.2 Разработка порядка и очередности нанесения покрытия на узлы сложной конфигурации	112
4.3 Оптимизация траектории движения инструмента при нанесении покрытия	114
4.4 Требования к технологии нанесения покрытия на криволинейные поверхности деталей и узлов сложной конфигурации	119
4.5 Требования к технологии нанесения покрытия особых труднодоступных участков деталей и узлов	123
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	127
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>	129
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	139

## ВВЕДЕНИЕ

**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  $58^{\circ} - 70^{\circ}$  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 33%,

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, позволяющие 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 рекомен-

дации 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.

### **Достоверность результатов проведенных исследований**

Достоверность полученных результатов измерений обеспечивается проведением натуральных исследований на фасонных изделиях с защитным покрытием, репрезентативным количеством выполненных измерений, а также использованием поверенного измерительного оборудования.

Также была выполнена апробация рациональных схем нанесения покрытия на фасонные изделия в трассовых условиях, что позволило нанести гладкий слой покрытия и снизить неоднородность его толщины, тем самым улучшить качество адгезии покрытия с металлом.

**Внедрение результатов исследований.** Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс для проведения лекций, практических и лабораторных работ по кафедре ПЭМГ по специальностям 130501 «Проектирование, сооружение и эксплуатация газонефтепроводов и газонефтехранилищ» и 131000 «Нефтегазовое дело», что повышает уровень подготовки специалистов в университете.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XIII международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех – 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 молодежи 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 3 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.

# 1 Обзор и анализ состояния вопроса диагностирования защитного покрытия соединительных деталей и запорной арматуры

## 1.1 Виды и конструкции защитных покрытий соединительных деталей и запорной арматуры

В качестве заводских покрытий фасонных соединительных деталей магистральных трубопроводов наибольшее распространение получили полиуретановые, модифицированные полиуретановые (полимочевинные) и эпоксидно-полиуретановые защитные покрытия. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 51164-98 "Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии" (п.4.6) .... изоляционные покрытия крановых узлов, фасонных изделий и сварных стыков труб с заводским покрытием по своим характеристикам должны соответствовать основному покрытию труб [32,33].

Используемые для этой цели битумно-мастичные и полимерные ленточные покрытия по своим физико-механическим, защитным характеристикам, по температурному диапазону применения в значительной степени уступают заводским полиэтиленовым покрытиям труб.

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 Алексашина А. В., Борисова Б. И., Низьева С. Г., Петрова Н. А., Протасова В. Н., Сазонова А. П., Санжаровского А. Т., Стрижевского И. В.

Проведенные исследования по выбору и испытаниям материалов, накопленный отечественный и зарубежный опыт показывают, что для заводской изоляции элементов трубопроводов, имеющих сложную конфигурацию (фасонные соединительные детали, отводы, запорная арматура) в наибольшей степени подходят защитные покрытия, получаемые из полиуретана [42,63].

Полученные данные испытаний показали, что наряду с заводскими полиэтиленовыми покрытиями труб полиуретановые и модифицированные поли-

уретановые покрытия в наибольшей степени отвечают предъявляемым техническим требованиям и способны обеспечить долговременную защиту фасонных изделий от коррозии (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Сравнительный анализ свойств полимерных покрытий

Наименование показателей	Химический тип пленкообразователя		Заводское полиэтиленовое покрытие труб
	Полиуретан	Полимочевина	
1	2	3	4
1. Внешний вид	однородная поверхность без пузырей, трещин, отслоений, пропусков и других дефектов, ухудшающих качество покрытия	однородная поверхность без пузырей, трещин, отслоений, пропусков и других дефектов, ухудшающих качество покрытия	однородная поверхность черного цвета без пропусков, вздутий и отслоений от металла и трещин, обнаруживаемых визуально без применения увеличительных средств
2. Диэлектрическая сплошность, кВ	Отсутствие пробоя при электрическом напряжении 20 кВ на 1 мм толщины покрытия	Отсутствие пробоя при электрическом напряжении 15 кВ на 1 мм толщины покрытия	Отсутствие пробоя при электрическом напряжении 10 кВ на 1 мм толщины покрытия
3. Прочность покрытия при ударе, Дж/мм, при температуре: – минус (40±3) °С – плюс (20±5) °С – плюс (40±3) °С	7,2 10,3 8,2	5,6 5,9 5,5	5,2 5,8 4,7
4. Адгезия покрытия к стали при температуре плюс (20±5) °С при испытании методом нормального отрыва, МПа	7,8 -12,5	7,2 – 9,5	6 – 7,5
5. Снижение адгезии к стали, % от исходной величины, после 1000 ч испытаний в воде при температуре: плюс (20±3)°С плюс (60±3)°С	20 – 25 30 – 40	20 – 25 30 – 40	20 – 25 35 – 45

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
6. Температура размягчения, °С	175 – 200	180 – 210	105
7. Температура плавления, °С	190 – 230	200 – 240	108–115
8. Температура стеклования, °С	-70	-60	-70
9. Площадь катодного отслаивания покрытия, см <sup>2</sup> , после 30 суток испытаний в 3%-ом растворе NaCl при потенциале поляризации 1,5 В, при температуре испытаний: – плюс (20±5) °С – плюс (40±5) °С – плюс (60±5) °С	1,8 4,2 6,3	2,3 5,2 7,1	2,2 3,8 5,6
10. Переходное сопротивление покрытия в 3 %-ом растворе NaCl при температуре (20±5) °С , Ом·м – исходное – после 100 суток испытаний	не менее 10 <sup>7</sup> не менее 7·10 <sup>7</sup>	не менее 10 <sup>8</sup> не менее 10 <sup>7</sup>	не менее 10 <sup>9</sup> не менее 10 <sup>8</sup>
11. Водопоглощение отслоенного покрытия через 1000 часов при плюс (20±5)°С, %	1,2 – 2,1	0,05 – 1,7	0,1 – 0,5
12. Прочность при растяжении отслоенного покрытия при температуре плюс (20±5)°С, МПа	14,4	14,7	10 – 16
13. Относительное удлинение при разрыве отслоенного покрытия при температуре плюс (20±5) °С, %	500 – 800	300 – 400	500 – 600
15. Сопротивление пене-трации (вдавливанию), мм, при температуре плюс (20±5)°С	не более 0,3	не более 0,3	не более 0,3

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
14. Устойчивость покрытия к термоциклированию, количество циклов без отслаивания и растрескивания покрытия, при температурах испытаний от минус $(60\pm 3)^\circ\text{C}$ до плюс $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ и толщинах покрытия: – 2,5 – 3,5 мм – 9,0 – 11,5 мм	более 10 циклов более 10 циклов	более 10 циклов более 10 циклов	более 10 циклов более 10 циклов
16. Удельное электрическое объемное сопротивление, Ом·м	$10^{11} - 10^{12}$	$10^{11} - 10^{12}$	$10^{14} - 10^{15}$

Таким образом, установлено, что по комплексу проведенных испытаний полиуретановые покрытия обладают высокими защитными свойствами: прочностные, температурные, диэлектрические и адгезионные свойства соответствуют параметрам заводского полиэтиленового покрытия.

Видно, что температуры размягчения и плавления покрытия превосходят аналогичный параметр полиэтиленовой композиции. Это необходимо в связи с тем, что нагрев корпуса запорной арматуры, толщина стенки которой в 2 – 3 раза больше толщины стенки трубы, при сварочном процессе осуществляется до более высоких температур. Температура стеклования (охрупчивания) покрытий соответствует отрицательным температурам климата районов Крайнего Севера.

Адгезионные характеристики групп полиуретановых покрытий вполне сопоставимы с заводскими полиэтиленовыми, при этом процесс снижения адгезионной прочности протекает менее интенсивно.

Прочностные характеристики групп полиуретановых покрытий (прочность при растяжении, относительная деформация, сопротивление пенетрации) примерно одинаковы с характеристиками полиэтиленовых покрытий. Также наблюдается низкое влагопоглощение всех групп покрытий (покрытия оберегают объекты от действия воды и погоды). По диэлектрическим показателям

(переходное сопротивление, удельное объемное электрическое сопротивление) покрытия относят к группе изоляторов (диэлектриков).

На основании вышеизложенного анализа свойств полиуретановых покрытий можно сделать вывод о том, что их применение в качестве защитных покрытий запорной арматуры и фасонных соединительных деталей газопроводов вполне допустимо [57].

## 1.2 Технология нанесения защитных покрытий

Полиуретановые покрытия наносятся на фасонные детали следующим образом:

- использование мобильных установок с ручным управлением. Нанесение происходит безвоздушным распылением рабочей смеси компонентов. Применяется как в заводских, так и в трассовых условиях;

- ручное нанесение. Используются валик, кисть, шпатель, двухштоковый микроконтейнер. В основном применяется в трассовых условиях.

Вне зависимости от выбранной технологии нанесения (заводская или трассовая) наружная изоляция фасонных соединительных деталей осуществляется в следующей последовательности:

- очистка и подготовка металлической поверхности перед нанесением покрытия;

- подготовка изоляционных материалов, технологического и вспомогательного оборудования к нанесению покрытия;

- нанесение защитных покрытий;

- контроль качества защитного покрытия.

При производстве работ по очистке наружной поверхности изолируемых изделий и нанесению полиуретанового покрытия применяются средства и оборудование, рекомендованные фирмой-поставщиком изоляционных материалов.

Все работы по нанесению в заводских и трассовых условиях защитного полиуретанового покрытия выполняются специализированными бригадами в соответствии с требованиями проекта и СНиП III-4-80 "Техника безопасности в

строительстве", специалистами, прошедшими обучение, инструктаж и медицинский осмотр [68].

Для удаления пыли, паров и газов из рабочей зоны при проведении работ по очистке и изоляции изделий в заводских (базовых) условиях производят монтаж системы приточно-вытяжной вентиляции.

При проведении переизоляционных работ используют защитные респираторы и маски для предотвращения попадания распыленного материала во внутренние дыхательные пути. Для защиты кожи лица и рук используют защитные костюмы и перчатки [31, 80].

В процессе нанесения покрытия механическим путем перемешивание материалов продолжается благодаря перекачке материалов в установке. Перед началом распыления полиуретанового покрытия с помощью установки прогревают основной компонент и отвердитель до заданной температуры, обеспечив при этом их непрерывную циркуляцию.

Осуществляется отдельный подогрев компонентов (температура основы – 50 – 60°C, температура отвердителя – около 20°C), с подачей компонентов отдельными насосами и соединением основы и отвердителя в заданной пропорции в миксере на распылительной головке.

Прежде чем наносить покрытие на поверхность металлических изделий выполняется нанесение покрытия на лист гладкого полиэтилена или полипропилена. При этом отрабатывается оптимальный рисунок движения пистолета-распылителя, характер его положения, расстояние до изолируемой поверхности, количество наносимых слоев для получения заданной толщины покрытия.

Через несколько минут пробное покрытие отделяется от гладкой поверхности полиэтилена (полипропилена), оценивается его толщина и качество.

Маляры перемещают подготовленные изделия в окрасочную камеру. Маляр контролирует в камере температуру и влажность воздуха, определяет точку росы, контролирует температуру поверхности изделий при помощи соответствующих приборов. Измерительные приборы должны быть поверены.

Для предотвращения конденсации влаги температура изолируемой по-

верхности выше точки росы не менее, чем на  $3^{\circ}\text{C}$ , а относительная влажность воздуха не превышает 85%. Если температура изделий превышает точку росы не менее чем на  $3^{\circ}\text{C}$ , то можно наносить покрытие на поверхности изделий. Если температура поверхности изделий ниже чем на  $3^{\circ}\text{C}$  точки росы, то производится дополнительный подогрев изделий в камере.

Рабочие режимы нанесения покрытий производятся в соответствии с рекомендациями производителей материалов.

В начале напыления на поверхность стали покрытие напыляют первые 3 – 4 секунды не на защищаемую поверхность, а в пластиковый мешок или другую емкость для предотвращения попадания на поверхность растворителя из тонкого шланга высокого давления, смесителя и распылителя. Попадание растворителя вызывает вздутие покрытия и его размягчение.

Нанесение покрытия на изделия производится по длине изделия, у торцов рекомендуется проходить несколько проходов по диаметру.

При нанесении покрытия на изделия сложной конфигурации (фасонные изделия, места врезок трубопроводов и т.д.) процесс напыления покрытия начинают с наиболее труднодоступных участков, а затем равномерно покрывают остальную поверхность изделия [80,84].

В процессе распыления изоляционных материалов направляют пистолет-распылитель под прямым углом к изолируемой поверхности и удерживают его на расстоянии около 40 – 50 см от поверхности.

Нанесение покрытия на изделие производится участками, в виде полос, по несколько проходов, нанесенная полоса покрытия перекрывает полосу от предыдущего нанесения на  $1/3$ . Покрытие на изделие наносится за несколько проходов. Количество проходов определяется размерами и формой поверхности изделия.

Для того, чтобы не образовывалось потеков, и для нанесения покрытия равномерной толщины производится 5 – 10 проходов при нанесении каждой очередной полосы. Количество проходов зависит от площади покрытия, диаметра сопла форсунки.

Длина неизолированных концевых участков для соединительных деталей и монтажных узлов трубопроводов изготавливается согласно таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Длина неизолированных концевых участков

Тип изделия	Нормативный документ	Угол поворота, град	Условный проход магистрали, Dн, мм	Длина неизолированных концевых участков на деталях без переходных и удлинительных колец, мм		Длина неизолированных концевых участков на деталях с переходными и удлинительными кольцами, мм
				Магистраль	Ответвление	
Отводы крутоизогнутые	ГОСТ 17375-2001	90 <sup>0</sup>	219-426	80±20	-	-
Отводы крутоизогнутые	ГОСТ 30753-2001	45 <sup>0</sup> -90 <sup>0</sup>	530-630	80±20	-	-
Отводы штамповсварные	ТУ 102-488-95	45 <sup>0</sup> -	720-820	80±20	-	130±20
		90 <sup>0</sup>		130±20	-	
Отводы штамповсварные	ТУ 102-488-95	45 <sup>0</sup> -90 <sup>0</sup>	1020-1420	130±20	-	130±20
Отводы гнутые	ТУ 102-488-95	1 <sup>0</sup> -90 <sup>0</sup>	219-1420	130±20	-	-
Отводы гнутые	ГОСТ 24950-81	1 <sup>0</sup> -27 <sup>0</sup>	219-1420	130±20	-	-
Переходы штамповсварные	ТУ 102-488-95	-	530-1420	80±20	-	130±20
Тройники штамповсварные	ТУ 102-488-95	-	530-1020	80±20	80±20	130±20
Тройники штамповсварные	ТУ 102-488-95	-	1220-1420	130±20	80±20	130±20
Переходы штамповсварные	ТУ 102-488-95	-	530-1420	80±20	-	130±20
Днища	ТУ 102-488-95	-	1020-1420	80±20	-	-
			530-1420	-		130±20

Длина неизолированных концевых участков на монтажных узлах трубопроводов соответствует длине неизолированных концевых участков соответствующих изделий. Длина неизолированных концевых участков на изделиях не указанных в таблице составляет  $(80\pm 20)$  мм или  $(130\pm 20)$  мм. Выбор длины зависит от типоразмера изделия и согласовывается с заказчиком [71, 74].

При начале процесса напыления и в конце напыления, когда нажимается и отпускается курок распылителя, пистолет направляют мимо покрываемого изделия, чтобы струя материала не попадала на его поверхность. По окончании распыления измеряют толщину покрытия гребенкой на различных участках изделия и при необходимости наносят дополнительный слой покрытия.

Время высыхания покрытия зависит от температуры окружающего воздуха и температуры поверхности изделия.

Изделия устанавливаются таким образом, чтобы был обеспечен максимальный доступ к их поверхности. Такое пространственное положение изолируемых изделий имеет следующие преимущества:

- снижается трудоемкость процесса нанесения (устраняется необходимость в перестановке изделий для продолжения процесса нанесения);
- покрытие наносится за один цикл (в противном случае возможно плохое сцепление между слоями и конструкция покрытия может быть не монолитной).

В случае если дополнительный, верхний слой покрытия нанесен на изолируемую поверхность по прошествии 3 часов и более после нанесения предыдущего слоя, между этими слоями не будет достаточного сцепления. В таких случаях производят абразивную очистку изолированного участка наждачной бумагой, шлифмашинкой, пескоструйным методом и лишь затем наносят дополнительный слой покрытия.

В случае остановки напыления не позднее чем через 5 – 7 секунд промывают систему тонкого шланга, распылитель растворителем, входящим в систему установки. В качестве растворителя используют толуол, метилэтилкетон, их смеси.

Более поздняя промывка тонкого шланга высокого давления и распылителя приводит к забивке их материалом отвержденного покрытия и выходе из строя.

При нанесении покрытия ручным способом с учетом короткого времени жизни смеси (около 10 минут при 20°C) общий объем подготовленной смеси не превышает того количества, которое может быть нанесено за период ее "жизни".

Для снижения времени на смешение компонентов используют дрель с насадкой. Целесообразно, чтобы один человек смешивал компоненты, а другой наносил материал. Покрытие наносят кистью с короткой жесткой щетиной или валиком. Поверхность изолируемого изделия при этом хорошо очищена, сухая и имеет температуру не менее, чем на 3°C выше точки росы.

При необходимости нанесения второго слоя покрытия (для получения покрытия заданной толщины) осуществляют сушку первого слоя и лишь затем, по истечению 2 – 4 часов, наносят второй слой покрытия. Если время сушки первого слоя превысит 24 часа, то поверхность покрытия зашкуривается до получения однородного матового цвета, после чего наносится второй слой покрытия [80].

При выполнении изоляционных работ в трассовых условиях во время дождя или при выпадении других осадков (снег, иней, туман и др.) процесс нанесения покрытия прекращается.

Если дождь начнется во время проведения изоляционных работ, то прекращают работу или принимают меры для того, чтобы влага не попадала на обработанную поверхность (оборудуют место проведения работ укрытием, палаткой и т.д.) [20,66].

Нанесение антикоррозионных покрытий на трубы, соединительные детали, запорную арматуру и монтажные заготовки в заводских (базовых) условиях имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с трассовой изоляцией. Некоторые типы покрытий практически невозможно нанести в условиях трассы.

Основные преимущества заводского нанесения покрытий:

- высокое качество подготовки поверхности нанесению;
- постоянный автоматизированный контроль за технологическим процессом нанесения;
- постоянный аппаратный контроль качества получаемых покрытий;
- автоматизированное нанесение покрытий;
- высокая производительность применяемого оборудования;
- гарантированное качество выпускаемой продукции [22,56].

### 1.3 Современные полиуретановые покрытия, применяемые при строительстве магистральных трубопроводов

Полиуретаны состоят из двух типов сырья, изоцианата и полиола, которые получают из сырой нефти. При смешивании двух готовых к переработке жидких компонентов системы, которые содержат различные вспомогательные средства (катализаторы, вспениватель, стабилизаторы и т.д.), образуется реакционно-способная смесь.

В зависимости от рецептуры и соотношения компонентов, при соответствующей технологии можно отрегулировать спектр свойств образующегося полиуретана – можно получить жесткий, мягкий, интегральный, ячеистый (вспененный) или монолитный.

Полиуретаны могут быть вязкими жидкостями или твердыми продуктами – от высокоэластичных мягких резин до жестких пластиков и перерабатываются практически всеми существующими технологическими методами: экструзией, прессованием, литьем, заливкой.

Важнейшее свойство, которым обладает полиуретан – высокая износостойкость, которая сочетается с не менее высокой масло-, бензо- и озоностойкостью. Полиуретан так же имеет превосходные демпфирующие, теплофизические и эластичные свойства.

Наиболее спорным вопросом, относящимся к получению полиуретановых

покрытий, является их адгезионная прочность. Одни и те же авторы по этому вопросу приводят противоречивые сведения. С одной стороны, они утверждают, что увеличение количества полиуретановых связей в структуре сетчатого полимера улучшает адгезионные свойства покрытий, с другой – глубоко сшитые структуры на начальной стадии реакции уретанизации ухудшают адгезию пленки. Эти же авторы считают, что адгезионная прочность покрытия снижается с ростом температуры его отверждения, начиная с 50 – 60<sup>0</sup>С, за счет повышения интенсивности теплового движения сегментов и из-за разрушения межмолекулярных водородных связей. Но в то же время утверждают, что адгезия полиуретановых покрытий, полученных при 20<sup>0</sup>С, заметно ниже, чем покрытий, отвержденных при повышенных температурах. Единственно, что не вызывает сомнения, это зависимость поверхностной энергии пленкообразователя и подложки.

Адсорбционная (молекулярная) теория исходит из правила полярности: высокой адгезии нельзя достичь между полярной подложкой и неполярным пленкообразователем, как и в противоположном случае. Полиуретан, имеющий низкую поверхностную энергию, не способен обеспечивать хорошую адгезионную прочность с большинством высокополярных подложек.

При отверждении полиуретанового покрытия в естественных условиях подбирают в качестве грунтовочного слоя термопластичную грунтовку с поверхностной энергией приблизительно такой же, как и у подложки.

Если к антикоррозионным свойствам полиуретанового покрытия не предъявляют очень высоких требований, то адгезию повышают за счет снижения концентрации в полимере уретановых связей, так как это уменьшит его когезионную прочность, но улучшит ориентацию макромолекул к подложке.

Известно, что хорошие защитные свойства покрытия зависят не только от глубины химических превращений, но и от величины адгезии к подложке. Однако не следует забывать, что адгезия полиуретанового покрытия и глубина химических превращений находятся во взаимном противоречии: чем чаще химические связи в полимере, тем хуже адгезионная прочность покрытия. Это

связано, по-видимому, со способностью уретановых групп образовывать в первую очередь водородные связи, прочность которых составляет 13–15 ккал/моль [23,56].

К новому классу защитных покрытий относятся быстро отверждающиеся покрытия на основе полимочевины.

Монолитные и эластичные покрытия на основе полимочевины начали применяться на территории РФ в качестве наружных защитных покрытий труб и соединительных деталей трубопроводов всего в начале 21 века [25,44,66].

При всем многообразии полимерных покрытий, полимочевина занимает в их ряду особое место благодаря следующим уникальным особенностям:

– большинство традиционных полимерных покрытий (эпоксидных, полиэфирных, акриловых, хлорсульфополиэтиленовых, каучуковых, и др.) наносятся тонкими слоями в несколько проходов с длительной промежуточной сушкой и отверждаются только при положительных температурах в течение от нескольких часов до нескольких суток. Высокая скорость химической реакции отверждения полимочевины дает возможность наносить покрытие требуемой толщины (до нескольких миллиметров) без подтеков за один проход, перемещаться по покрытию или совершать внутрицеховые перевозки изделий с покрытием практически сразу после его нанесения, сокращая до минимума время простоя и повышая производительность. При этом известны примеры успешного напыления полимочевины на холодную поверхность с высоким теплопоглощением, например сталь, при  $-20^{\circ}\text{C}$ . Такая непревзойденно низкая чувствительность полимочевины к температуре окружающей среды и основания уменьшает негативную роль сезонного фактора при проведении изоляционных работ в строительстве.

– покрытия на полиэтиленовой основе наносятся только на идеально сухую поверхность с температурой, превышающей точку росы не менее чем на  $3^{\circ}\text{C}$ , при относительной влажности воздуха не более 80%. Содержимое бочек с компонентами даже в течение короткого времени работы должно быть надежно изолировано от контакта с атмосферной влагой. Выполнение этих требований

не всегда возможно или затруднительно, а несоблюдение их приводит к большим экономическим потерям в виде безнадежно испорченного покрытия вследствие его подвспенивания или наличия микропор, мелких отверстий, пузырьков и кратеров. Напротив, скорость реакции мочевинообразования столь высока, что побочная реакция изоцианата с водой не может с ней конкурировать, и опасности выделения  $\text{CO}_2$  не существует. Поэтому полимочевина мало чувствительна к влажности и может наноситься в экстремальных условиях, при которых все остальные полимерные покрытия неработоспособны.

– отсутствие примесей (в отличие от большинства полимерных покрытий, содержащих большие или меньшие количества летучих органических растворителей, вызывающих проблемы, связанные с их пожарной опасностью и токсичностью, данный тип покрытий представляет собой полимер со 100%-ным содержанием твердой фазы, отвечающий самым строгим экологическим требованиям. Полимочевинное покрытие не содержит пластификаторов, склонных с течением времени к «выпотеванию», сопровождаемому постепенной усадкой и охрупчиванием полимерной пленки. В нем нет и часто добавляемых для удешевления, но обладающих канцерогенным воздействием на организм человека каменноугольных смол и дегтей, равно как и твердых наполнителей, вызывающих абразивный износ насосов, смесительных камер и сопел распылительных установок) [6,61,73].

1.3.1 Анализ свойств полиуретанового покрытия марки «Уризол» соединительных деталей и запорной арматуры магистральных трубопроводов

Покрытие марки «Уризол» применяют на объектах строительства газопровода в условиях Крайнего Севера для защиты запорной арматуры и фасонных соединительных деталей.

«Уризол» наносят в заводских (базовых) и трассовых условиях на изолируемые изделия методом «горячего» безвоздушного распыления с помощью специальных установок высокого давления. Покрытие «Уризол» имеет следующий ряд преимуществ:

– оптимальная скорость полимеризации (с момента смешения компонентов в распылительном пистолете начинается химическая реакция образования полимочевины, сопровождаемая переходом системы из жидкого состояния в нетекучее гелеобразное, а затем и в твердое состояние. Если скорость полимеризации недостаточно высока, невозможно быстро наращивать толщину слоя покрытия из-за образования подтеков, а долго сохраняющаяся липкость препятствует проведению промежуточных контрольных замеров толщины и сплошности покрытия, внутрицеховых перемещений изделий и т.д. Напротив, при чрезмерно быстрой полимеризации ухудшается адгезия покрытия к стали, проявляются «шагрень» и разнотолщинность изоляции, часто засоряется распылительный пистолет. Тщательный подбор состава компонентов покрытия «Уризол» позволил избежать таких крайностей).

– автокаталитическая реакция (высокая реакционная способность компонентов полимочевины обеспечивает полимеризацию в отсутствие катализаторов. Следствием автокаталитической реакции являются стабильность свойств системы в процессе ее хранения и воспроизводимость результатов в различных условиях применения, а также при переходе от одной партии сырья к другой. Повышению надежности технологического процесса напыления полимочевины способствует также ее относительно низкая чувствительность к влажности и температуре, например в сравнении с полиуретановыми покрытиями аналогичного назначения. Полиэтилены значительно более склонны к образованию пористых пленок вследствие реакции с влагой, всегда присутствующей в исходных сырьевых компонентах, на изолируемой поверхности и в окружающем воздухе. Разумеется, это преимущество полимочевины реализуется только при соблюдении требований к подготовке изолируемой поверхности) [66].

Покрытие «Уризол» используется для промышленного нанесения на наружную поверхность изделий, предназначенных для строительства и реконструкции объектов магистральных трубопроводов. Основные физико-механические свойства покрытия представлены в таблице 1.3 [61].

Таблица 1.3 – Физико-механические свойства покрытия «Уризол»

Показатели свойств покрытия	Норма по техническим требованиям ОАО «Газпром»	Результаты испытаний
1	2	3
1. Внешний вид	Однородная поверхность без пузырей, трещин, отслоений, пропусков и других дефектов, ухудшающих качество покрытия	Соответствует
2. Диэлектрическая сплошность покрытия. Отсутствие пробоя при электрическом напряжении, кВ/мм, не менее	5	15
3. Прочность при ударе, Дж/мм, при температурах: – минус (30±3)°С – плюс (20±5)°С – плюс (40±3)°С	не менее 5,0 не менее 5,0 не менее 5,0	5,6 5,9 5,5
4. Адгезия к стали при температуре плюс (20±5)°С при испытании методом отрыва, МПа	не менее 7,0	8
5. Снижение адгезии к стали, % от исходной величины, после 1000 ч испытаний в воде при температуре плюс (60±3)°С	40	36
6. Площадь катодного отслаивания, см <sup>2</sup> , при поляризации 1,5 В не более: – плюс (20±5)°С 30 суток – плюс (60±3)°С 7 суток	8,0 10,0	4,5 4,8
7. Переходное сопротивление, Ом×м <sup>2</sup> ,: – исходное – после 100 суток выдержки в 3% растворе NaCl при температуре плюс (60±3)°С	10 <sup>8</sup> 10 <sup>7</sup>	4·10 <sup>8</sup> 10 <sup>7</sup>
8. Сопротивление пенетрации (вдавливанию), мм, не более: – при температуре плюс (20±5)°С – при температуре плюс (60±3)°С	0,3 20	0,28 16
9. Водопоглощение отслоенного покрытия после 1000 ч испытаний, %, не более, при температуре плюс (60±3)°С	5,0	4,7
11. Относительное удлинение при разрыве при температуре плюс (20±5)°С, %, не менее	20	344,3

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3
12. Устойчивость к термоциклированию, количество циклов без отслаивания и растрескивания покрытия, в диапазоне температур от минус $(60\pm 3)^{\circ}\text{C}$ до плюс $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ , не менее	10	10
13. Поры на срезе покрытия на границе между металлом и покрытием при 3-5 кратном увеличении под углом $(35\pm 5)^{\circ}$	Отсутствие пор на границе между металлом и покрытием	Соответствует

### 1.3.2 Анализ защитной способности и устойчивости покрытия марки «Кортекор» в условиях низких температур

Данный тип покрытия прошел внедрение в условиях ЗАО «Тяжпромарматура» (г. Алексин). Покрытие наносится на фасонные изделия методом безвоздушного распыления, при температуре компонентов  $60 - 80^{\circ}\text{C}$  и соотношении компонентов 1:1. Испытания защитного покрытия, проводимые ООО «Институт ВНИИСТ», показали (см. таблицу 1.4), что покрытие «Кортекор-867» выдерживает без растрескивания и отслаивания как длительные испытания на воздухе при температурах до минус  $70^{\circ}\text{C}$ , так и испытания на устойчивость к термоциклированию в диапазоне температур от минус  $60^{\circ}\text{C}$  до плюс  $20^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 1.4 – Результаты испытаний полиуретанового покрытия «Кортекор-867» ООО «КорТех»

Наименование показателей	Данные испытаний
1	2
1. Диэлектрическая сплошность, кВ	Отсутствие пробоя при 20 кВ
2. Прочность покрытия при ударе, Дж, не менее при температуре:	
– минус $(45\pm 3)^{\circ}\text{C}$	20,6
– минус $(40\pm 3)^{\circ}\text{C}$	21,6
– плюс $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$	32,0
– плюс $(40\pm 3)^{\circ}\text{C}$	24,5

Продолжение таблицы 1.4

1	2
3. Адгезия покрытия к стали при температуре плюс (20±5) °С при испытании методом нормального отрыва, МПа	7,8 -12,5
4. Площадь катодного отслаивания покрытия, см <sup>2</sup> , после 30 суток испытаний в 3%-ом растворе NaCl при потенциале поляризации 1,5 В, при температуре испытаний: – плюс (20±5) °С – плюс (40±5) °С – плюс (60±5) °С	0,8 3,2 5,3
5. Переходное сопротивление покрытия в 3 % - ом растворе NaCl при температуре (20±5) °С , Ом·м – исходное – после 100 суток испытаний	10 <sup>6</sup> 7·10 <sup>6</sup>
6. Водопоглощение отслоенного покрытия через 1000 часов при плюс (20±5)°С,	2,3
7. Прочность при растяжении отслоенного покрытия при температуре плюс (20±5)°С, МПа	14,4
8. Относительное удлинение при разрыве отслоенного покрытия при температуре плюс (20±5) °С, %	40
9. Устойчивость покрытия к термоциклированию, количество циклов без отслаивания и растрескивания покрытия, при температурах испытаний от минус (60±3)°С до плюс (20±5)°С и толщинах покрытия: – 2,5 – 3,5 мм – 9,0 – 11,5 мм	более 10 циклов более 10 циклов

Для исследований использовали покрытие «Кортекор-867», которое наносили на образцы из стали Ст20 в заводских условиях. Покрытие наносили на подготовленную методом дробеструйной обработки до шероховатости 100±20 мкм и очищенную поверхность образцов. Были изготовлены образцы с

толщиной покрытия 1,0; 3,2; 5,0 и 11,5 мм.

Коррозионные испытания проводили следующим образом. На покрытие стальной пластинки приклеивали цилиндрическую ячейку диаметром 40 мм, в которую заливали 3 %-й раствор NaCl. Ячейку закрывали фильтровальной бумагой и помещали в термостат с температурой плюс 30 °С; в ячейку периодически доливали воду. Пластины с покрытием взвешивали до и после испытаний на аналитических весах ВЛР-200 с точностью до четвертого знака. Потерю массы образцов (или привес) с единицы площади покрытия за фиксированное время определяли по формуле:

$$K = (m_0 - m_1) / S, \quad (1.1)$$

где  $m_0$  и  $m_1$  – масса образца до и после испытаний, г;  $S$  – площадь контакта покрытия с 3 %-м раствором NaCl, см<sup>2</sup>.

В таблице 1.5 приведены результаты длительных испытаний покрытия «Кортекор-867» различной толщины в 3%-м растворе NaCl.

Таблица 1.5 – Результаты коррозионных испытаний покрытий «Кортекор-867» в 3 %-м растворе NaCl при температуре плюс 30 °С

Толщина покрытия, мм	Потеря массы образцов (-) или привес (+) $\Delta m$ , $1 \cdot 10^{-4}$ г/см <sup>2</sup> за время испытаний, сут							Внешний вид покрытия
	10	60	90	120	150	180	210	
1,0	+2,5	+3,5	+3,9	+4,2	-1,2	-2,3	-2,5	Покрытие без изменений: отслаиваний, вспучивания, расслоения, растрескивания нет. Под покрытием коррозия отсутствует
3,2	+2,5	+2,9	+3,3	+3,7	+3,7	-0,8	-1,7	То же
5,0	+2,2	+2,4	+2,4	+2,6	+2,7	+2,5	+2,5	То же
11,5	+2,2	+2,5	+2,6	+2,8	+2,7	+2,7	+2,8	То же

Как видно из представленных данных, для всех толщин покрытия в течение первых 120 суток испытаний наблюдается небольшой привес массы, что

связано, по-видимому, с начальным небольшим набуханием полимерного материала и проникновением электролита в поры покрытия.

Для толщины покрытия 1,0 и 3,2 мм после 150 и 180 суток испытаний соответственно наблюдалась небольшая потеря массы образцов за счет незначительной коррозии (потери не превышали  $2,5 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>2</sup>); после удаления покрытия явных коррозионных поражений стали не обнаружено.

Для покрытия «Кортекор-867» с толщиной 5,0 и 11,5 мм за время испытаний 210 суток потерь массы металла не обнаружено. Процесс проникновения электролита в покрытие большей толщины также существенно уменьшился (привес не превышал  $2,8 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>2</sup> за 210 суток испытаний). Внешний вид покрытия различной толщины за длительное время испытаний не изменился; отслоения, трещин, вспучивания покрытия выявлено не было [51].

Для оценки работоспособности материала покрытия в условиях низких температур образцы с покрытием помещали в криокамеру и выдерживали при температуре минус 75 °С в течение 20 суток. После испытаний определяли наличие отслоений, трещин, вспучивания покрытий, внешний вид, ударную прочность, пробивное напряжение, удельное электрическое сопротивление, адгезию (таблица 1.6). По результатам исследований установлено, что внешних изменений покрытия по сравнению с исходным состоянием не наблюдается; растрескивание, отслаивание, а также пузырение отсутствуют.

Наряду с высокой морозостойкостью покрытия «Кортекор-867», следует отметить его высокую прочность при ударе в широком диапазоне температур и достаточно высокую эластичность защитного покрытия.

Ниже приведены результаты исследований покрытия «КОРТЕКОР-867». Испытания при воздействии агрессивных сред и атмосфер были проведены на стальных пластинах 100\*50\*2 мм, предварительно обезжиренных, отдробеструенных и обеспыленных. На подготовленные таким образом образцы в заводских условиях наносили покрытие «КОРТЕКОР-867». Толщина покрытий составляла 1,0; 3,2; 5,0; 11,5 мм.

Таблица 1.6 – Внешний вид покрытия «Кортекор-867» в исходном состоянии и после испытаний при температуре минус 75 °С в течение 20 суток

Толщина покрытия, мм	Внешний вид покрытия до испытаний	Внешний вид покрытия после испытаний
1,0	Покрытие черного цвета, глянцевое, однородной структуры, плотное, без видимых поверхностных дефектов	Внешний вид покрытия не изменился, глянец слегка потускнел. Отслаивания, трещин, вспучивания, коррозии основного металла не обнаружено
3,2	То же	Легкое потускнение покрытия. Отслаивания, трещин, пузырения покрытия, коррозии стали под покрытием не обнаружено
5,0	То же	То же
11,5	То же	То же

Испытания в климатических камерах, имитирующих условия эксплуатации в умеренно-холодном и холодном климате, проводили по методу 13 ГОСТ 9.401-91. Образцы с покрытиями помещали в камеру влажности и выдерживали при  $t=+40\pm 2^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности  $\varphi=97\pm 3\%$  в течение 2-х часов. Затем обогрев камеры выключался и образцы выдерживали в ней 2 часа. Далее образцы переносили в камеру холода и выдерживали при  $t=-30\pm 3^{\circ}\text{C}$  в течение 6 часов. Из камеры холода образцы переносили в термокамеру и выдерживали в течение 5 часов при  $t=+60\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Из термокамеры образцы переносили в камеру холода и выдерживали при  $t=-60\pm 3^{\circ}\text{C}$  в течение 3-х часов. Затем образцы выдерживали на воздухе при комнатной температуре 15...30°C и относительной влажности воздуха не более 80% в течение 6 часов. Это составило 1 цикл испытаний. Всего было проведено 240 циклов. Осмотры образцов осуществляли через 30, 60, 90, 120, 150, 180 и 240 циклов (суток) испытаний [31].

До и после климатических испытаний определяли следующие физико-технические свойства покрытия: прочность покрытия при ударе в соответствии

с ГОСТ 4765-73 на приборе У-1; твердость покрытия по маятниковому прибору М-3 в соответствии с ГОСТ 5233-67; удельное объемное электрическое сопротивление ( $\rho_v$ ) в соответствии с ГОСТ 6433.2-71 и пробивное напряжение по ГОСТ 6433.4-71 на приборе тераомметр Еб-13А со специальной рабочей площадкой для закрепления образцов.

В таблице 1.7 приведены обобщенные данные по физико-механическим, диэлектрическим свойствам покрытия «КОРТЕКОР-867» различной толщины после всех видов испытаний (в водном 3% раствор NaCl (имитат морской воды) и в камере солевого тумана).

После воздействия агрессивной среды все характеристики покрытия «Кортекор 867» несколько снизились, причем в большей степени для покрытия с толщиной 1,0 мм. Можно отметить, что для толщины 3,2 мм прочность покрытия при ударе, твердость, диэлектрические характеристики практически не изменились, а адгезия незначительно уменьшилась. Для покрытия с толщиной 5,0; 11,5 мм эти характеристики после 210 суточных испытаний в 3% растворе NaCl практически не изменились, оставшись на уровне, близком к исходному.

Таким образом, результаты испытаний в 3% растворе NaCl показывают, что покрытие «Кортекор 867» толщиной от 3,2 до 11,5 мм обладает высокими защитными свойствами и сохраняет свои физико-технические характеристики на уровне, близком к исходному состоянию. Высокая эффективность полиуретанового покрытия «Кортекор 867» обусловлена более плотной трехмерной структурой материала, имеющей малую пористость. Такая структура существенно затрудняет проникновение электролита к поверхности стали, практически полностью изолирует его от агрессивной водно-солевой среды [1,31].

После испытаний в камере холода, образцы с покрытием выдержали 12 часов при комнатной температуре в эксикаторе с плавленым CaCl<sub>2</sub> и определили прочность покрытия на удар, твердость, диэлектрические характеристики и адгезию. В таблице 1.7 представлены результаты, из которых видно, что эти характеристики практически не изменились по сравнению с исходными. Таким образом, «Кортекор 867» сохраняет свои физико-механические и защитные

свойства при длительном воздействии очень низких отрицательных температур.

Таблица 1.7 – Физико-механические и диэлектрические характеристики покрытия «КОРТЕКОР-867» различной толщины в исходном состоянии и после испытаний в различных агрессивных средах

Толщина покрытия, мм	Состояние покрытия	Прочность покрытия при ударе, кг·см	Твердость по маятниковому прибору М-3, усл. ед.	Удельное объемное электрическое сопротивление $\rho_v$ по, Ом·м	Пробивное напряжение, кВ
1,0	исходное состояние	85,0	0,20	$4,5 \cdot 10^{11}$	9,2
	после 210 суток испытаний в 3% растворе NaCl	80,0	0,22	$2,7 \cdot 10^{11}$	9,0
	после испытания при $t=-75^{\circ}\text{C}$ , 20 суток	85,0	0,23	$3,8 \cdot 10^{11}$	9,2
	после 240 суток испытаний по режиму УХЛ2	80,0	0,22	$1,3 \cdot 10^{11}$	9,0
3,2	исходное состояние	>100	0,23	$7,5 \cdot 10^{11}$	>10
	после 210 суток испытаний в 3% растворе NaCl	>100	0,25	$5,1 \cdot 10^{11}$	>10
	после испытания при $t=-75^{\circ}\text{C}$ , 20 суток	>100	0,24	$6,6 \cdot 10^{11}$	>10
	после 240 суток испытаний по режиму УХЛ2	>100	0,25	$4,3 \cdot 10^{11}$	>10
5,0	исходное состояние	>100	0,24	$1,2 \cdot 10^{12}$	>10
	после 210 суток испытаний в 3% растворе NaCl	>100	0,23	$9,8 \cdot 10^{11}$	>10
	после испытания при $t=-75^{\circ}\text{C}$ , 20 суток	>100	0,23	$1,0 \cdot 10^{12}$	>10
	после 240 суток испытаний по режиму УХЛ2	>100	0,24	$9,5 \cdot 10^{11}$	>10
11,5	исходное состояние	>100	0,25	$4,5 \cdot 10^{12}$	>10
	после 210 суток испытаний в 3% растворе NaCl	>100	0,24	$4,0 \cdot 10^{12}$	>10
	после испытания при $t=-75^{\circ}\text{C}$ , 20 суток	>100	0,24	$5,7 \cdot 10^{12}$	>10
	после 240 суток испытаний по режиму УХЛ2	>100	0,24	$3,8 \cdot 10^{12}$	>10

В таблице 1.7 приведены обобщенные данные по физико-механическим, диэлектрическим и адгезионным свойствам покрытия «Кортекор 867» различной толщины после всех видов испытаний. Можно видеть, что покрытие с толщиной 1,0 мм имеет меньшие значения всех характеристик, чем покрытия с большими толщинами. Однако влияние агрессивных сред на покрытие всех толщин не очень велико [51,58].

### 1.3.3 Анализ нормативных требований к защитным покрытиям соединительных деталей и запорной арматуры

Основными документами, регламентирующими процессы нанесения, приемки, транспортирования и хранения покрытия являются:

– ГОСТ Р 51164-98 "Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии";

– ГОСТ 17375 – 2001 Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Отводы крутоизогнутые типа 3D (R = 1,5 DN). Конструкция;

– ГОСТ 17376 – 2001 Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Тройники. Конструкция;

– ГОСТ 15846 – 2002 Продукция, отправляемая в районы Крайнего Севера и приравненные к ним местности. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение;

– ГОСТ 24950 – 81 Отводы гнутые и вставки кривые на поворотах линейной части стальных магистральных трубопроводов. Технические условия;

– ГОСТ 10692 – 80 Трубы стальные, чугунные и соединительные части к ним. Приемка, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение;

– ГОСТ 25142 – 87 Шероховатость поверхности. Термины и определения;

– ГОСТ 9.402–80 Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлической поверхности перед окрашиванием;

– ОТТ 25.220.01-КТН-215-10 Общие технические требования ОАО «АК Транснефть» на наружное антикоррозионное покрытие труб, соединительных деталей и механотехнологического оборудования;

– ВСН 008–88 «Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Противокоррозионная и тепловая изоляция»;

– Временный регламент приемки качества антикоррозионного покрытия запорной арматуры, нанесенного в заводских условиях, для объектов капитального строительства магистральных и технологических газопроводов ОАО «Газпром»;

– СТО Газпром 2–4.1–273–2008 Технические требования к соединительным деталям для объектов ОАО «Газпром»;

– ТУ 1390–014–86695843–2011 «Трубы и детали трубопроводов стальные с наружным двухслойным эпоксидным антикоррозионным покрытием»;

– ТУ 2226-003-95971812-2007 – «Композиция полимерная антикоррозионная «Кортекор-867»»;

– ТУ 2313-006-05785572-2007 «Защитное покрытие арматуры трубопроводной усиленного типа для магистральных и технологических газопроводов»;

– «Технические условия погрузки и крепления грузов» Раздел «Трубы» М.: Транспорт, 1988.

1.3.4 Анализ нормативных требований к транспортировке и хранению соединительных деталей и запорной арматуры с защитными покрытиями

Транспортирование и хранение изолированных трубных узлов производится в соответствии с требованиями ГОСТ 10692–80, ВСН 008 «Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Противокоррозионная и тепловая изоляция», разработанными АО «ВНИИСТ», г. Москва, 1989 г., ТУ 1390–014–86695843–2011 «Трубы и детали трубопроводов стальные с наружным двухслойным эпоксидным антикоррозионным покрытием» [21,66,29,76].

После нанесения покрытия в заводских условиях изолированные изделия

первоначально хранят внутри помещений при температуре окружающего воздуха не ниже плюс 10°C. В зависимости от температуры воздуха срок хранения изделий в помещении должен составлять до 7 суток при 20°C (до полного набора покрытием химической стойкости), после чего изделия вывозят наружу.

Хранение изделий осуществляется на деревянных поддонах, которые использовались в процессе нанесения. Также возможно их хранение в подвешенном состоянии (применительно для отводов с заводской изоляцией, см. рисунок 1.7 в). Таким образом, положение изделий при хранении во время отверждения покрытия соответствует их пространственной ориентации при нанесении.

Погрузочно-разгрузочные работы и хранение изолированных трубных узлов производятся в условиях, предотвращающих механические повреждения покрытия:

- предусматривается специальная упаковка, предохраняющая поверхности изделий от возможных внешних механических и ударных воздействий. Упаковка разрабатывается Исполнителем работ и согласуется с Заказчиком (Потребителем);

- для защиты наружного покрытия от механических повреждений устанавливаются на соединительные детали трубопроводов эластичные кольца или мягкие прокладки;

- прямое использование стальных канатов, строп, способных привести к разрушению покрытия и повреждению торцов трубных элементов запрещено.

Перевозка изолированных трубных узлов осуществляется автомобильным, железнодорожным, а также речным и морским транспортом, оборудованным специальными приспособлениями, исключающими повреждение трубных узлов и повреждение покрытия. Исходные изоляционные материалы перевозят в оригинальной упаковке, в горизонтальном виде [74].

Транспортирование изделий с покрытием допускается после выдержки готового покрытия не менее суток при температуре (20±5)°C.

Запрещается волочение изделия в таре и без тары по поверхности земли.

Размещение и крепление трубных узлов в железнодорожных полувагонах

производится в соответствии с требованиями «Технических условий погрузки и крепления грузов» МПС.

Не допускается проведение погрузочно-разгрузочных и строительномонтажных работ при температуре окружающей среды ниже минус 45<sup>0</sup>С и выше плюс 50<sup>0</sup>С согласно требованиям на покрытие.

Исходные изоляционные материалы (смола, отвердитель) хранятся в оригинальной герметичной упаковке при температуре окружающего воздуха от плюс 5<sup>0</sup>С до плюс 30<sup>0</sup>С. Изделия поставляют и хранят на транспортных щитах предприятия-изготовителя.

До монтажа изделия допускается хранить на открытых складских площадках в районах с умеренным или холодным климатом (в диапазоне температур от минус 60<sup>0</sup>С до плюс 50<sup>0</sup>С) в условиях, предотвращающих механические повреждения упаковки, изделия и его комплектующих, покрытия.

При длительном хранении (более 6 месяцев с момента изготовления) изделия предохраняют от воздействия ультрафиолетового излучения путем использования навесов, укрытий или других подходящих методов. В этом случае периодически (не реже двух раз в год) осматривают изделия.

Хранение не должно приводить к нарушению сплошности покрытия. В случае замерзания материалов проводят их нагрев до плюс 20-40<sup>0</sup>С в теплом помещении или нагревательными полотенцами. При соблюдении вышеперечисленных условий хранения гарантийный срок хранения изоляционных материалов – до 2 лет от даты изготовления [20,80,84].

#### 1.4 Обзор и анализ способов диагностирования защитного покрытия

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.

По результатам визуально-измерительного контроля определяется соответствие внешнего вида покрытия нормативным требованиям (по цвету, структуре, качеству нанесения), а также выявляются видимые дефекты (повреждения), фиксируются их размеры и назначаются ремонтные мероприятия.

Контроль толщины, сплошности и адгезионной прочности выполняется с использованием специального измерительного оборудования и предполагает оценку качества нанесения покрытия на соответствие требованиям по толщине и адгезии к поверхности изделия. Толщина оценивается магнитными толщиномерами, сплошность – с помощью оборудования для электроискрового и акустического контроля, адгезионная прочность оценивается с использованием адгезиметров.

#### 1.4.1 Определение адгезионной прочности сцепления покрытия со сталью методом нормального отрыва

Целью испытаний является контроль показателя адгезионной прочности покрытия к стали с определением усилия отрыва на образцах реальных изделий [57].

На покрытие приклеивается приспособление, представляющее собой цилиндр, в нижней части которого расположен диск диаметром 10 или 20 мм, а в верхней проушина для присоединения адгезиметра. Устройство изготавливается из алюминиевого сплава или стали. При установке, на нижнюю часть устройства наносится специальный клеевой состав, и далее устройство устанавливается на покрытие и плотно к нему прижимается. Испытания проводят не ранее чем через 24 ч после установки устройства. Покрытие по периметру приклеенного устройства прорезается до металла. Испытания проводят в нескольких точках изделия. Среднее значение адгезионной прочности  $G_{cp}$  вычисляют из выражения:

$$G_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{n_{\Pi}}, \quad (1.2)$$

где  $n_{\text{п}}$  – количество испытанных полос.

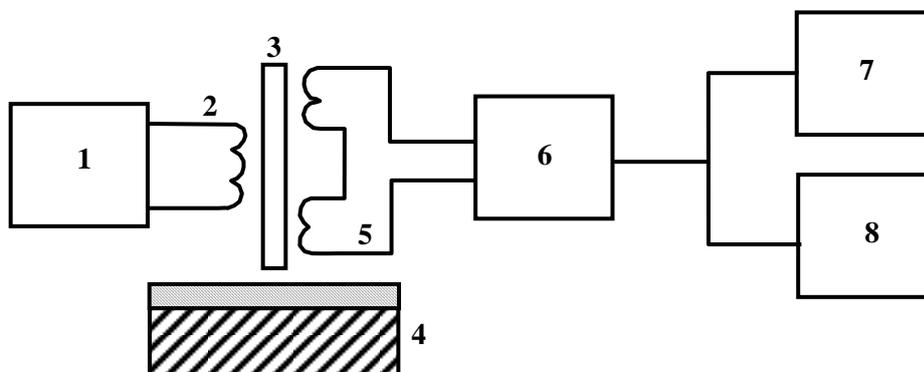
Адгезионную прочность оценивают как удовлетворительную, если  $G_{\text{ср}} > G_{\text{нтд}}$  ( $G_{\text{нтд}}$  – величина адгезионной прочности, нормируемая требованиями НТД).

#### 1.4.2 Контроль толщины покрытия

Для контроля толщины немагнитных покрытий на ферромагнитной основе широкое распространение получили индукционные толщиномеры [58].

Их действие основано на определении изменения магнитного сопротивления (проводимости) магнитной цепи, состоящей из ферромагнитной основы (металл изделия), преобразователя прибора и немагнитного зазора между ними (изоляционное покрытие), который является объектом измерений.

На рисунке 1.1 приведена схема индукционного толщиномера. Преобразователь представляет собой три катушки: возбуждающую и две измерительные, включенные дифференциально. Катушки размещены на ферромагнитном сердечнике.



1 – генератор; 2 – возбуждающая катушка; 3 – сердечник преобразователя;

4 – объект контроля; 5 – две измерительные катушки;

6 – блок обработки сигнала; 7 – блок индикации; 8 – блок автоматики

Рисунок 1.1 – Структурная схема индукционного толщиномера

Возбуждающая катушка питается переменным током частоты 200 Гц. Вдали от ферромагнитной детали электродвижущая сила (ЭДС), наводимая на измерительные катушки, расположенные по обе стороны от возбуждающей, взаимно компенсируется. При поднесении преобразователя к ферромагнитной

детали его магнитная симметрия нарушается и в измерительной обмотке наводится ЭДС, которая в определенных пределах пропорциональна расстоянию между деталью и преобразователем. Для питания преобразователя служит генератор, формирующий синусоидальное напряжение.

Одновременно генератор является источником опорного напряжения, подаваемого на блок обработки сигнала. Последний состоит из усилителей опорного напряжения и напряжения сигнала преобразователя. После усиления оба напряжения подаются на выпрямитель, являющийся частью блока обработки сигнала. Выпрямленное напряжение после усиления в усилителе постоянного тока подается на стрелочный прибор, показания которого пропорциональны измеряемой толщине покрытия.

В данном приборе блоки модулятора и автоматики служат для автоматической разбраковки контролируемых деталей. Блок модулятора предназначен для преобразования постоянной составляющей сигнала, выделяемой амплитудно-фазовым детектором, в сигналы прямоугольной формы, подающиеся на блок автоматики. Последний позволяет автоматически регистрировать и проследить уровень импульсных сигналов, пропорциональных толщине покрытия.

При работе с магнитными толщиномерами необходимо учитывать многочисленные факторы, влияющие на результаты измерений. К ним относятся колебания магнитных свойств покрытия или металлической основы, состояние поверхности, форма изделия и др.

Контроль толщины покрытия, осуществляемый с помощью магнитного метода, направлен на оценку и при необходимости корректировку этого параметра путем изменения технологических режимов нанесения.

Нормативными документами регламентирована минимально допустимая толщина покрытия, а максимальный предел ограничен экономическими требованиями, не допускающими перерасхода материалов.

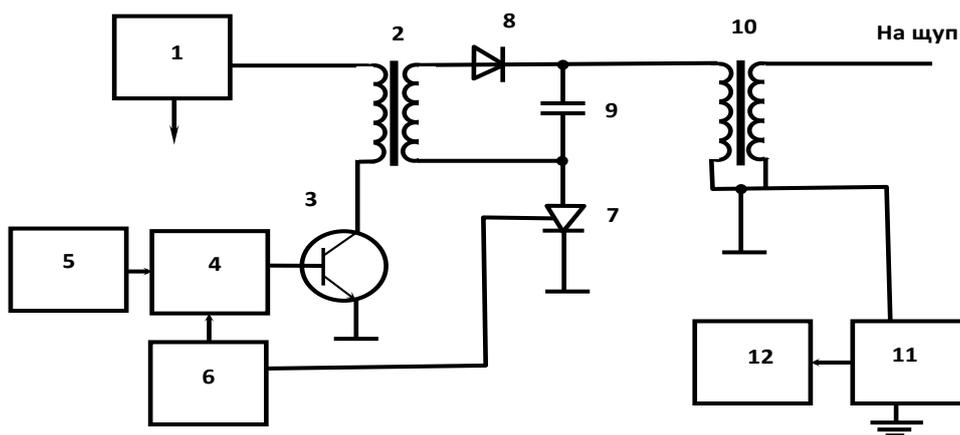
#### 1.4.3 Оценка сплошности покрытия электроискровым методом

Электроискровой метод основан на создании высокого испытательного

напряжения между щупом и металлом изделия и индикации электрического пробоя воздушного промежутка, возникающего в местах нарушения сплошности покрытия [57]. Неразрушающий характер метода определяет его максимальное применение на стадии контроля качества покрытия в заводских условиях. Этим методом контролируется 100 % поверхности антикоррозионного покрытия.

Качество покрытия оценивается по альтернативному признаку, при этом основным показателем, характеризующим процесс проведения этого вида контроля, является величина испытательного напряжения, прикладываемаемого к изоляционному покрытию в зависимости от его толщины (5 кВ/мм) [58].

Функциональная схема электроискрового дефектоскопа представлена на рисунке 1.2.



- 1 – источник электропитания; 2 – трансформатор; 3 – ключевой транзистор;  
 4 – одновибратор; 5 – регулятор; 6 – генератор запускающих импульсов;  
 7 – тиристор; 8 – диод; 9 – накопительный конденсатор; 10 – высоковольтный трансформатор; 11 – детектор искрового пробоя импульсов;  
 12 – узел сигнализации

Рисунок 1.2 – Функциональная схема электроискрового дефектоскопа

Дефектоскоп содержит источник постоянного тока (батареи аккумуляторов) 1, с подключенным к нему трансформатором 2, первичная обмотка которого включена в цепь коллектора транзистора 3, работающего в ключевом режиме. Вторичная обмотка трансформатора 2 через диод 8 подключена к накопи-

тельному конденсатору 9. Ключевой транзистор 3 управляется импульсами одновибратора 4 с регулируемой длительностью импульсов регулятором 5, образующим RC – цепь одновибратора, который запускается генератором импульсов 6. Устройство включает также тиристор 7, служащий для разряда конденсатора 5 через высоковольтный трансформатор 10, а также генератор импульсов 6 для запуска тиристора 7. Детектор искрового пробоя 11 включен во вторичную цепь высоковольтного трансформатора 10, а узел сигнализации 12 подключен к детектору 11.

Работа устройства происходит следующим образом. При подключении источника питания 1 к электрическим цепям устройства и в том числе к трансформатору 2, в момент подачи положительного импульса на базу транзистора 3 от одновибратора 4 через первичную обмотку трансформатора 2 протекает линейно нарастающий по величине ток. В трансформаторе 2 накапливается энергия магнитного поля по закону:

$$E_{\text{маг}} = \int_0^I L_{\text{инд}} Idx, \quad (1.3)$$

где  $L_{\text{инд}}$  – индуктивность, Гн;  $I$  – сила тока, А.

При запираании транзистора 3 окончаниями импульсов одновибратора 4 энергия магнитного поля трансформатора 2 создает в его обмотках импульсы напряжения. Положительный импульс с выхода вторичной обмотки проходит через диод 8 и заряжает накопительный конденсатор 9. Диод 8 предотвращает разряд конденсатора 9 через вторичную обмотку трансформатора 2.

При подаче управляющих импульсов (с частотой 30-35 Гц) с выхода генератора 6 на управляющий электрод тиристора 7 происходит срабатывание последнего, при этом накопительный конденсатор 9 подключается к первичной обмотке высоковольтного импульсного трансформатора 10. Вторичная обмотка высоковольтного трансформатора индуцирует высокое напряжение между испытательным электродом (щупом) и заземленной стенкой трубы. В процессе измерения щуп накладывается на поверхность контролируемого изоляционного покрытия изделия.

При возникновении искрового разряда между щупом и заземленной стенкой трубы в местах разрывов изоляционного покрытия во вторичной обмотке высоковольтного трансформатора возникает импульс тока, который вызывает появление сигнала на выходе детектора искрового пробоя 11 и включение узла сигнализации 12, что свидетельствует об установленном дефекте в сплошности покрытия [54].

#### 1.4.4 Акустический контроль сплошности покрытия

Акустический контроль сплошности покрытия выполняется с помощью акустического дефектоскопа, оснащаемого отдельными или совмещенными акустическими преобразователями [55].

Структурная схема дефектоскопа приведена на рисунке 1.3

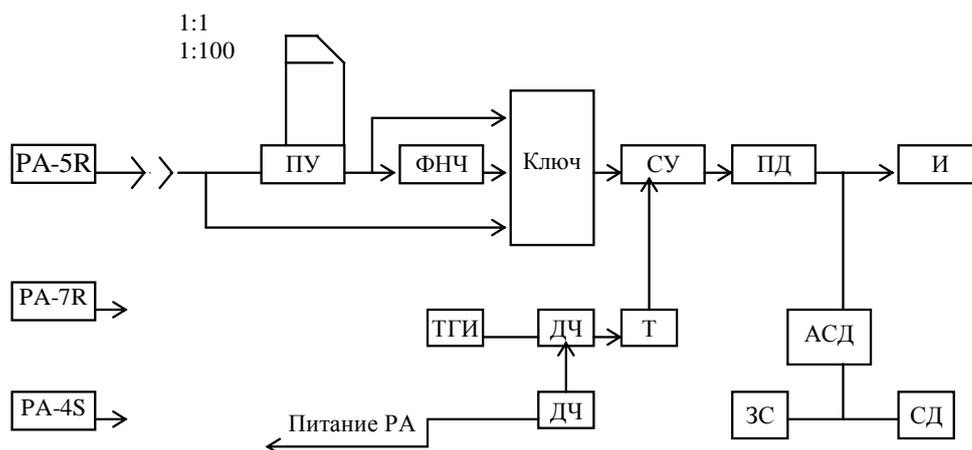


Рисунок 1.3 – Структурная схема дефектоскопа

Основными функциональными узлами дефектоскопа являются:

- акустический преобразователь;
- входной предварительный усилитель (ПУ);
- фильтр нижних частот (ФНЧ);
- стробируемый усилитель (СУ);
- пиковый детектор (ПД);
- автоматический сигнализатор дефектов (АСД);
- звуковой сигнализатор (ЗС);

- синдикатор (стрелочный, жидкокристаллический);
- тиристорный генератор импульса (ТГИ);
- делитель частоты (ДЧ);
- синхрогенератор (СГ);
- таймер (Т);
- формирователь питающих напряжений.

В зависимости от типа подключенного преобразователя в электронном блоке автоматически устанавливается соответствующий режим работы таймера Т и автоматического сигнализатора дефектов АСД.

При прижатии преобразователя к контролируемому образцу, через установленный в преобразователе выключатель включается питание дефектоскопа.

С включением питания начинает работать синхрогенератор СГ, сигналы которого через делитель частоты ДЧ периодически запускают тиристорный генератор импульсов ТГИ. Последний возбуждает излучающий вибратор преобразователя. Этот вибратор создает в контролируемом изделии импульсы затухающих упругих колебаний, амплитуда и несущая частота которых зависят от механического импеданса контролируемого изделия. Воздействуя на приемный пьезоэлемент вибратора, эти импульсы преобразуются в соответствующие электрические сигналы, поступающие на вход предварительного усилителя ПУ.

При работе с раздельно-совмещенными преобразователями сигнал пропускается через фильтр нижних частот ФНЧ. При использовании совмещенных преобразователей сигнал минует упомянутый фильтр. После усиления усилителем СУ и формирования сигнал детектируется пиковым детектором ПД и поступает на стрелочный индикатор и автоматический сигнализатор дефектов АСД. Стрелочный индикатор используется для настройки дефектоскопа и наблюдения за уровнем выходного сигнала. АСД служит для включения светового (светодиод в преобразователе) и звукового (телефонный наушник) сигналов при превышении уровнем сигнала верхнего порога срабатывания или уменьшения этого уровня нижнего порога срабатывания АСД.

Дефектоскоп состоит из блока электронного и датчика. На передней па-

нели блока установлены:

- стрелочный, жидкокристаллический или электролюминесцентный индикатор;
- звуковой сигнализатор дефекта (слева от стрелочного индикатора);
- разъемы для подключения преобразователя и телефона;
- переключатели порогов АСД и времени задержки для преобразователя РА-4S (РА-2S);
- светодиод, сигнализирующий о необходимости замены источника автономного питания;
- регулятор усиления.

На задней стенке установлен разъем для подключения внешнего зарядного устройства.

При работе с прибором используются отдельно-совмещенные преобразователи, которые имеют одинаковую конструкцию и отличаются только размерами и рабочими частотами. Каждый из этих преобразователей содержит по два составных пьезоэлектрических вибратора, один из которых излучает, другой принимает импульсы упругих колебаний. Вибраторы прижимаются к контролируемому изделию пружинами. В корпусе преобразователя расположен микровыключатель, включающий питание дефектоскопа только при прижатии преобразователя к изделию. В верхней части преобразователя расположен светодиод, автоматически включающийся от АСД при наличии в изделии дефекта.

Преобразователи соединяются с блоком электронными кабелями.

Совмещенный преобразователь в отличие от отдельно-совмещенного содержит один вибратор, излучающий и принимающий упругие колебания и имеющий одну зону касания с контролируемым объектом.

Дефектоскоп позволяет контролировать изделия как с плоскими, так и криволинейными поверхностями. Минимальный радиус кривизны цилиндрических (выпуклых) поверхностей контролируемых изделий составляет 6 мм.

Минимальная площадь  $S$  дефектов, расположенных на заданной глубине  $h$ , обнаруживаемых с помощью преобразователей, входящих в комплект по-

ставки дефектоскопа, должна соответствовать значениям, приводимым в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Предельно допустимые параметры дефектоскопии

Тип преобразователя	Стандартный образец	Площадь дефекта, мм <sup>2</sup>	Глубина залегания дефекта, мм
РА-5R (РА-1R)	СВ-1	300	8
РА-7R (РА-3R)	СВ-1	200	8

Отношение показателей стрелочного индикатора дефектоскопа в бездефектной зоне образцов (U1) и в зоне искусственного дефекта в стандартном образце (U2) должно быть не менее указанного в таблице 1.9 [55,3].

Таблица 1.9 – Отношение измерений дефектоскопа в бездефектной и дефектной зонах

Тип преобразователя	Стандартный образец	Площадь дефекта, мм <sup>2</sup>	Отношение	
			U2/U1	U1/U2
РА-5R (РА-1R)	СВ-1	300	2,0	-
РА-7R (РА-3R)	СВ-1	200	2,0	-

### 1.5 Постановка цели и задач диссертационной работы

В качестве покрытий фасонных соединительных деталей магистральных трубопроводов раньше 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 обеспечивающих полноту катодной защиты, что приводит к ухудшению состояния электрохимзащиты на протяженных участках трубопроводах.

Вопрос с заводской технологией нанесения полиуретановых покрытий изучен и проработан достаточно хорошо. Однако в трассовых условиях процесс нанесения характеризуется рядом особенностей:

– фасонные изделия обладают сложной развитой поверхностью, имеющей различные многочисленные экранирующие элементы (острые кромки, вогнутые зоны, застойные участки), которые препятствуют равномерному распределению покрытия;

– отрицательное влияние погодных условий (возможны потери покрытия за счет сдувания ветром).

Таким образом, на конструктивных элементах трубных узлов наблюдается неравномерность нанесения. Известно, что повышенная по сравнению с нормативными требованиями толщина покрытия приводит к ухудшению качества адгезии покрытия с металлом, что проиллюстрировано на графике изменения напряжений для покрытий с нормативным и повышенным значением толщины (рисунок 1.4 а, б) [2,7,12,19,53,65,69].

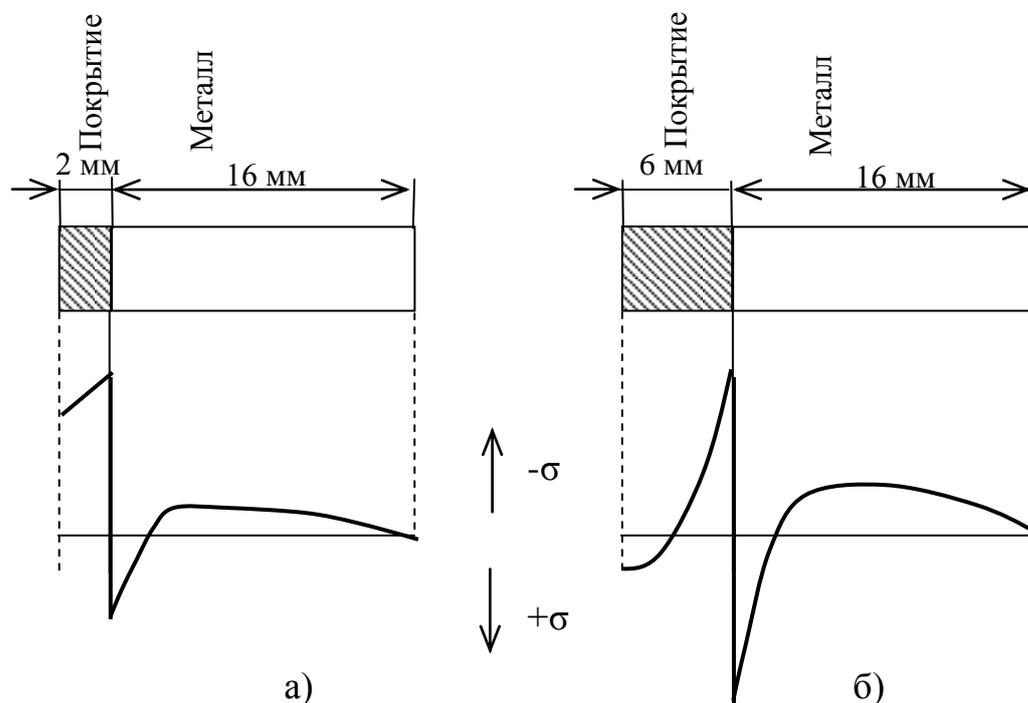


Рисунок 1.4 – Изменение изменения напряжений для покрытий с нормативным (а) и повышенным (б) значением толщины

Также с увеличением толщины покрытия увеличивается критерий Био, с

ростом которого увеличиваются напряжения в покрытии, возникающие в результате сварочного процесса. Кроме того, с увеличением толщины покрытия ухудшается его способность к деформациям, т.е. возрастает склонность к образованию трещин [8–11,16,37,46,67,78,81].

Таким образом, поставленная в работе цель – совершенствование методов диагностирования и нанесения полиуретановых покрытий на трубные изделия сложной конфигурации – является актуальной.

Поэтому основными задачами исследования являются следующие:

- 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.

## 2 Исследование особенностей поведения защитных покрытий фасонных изделий в условиях атмосферного хранения

### 2.1 Общая статистика по дефектам покрытия соединительных деталей и запорной арматуры

Было выполнено исследование дефектного состояния покрытий фасонных изделий в условиях атмосферного хранения. Выполнен анализ характерных дефектов защитных покрытий типа «Кортекор» (рисунок 2.1, а) и «Уризол» (рисунок 2.1, б) и в общем (рисунок 2.1, в) фасонных изделий, находящихся на площадках атмосферного хранения.

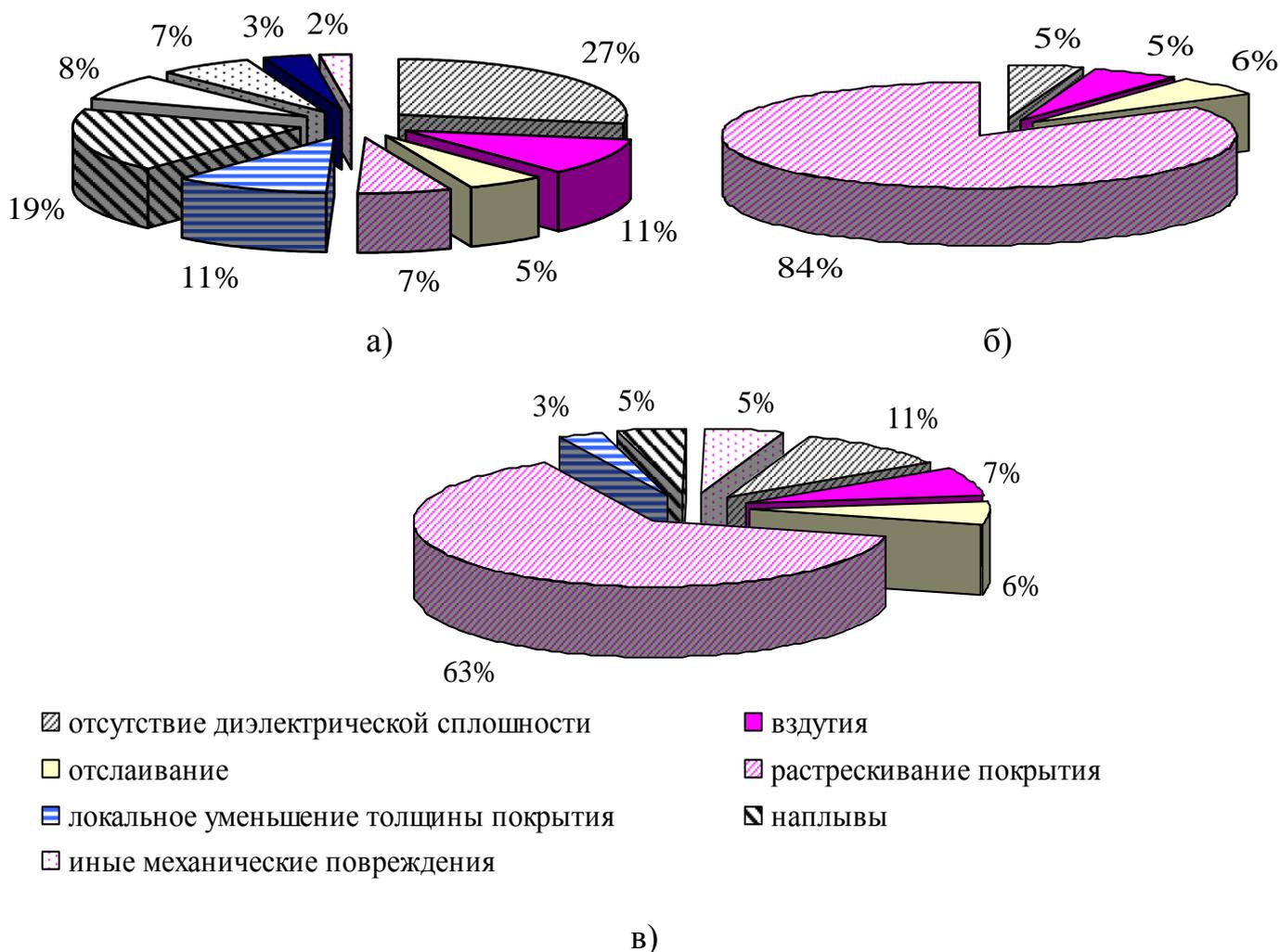


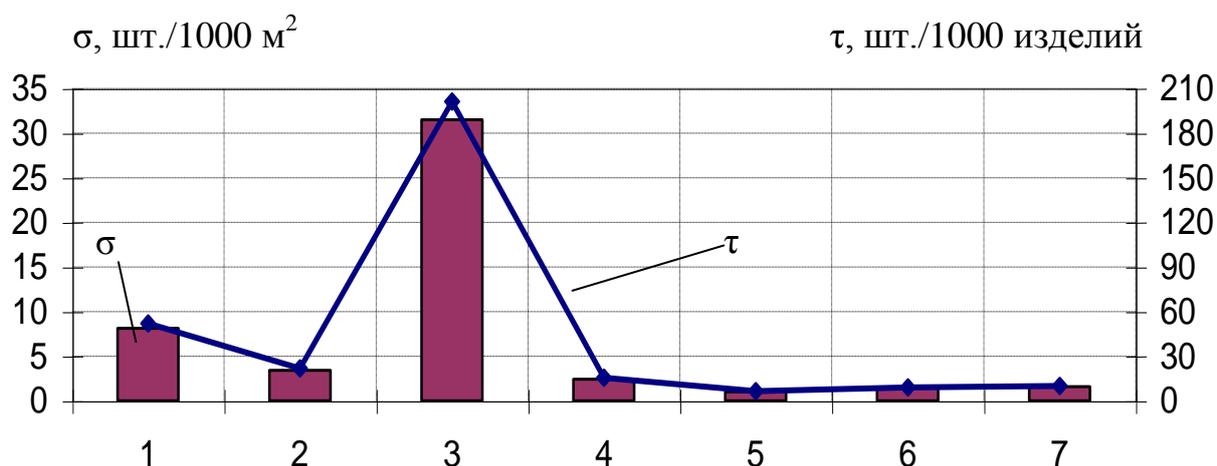
Рисунок 2.1 – Распределение дефектов покрытия по видам

Проанализировав рисунок 2.1 (а – в) 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.

В таблице 2.1 и на рисунке 2.2 представлена поверхностная плотность дефектов на 1000 м<sup>2</sup> покрытия ( $\sigma$ ) и удельная плотность дефектов на 1000 единиц изделий ( $\tau$ ).

Таблица 2.1 – Сводная статистика по дефектам покрытия типа «Кортекор-867» и «Уризол»

Наименование дефекта покрытия	Количество дефектов			Поверхностная плотность дефектов, шт/1000 м <sup>2</sup>			Удельная плотность дефектов, шт/1000 изделий		
	Кортекор-867	Уризол	Всего	Кортекор-867	Уризол	Всего	Кортекор-867	Уризол	Всего
растрескивания	6	215	221	6,91	34,96	31,49	17,29	286,28	201,28
вздутия	10	14	24	11,52	2,28	3,42	28,82	18,64	21,86
отслаивание	5	15	20	5,76	2,44	2,85	14,41	19,97	18,21
отсутствие диэлектрической сплошности	25	12	37	28,79	1,95	5,27	72,05	15,98	33,7
следы коррозии металла в месте трещины	7	-	7	8,06	-	1	20,17	-	6,38
сколы покрытия	6	-	6	6,91	-	0,85	17,29	-	5,46
локальное уменьшение толщины покрытия	10	-	10	11,52	-	1,42	28,82	-	9,11
наплывы	17	-	17	19,58	-	2,42	48,99	-	15,48
сдир изоляции	3	-	3	3,46	-	0,43	8,65	-	2,73
оплавление кромок изоляционного материала	2	-	2	2,30	-	0,28	5,76	-	1,82
Всего	91	256	347	105,96	41,63	49,59	265,13	340,88	316,94



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

Рисунок 2.2 – Сводная статистика по дефектам покрытия

Для предотвращения образования дефектов покрытия в дальнейшем следует изучить причины их образования. Различают следующие причины образования дефектов: механические и климатические. Механические причины образования дефектов покрытия связаны с несоблюдением технологии нанесения покрытия, а также транспортирования, приемки и хранения трубных узлов с покрытиями.

Климатические причины образования дефектов покрытия связаны с воздействием атмосферных явлений на слой покрытия.

При длительном действии низких температур покрытия приобретают хрупкость, что проявляется в виде развития нарушений в адгезионном соединении с полным или частичным отделением внешнего полимерного слоя от металла трубного узла (отслаивание). Резкие суточные перепады температуры воздуха и дополнительный нагрев поверхности покрытия солнечным излучением, особенно в весеннее и осеннее время, приводит к появлению напряжений, которые при знакопеременном изменении действия сил «расшатывают» прочностную конструкцию адгезионного соединения, что приводит к накоплению усталостных деформаций и ускорению их развития [60].

Установлено, что доминирующим фактором образования повреждений покрытия при атмосферном хранении является понижение температуры ниже гра-

ничного значения (минус 20 °С), при этом большинство дефектов (57,1 %) зарождается в первом цикле отрицательного температурного воздействия. В повторных циклах образование повреждений протекает менее интенсивно. Причем максимально вероятная интенсивность зарождения дефектов (6 % от общего количества исследуемых трубных узлов) приурочена к температуре минус 30 °С, которая является экстремально критическим температурным порогом, при достижении которого возникает зарождение повреждений, сопровождаемое снижением работоспособности изделия в том же темпе.

Так, необратимые микроразрушения и микрорастрескивания структуры адгезионного слоя за счет его охрупчивания в результате длительного действия низких отрицательных температур являются первоосновой ослабления адгезионных связей при последующих термомеханических циклах. Нагрев адгезионного слоя до температуры, близкой к температуре размягчения, обуславливает сдвиг покрытия под влиянием деформационных сдвиговых напряжений с нарушением адгезионных связей. Это означает, что все виды температурных атмосферных колебаний, вызывающих охрупчивание и размягчение адгезионного слоя, приводят к ухудшению адгезионных характеристик покрытия, причем степень ухудшения зависит от продолжительности срока хранения труб и амплитуды температурных перепадов [72].

К повреждениям покрытия механической природы образования относят следующие типы дефектов: сдир изоляции; отсутствие защитного колпачка; сколы покрытия с поверхности металла; локальное уменьшение толщины покрытия; оплавление кромок изоляционного материала; непрокрасы; несквозные царапины; срез покрытия; вмятины; пропуски.

К повреждениям покрытия климатической природы образования относят следующие типы дефектов: вздутия; растрескивания; отслаивание покрытия.

В таблице 2.2 представлено абсолютное (абсол.) и относительное (относ.) соотношение причин образования повреждений покрытий соединительных деталей.

Таблица 2.2 – Характер повреждения покрытий соединительных деталей

Тип повреждения	«Кортекор-867»		«Уризол»		Всего	
	Абсол.	Относ.	Абсол.	Относ.	Абсол.	Относ.
Климатический	46	50,5 %	256	100 %	302	87,03 %
Механический	45	49,5 %	0	0 %	45	12,97 %

Очевидным является преобладание климатических повреждений над механическими в  $302/45=6,7$  раза.

## 2.2 Влияние климатических условий районов Крайнего Севера на защитную способность полимерных покрытий

Основные общие вопросы влияния холодного климата на полимеры описаны в работах авторов [34,82] и сводятся к следующему. Большое количество солнечных дней с глубоким ультрафиолетом за счет большой прозрачности атмосферы (0,74-0,88) приводит к двум процессам в полимерах – разрыву макроцепей (деструкции) и радиационному нагреву. Возникающие при этом свободные радикалы, являясь активными центрами инициирования процесса разрыва макроцепей, способствуют лавинообразному разрушению полимеров в более глубоком слое образца. Естественно, при низких температурах, где способность рекомбинации свободных радикалов резко снижается [39], процессы деструкции полимеров под действием свободных радикалов проходят значительно глубже. Все это приводит к резкому уменьшению молекулярной массы, появлению хрупкости и быстрому ухудшению эксплуатационных свойств [87].

Резкие суточные перепады температуры воздуха и дополнительный нагрев образцов лучистой энергией, особенно в весеннее и осеннее время, приводят к появлению термических напряжений [89], которые за счет больших времен релаксации структурных элементов макромолекул высокополимеров накапливаются при циклических перепадах температур, что способствует расщеплению материалов. Особенно это характерно для жестких композиционных материалов, где термические напряжения усиливаются еще за счет различия коэффициентов теплового расширения материала и наполнителя.

Переходы через 0 °С дважды в сутки в весеннее и осеннее время приводят к сорбции и десорбции влаги, ее замораживанию и размораживанию. При этом за счет увеличения объема поглощенной воды в процессе замораживания происходит увеличение макро- и микропустот в полимерах. Этот процесс роста пустот при частом переходе воды в лед и обратно в конце концов приводит к растрескиванию, появлению критических трещин и хрупкому разрушению материала при действии определенных нагрузок. По всей вероятности, это должно больше всего сказаться на композиционных материалах с органическим наполнителем, способным впитывать в себя сорбированную влагу. Сорбированная влага в ряде материалов, например в полиамидах, поликарбонатах и т. д., может образовывать водородные связи и приводить к появлению новых релаксационных процессов или воздействовать на существующие в полимерах [83].

### 2.3 Повышение морозоустойчивости полиуретановых покрытий эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера

Накопленный практический опыт показал, что наибольшие проблемы возникают при транспортировании и хранении запорной арматуры (задвижек, шаровых кранов) с наружным защитным покрытием в зимний период времени. Так, в зимний период при поставке и складировании задвижек с наружным защитным полиуретановым покрытием «Protegol UR Coating 32-55» в условиях аномально низких температур Восточной Сибири (минус 50-55 °С) были отмечены многочисленные факты растрескивания и отслаивания покрытия от стали.

В результате проведенных в ООО «Институт ВНИИСТ» экспериментальных исследований было установлено, что основной причиной растрескивания и отслаивания покрытия является его повышенная в сравнении с нормативными требованиями толщина. В некоторых случаях фактическая толщина защитного покрытия задвижек достигала значений 10 – 12 мм, при требованиях АК «Транснефть» – от 1,5 до 3,0 мм и требованиях технических условий заводоизготовителей – не менее 2,5 мм.

Для определения оптимальной минимальной толщины, при которой за-

щитное покрытие сохраняет свою сплошность при температурах минус 60 и минус 70 °С, были испытаны полученные от ЗАО «Протекор» – поставщика изоляционных материалов «Protegol» и от ОАО «Тяжпромарматура» (г. Алексин) несколько серий образцов-свидетелей с покрытиями «Protegol UR-Coating 32-55» и «Protegol UR-Coating 32-60» толщиной: 2,0 – 4,5; 8,0 и от 8 мм и выше. Установлено, что во всех случаях при проведении испытаний защитных покрытий на устойчивость к термоциклированию (один цикл испытаний соответствует 8 ч выдержки образцов на воздухе при температуре минус 60 °С и 16 ч выдержки в воде при температуре плюс 20 °С), а также в процессе длительной выдержки образцов на воздухе в криокамере при температурах минус 60 и минус 70 °С растрескивания и отслаивания покрытия не наблюдалось на образцах с толщиной покрытия до 4,0 – 4,5 мм. При толщинах покрытия 5 – 6 мм его растрескивание и отслаивание происходило после 6 – 8 термоциклов испытаний, а при толщинах покрытия от 8 мм и выше отслаивание покрытия наблюдалось уже через один – три цикла испытаний. Такое же снижение морозостойкости с увеличением толщины полиуретановых покрытий отмечалось и в ходе непрерывной выдержки образцов в криокамере при температурах испытаний минус 60 и минус 70 °С. По результатам вышесказанного предлагаются следующие критерии определения работоспособности покрытия в условиях низких температур в зависимости от толщины (таблица 2.3).

Из этого следует, что добиться значительного повышения морозостойкости полиуретановых покрытий можно уже за счет снижения общей толщины покрытий до значений не выше 4,5 мм.

Экспериментальные данные подтверждаются и данными натурных испытаний. Так, в случае нанесения покрытия «Protegol UR-Coating 32-55» на гнутые отводы в условиях ОАО «Трубодеталь», ЗАО «Соединительные отводы трубопроводов» и ОАО «Нефтегаздеталь» (при средней толщине покрытия 2,5 – 4,0 мм) не было выявлено фактов отслаивания и растрескивания покрытия при транспортировке и хранении изолированных отводов в зимнее время, в том числе в условиях Восточной Сибири.

Таблица 2.3 – Морозоустойчивость покрытия в зависимости от толщины нанесения

Толщина, мм	Соответствие требованиям нормативных документов	Особенности хранения
< 2 мм	Не соответствует требованиям	Ремонт
2 – 4,5 мм	Соответствует	Длительное хранение на открытых площадках вне зависимости от температуры окружающей среды
4,5 – 6 мм	Соответствует	Хранение на открытых площадках в течение не более трех лет
6 – 8 мм	Соответствует	Хранение на открытых площадках в течение одного года
> 8 мм	Соответствует	Хранение на открытых площадках в условиях резких температурных перепадов не рекомендуется

Нанесение защитных покрытий на задвижки и шаровые краны сопровождается целым рядом технологических особенностей. Эти особенности обусловлены сложной развитой поверхностью изделий, наличием труднодоступных мест и теневых зон, острых кромок, ребер жесткости, большой удельной массой изделий и использованием в конструкции материалов различной природы.

При проведении работ изоляции запорной арматуры отмечается большая неравномерность толщины покрытия на различных участках изделия (минимальная толщина – на острых кромках, ребрах жесткости, в зонах сварных швов, максимальная – на вогнутых участках, в застойных зонах). С целью увеличения толщины покрытия до номинальных значений, установленных техническими требованиями, наносятся дополнительные слои покрытия, при этом на отдельных участках изделия толщина покрытий может достигать 8 – 10 мм и выше. Для оптимизации и снижения толщины покрытия необходимо, прежде всего, оптимизировать технологию подготовки поверхности задвижек и нанесения на них защитного покрытия (сглаживать и шлифовать острые кромки,

наносить предварительно на труднодоступные участки задвижек материалы ручного нанесения, использовать для повышения толщины покрытия на острых кромках и труднодоступных местах армирующие материалы и др.).

На морозостойкость полиуретановых покрытий влияет также и подготовка поверхности изолируемых изделий. Известно, что в случае загрязнения поверхности задвижек маслами, СОЖ адгезия покрытия к стали заметно снижается. Поэтому необходимо осуществлять промывку загрязненной поверхности задвижек специальными растворами с последующей обработкой горячей обессоленной водой. Как вариант, перед нанесением полиуретановых покрытий можно опробовать праймирование поверхности задвижек эпоксидными грунтовками или пассивировать поверхность хроматными растворами (как в случае заводской полиэтиленовой изоляции труб) [58].

#### 2.4 Прогнозирование климатической устойчивости защитных покрытий

Под климатической устойчивостью (АЗ) покрытий понимается их способность сохранять свои защитные свойства под действием атмосферного влияния. При этом покрытие является климатически устойчивым, если имеет менее 20% дефектов в своем объеме или массе.

На основании имеющейся статистике повреждений покрытия, был выполнен анализ изменения его климатической устойчивости 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 ( $\varphi$ ), так как с увеличением координаты широты происходит уменьшение среднегодовой температуры окружающей среды [31].

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

$$AZ = X_1 \cdot T + X_2 \cdot C + X_3 \cdot П + X_4 \cdot K \quad (2.1)$$

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 формулам:

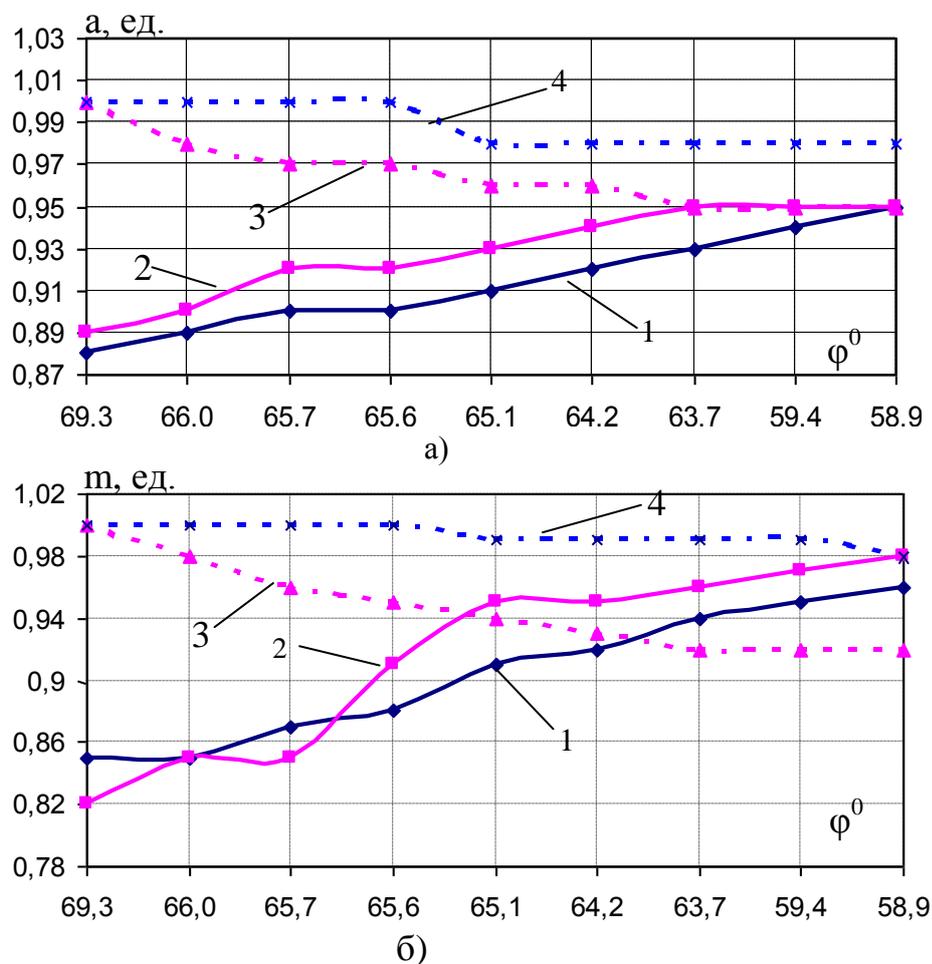
$$T = 0,6 \cdot aT + 0,4 \cdot mT \quad (2.2)$$

$$C = 0,6 \cdot aC + 0,4 \cdot mC \quad (2.3)$$

$$P = 0,6 \cdot aP + 0,4 \cdot mP \quad (2.4)$$

$$K = 0,6 \cdot aK + 0,4 \cdot mK \quad (2.5)$$

где  $aT$ ,  $aC$ ,  $aP$ ,  $aK$  – относительные оценки дефекта покрытия в зависимости от его площади (рисунок 2.3, а);  $mT$ ,  $mC$ ,  $mP$ ,  $mK$  – относительные оценки дефекта покрытия в зависимости от его размера (рисунок 2.3, б) в соответствии с ПЛОТНОСТЬЮ.



а – параметр а дефектов покрытия; б – параметр m дефектов покрытия;  
 1 – растрескивание; 2 – отслаивание; 3 – вздутия; 4 – коррозия металла в месте растрескивания

Рисунок 2.3 – 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 [83] температурное влияние на слой покрытия может быть описано уравнением химической кинетики первого порядка:

$$-dA_3(t)/dt = K \cdot A_3(t) \quad (2.6)$$

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

Решаем уравнение (2.6):

$$\begin{aligned} -dA_3(t)/A_3(t) &= K \cdot dt \\ \int -dA_3(t)/A_3(t) &= \int K dt \\ -\ln A_3(t) &= Kt + C \end{aligned}$$

Поскольку изделия, поступившие на базы хранения, не имели исследуемых дефектов покрытия, то  $A_3(0) = 1$ . Тогда постоянная  $C$  определится следующим образом:

$$\begin{aligned} -\ln 1 &= K \cdot 0 + C \\ C &= 0 \end{aligned}$$

При достижении максимально допустимого срока атмосферного хранения величина  $A_3$  становится равной критической обобщенной оценке климатической устойчивости покрытия  $A_{3_{кр}}$ ,  $A_{3_{кр}} = 0,8$ . Тогда параметр  $K$  составит:

$$K = -\ln A_{3_{кр}}/t \quad (2.7)$$

где  $t$  – максимально допустимый срок атмосферного хранения, число лет.

Тогда, максимально допустимый срок атмосферного хранения трубных изделий с покрытием составит:

$$t = \frac{\ln A3_{кр}}{\ln A3} \cdot t_{и} \quad (2.8)$$

где  $t_{и}$  – время проведения испытаний, годы (срок атмосферного хранения).

Результаты расчетов представлены на рисунке 2.4 (а, б).

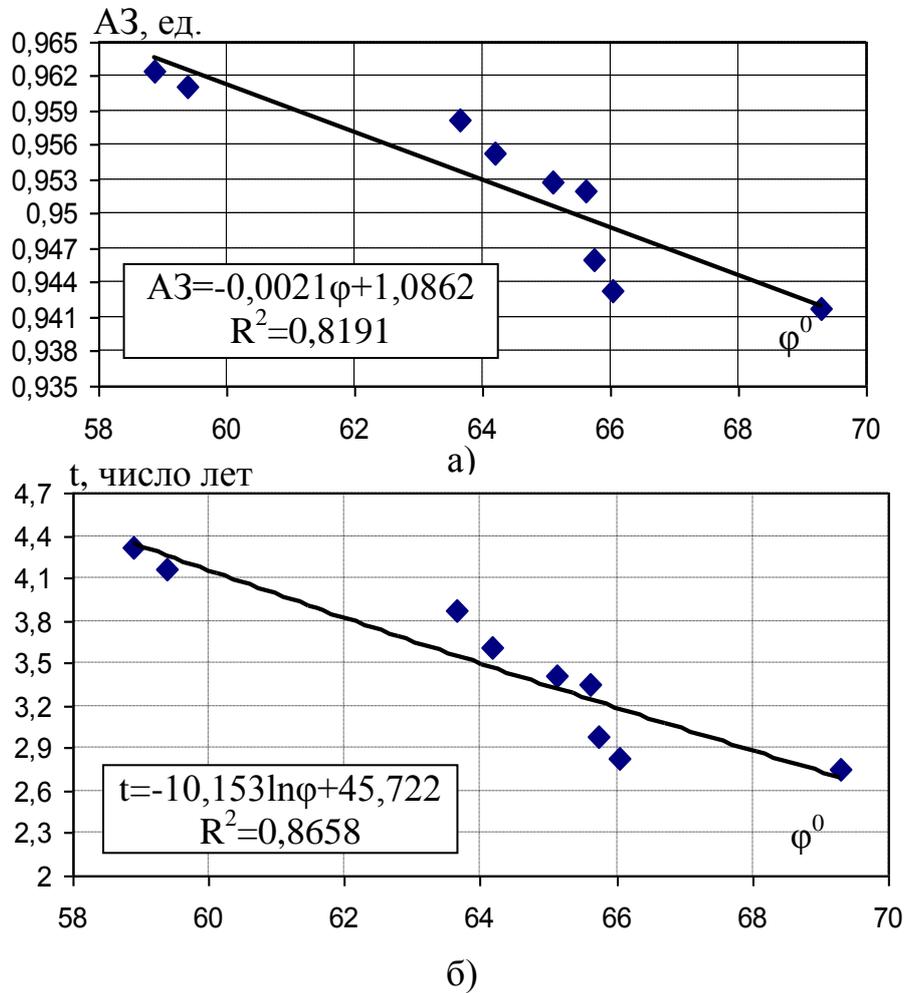


Рисунок 2.4 – Зависимость климатической устойчивости покрытия (а) и срока хранения трубных изделий с покрытием (б) от координаты широты

Таким образом, установлено, что с увеличением координаты широты происходит ухудшение климатической устойчивости покрытия. При этом максимально допустимый срок атмосферного хранения изменяется от 4,3 до 2,7 лет, то есть в среднем уменьшается на 0,14 года на каждый градус широты. При этом ошибка прогнозирования составляет  $\pm 10\%$ .

### 3 Результаты экспериментального исследования и анализа неоднородности толщины защитного покрытия фасонных изделий

#### 3.1 Цели и задачи анализа диагностирования защитных покрытий

Целями моделирования распределения напряжений и диагностирования покрытий являются:

- выявление основных факторов, повлекших образование неоднородности толщины покрытий;
- определение характера и степени их влияния на возможную неравномерность толщины покрытия;
- определение участков поверхности покрытий потенциально склонных к ослаблению адгезионной прочности, в которых является обязательным проведение контроля сплошности.

Можно выделить два основных фактора, снижающих равномерность толщины покрытия:

- гравитационное перераспределение массы покрытия после напыления при отверждении («фактор нанесения»);
- перераспределение массы покрытия во время длительного хранения при нагреве от солнечной радиации (происходит на площадках хранения).

«Фактор нанесения» образуется в результате влияние двух причин:

- полностью не отвердевшее покрытие под действием сил тяжести перемещается по поверхности изделия вниз;
- фасонные изделия обладают сложной развитой поверхностью, имеющей различные многочисленные экранирующие элементы (острые кромки, вогнутые зоны, застойные участки), которые препятствуют равномерному распределению покрытия.

В ходе анализа (см. главу 1) было установлено, что отсутствует автоматизированная технология нанесения покрытия на фасонные изделия, которая позволила бы производить равномерное нанесение покрытия по всей поверхности изделия с учетом всех его геометрических особенностей. Поэтому, так как

нанесение производится оператором, степень равномерности распределения покрытия по поверхности изделия зависит от квалификации оператора, т.е. основным фактором неравномерности покрытия при его нанесении является недостаточная проработанность данной технологии. Также следует отметить, что практически невозможно нанести совершенно идентичные по геометрическим параметрам слои покрытия на два одинаковых изделия.

На рисунке 3.1 представлены положения фасонных изделий в пространстве на этапе нанесения покрытия.

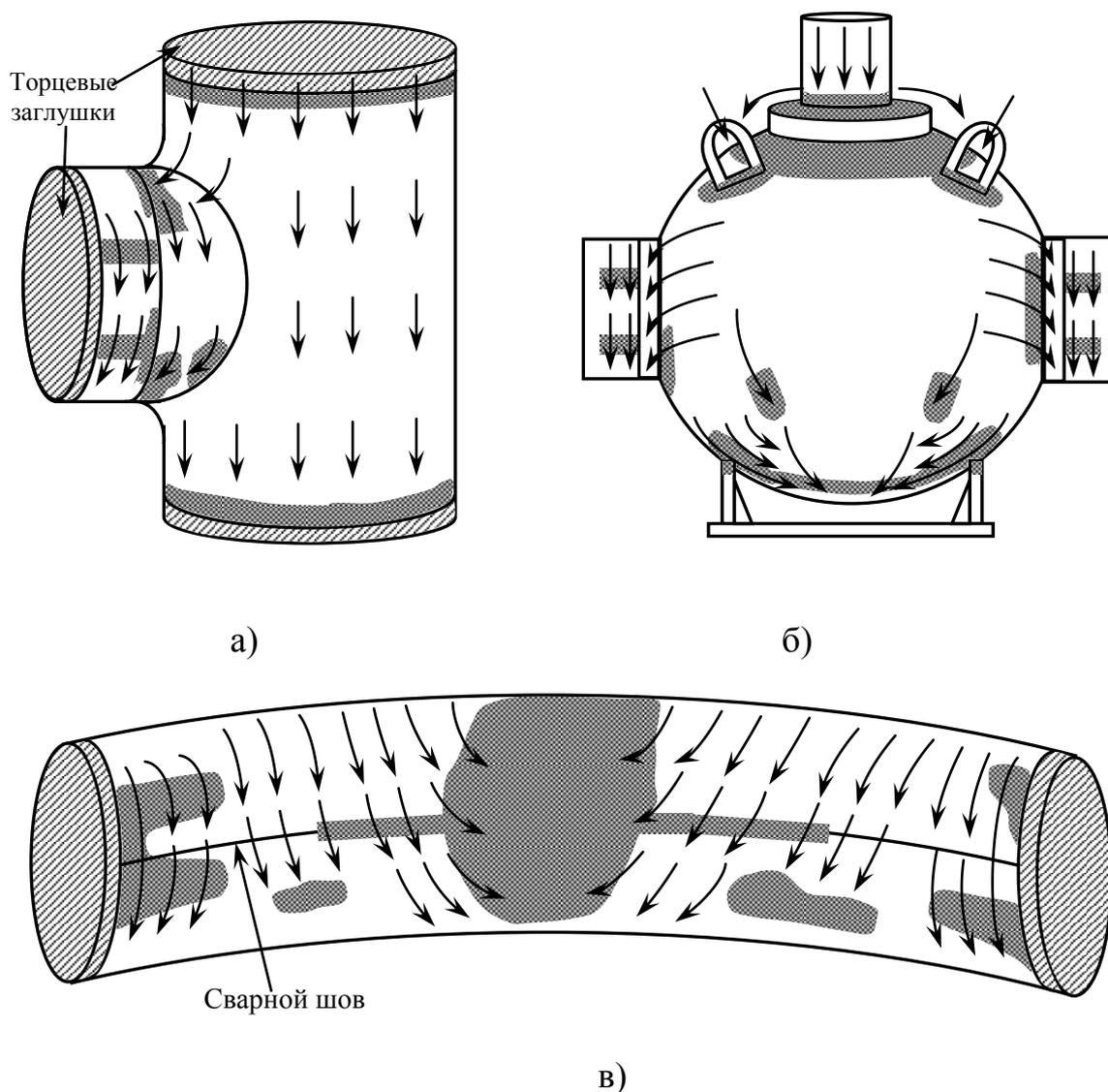


Рисунок 3.1 – Схема расположения фасонных изделий при нанесении покрытия: тройник (а); шаровый кран (б); отвод (в)

Однако для подавляющего большинства применяемых в мире композиций при попытке нанесения покрытий толщиной более 1,5 мм происходит стекание материала с образованием наплывов и потеков на боковых поверхностях и на нижних частях изделий [27].

Стрелками на рисунке 3.1 обозначены возможные пути перемещения покрытия, а заштрихованные области – участки, где наиболее вероятно образование наплывов.

После нанесения происходит процесс отвердевания покрытия, при котором фасонные изделия не меняют своего пространственного положения. Следовательно, характер изменения толщины должен соответствовать положению изделия в пространстве, при котором покрытие формировалось.

Фактор хранения образуется из-за нагрева покрытия до температуры его размягчения в результате длительного действия солнечной радиации. Однако в условиях Крайнего Севера максимальная температура поверхности покрытия может повышаться до температуры 60 °С, что ниже температуры размягчения покрытия. Следовательно, возможные перераспределения маловероятны.

На основании вышеизложенного можно установить, что основные процессы по образованию неоднородности слоя покрытия происходят на этапе формирования монолитной конструкции покрытия по поверхности изделия.

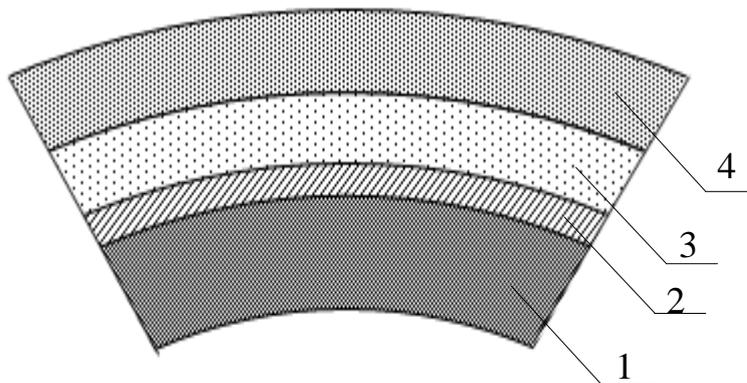
### 3.2 Напряженно-деформированное состояние покрытий трубных узлов сложной конфигурации

Защитная эффективность покрытия определяется его несущей способностью, т.е. способностью противостоять приложенным к покрытию различным механическим нагрузкам. Возможные разрушения покрытия происходят на фоне интенсивно развивающихся процессов ухудшения его свойств.

На рисунке 3.2 представлена схема изоляции трубных узлов сложной конфигурации на объектах единой системы газоснабжения [30,80].

На основной металл наносится эпоксидный слой 2, который обладает хорошей адгезией к металлу. На эпоксидный слой наносится клеевой слой 3. По

своей природе клей является сополимером этилена [86]. В конце процесса на клей напыляется покрытие (слой 4). Таким образом, видно, что промежуточные слои 2, 3 являются связующими между покрытием и трубой. Наличие их необходимо, так как адгезионная связь между покрытием и трубой мала и требуемый уровень адгезии достигнут не будет.



1 – металл узла; 2 – эпоксидный слой; 3 – клеевой слой; 4 – покрытие

Рисунок 3.2 – Схема изоляции участка трубного узла

В процессе нагрева эпоксидный слой перемещаться относительно трубы не будет, так как силы сцепления достаточно велики (для перемещения требуется нагрев до температур плавления металла). Эпоксидный слой связан со слоем покрытия клеем. Такой тип связи носит когезионный характер. Суть когезионной связи заключается в следующем: два связующих элемента скреплены между собой элементом – когезивом. В процессе относительного перемещения двух скрепляемых элементов друг относительно друга каждый из них будет тянуть за собой когезив. Таким образом, когезив будет подвержен растягивающей нагрузке, и в определенный момент времени межмолекулярные связи когезива разрушатся, и когезив разорвется на две части, что в свою очередь еще больше ускорит процесс относительного перемещения двух слоев.

Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) покрытия в условиях адгезии с металлом трубного узла усложняется некоторыми факторами:

– непрямым контактом металла и покрытия и, как следствие, нечеткое моде-

лирование процесса сдвига покрытия;

- послышное распространение тепла от покрытия к металлу и наоборот и, как следствие, сложность в описании процесса распространения теплоты;

- наличие когезионных и межмолекулярных связей промежуточных слоев, в результате чего динамический анализ системы «покрытие-металл» усложняется.

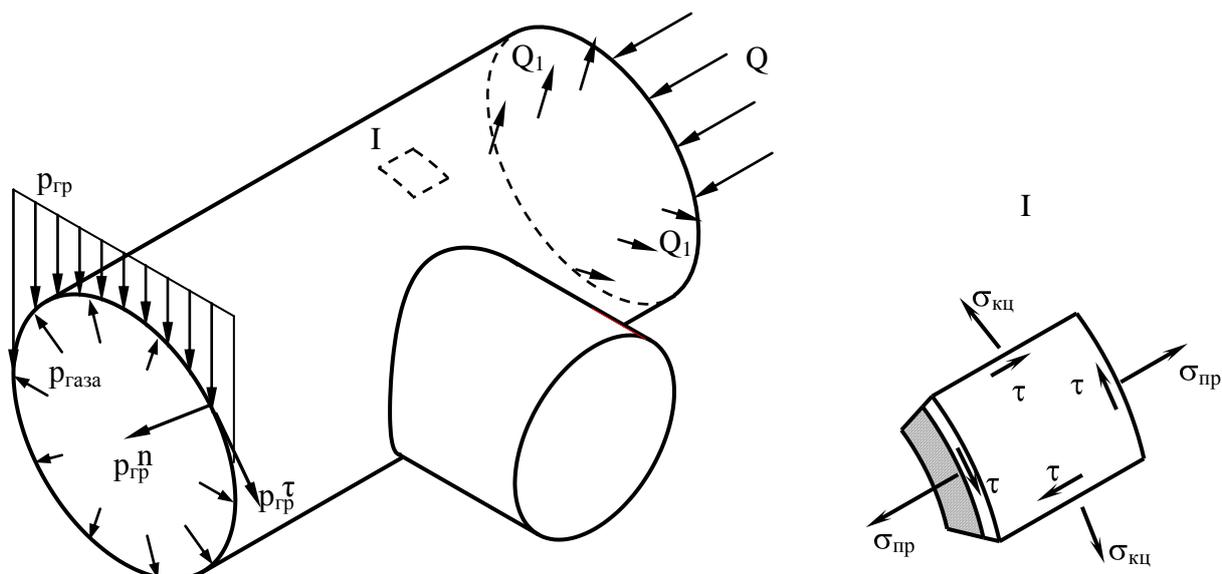
Считается, что в нормальных условиях покрытие характеризуется минимальными (остаточными) напряжениями. Кроме постоянных остаточных напряжений, в покрытиях возникают временные термические напряжения, которые действуют в момент нагревания или охлаждения трубных узлов и вызваны разностью истинных коэффициентов расширения покрытия и металла изделия, а также градиентом температуры в слое покрытия и в его основе (тепловая разность).

При температуре эксплуатации трубопроводов выше  $35^{\circ}\text{C}$  защитная эффективность покрытия определяется в основном его несущей способностью, т.е. способностью противостоять приложенным к покрытию различным механическим нагрузкам. Возможные разрушения покрытия происходят на фоне интенсивно развивающихся процессов его старения, что обуславливает, как правило, небольшие сроки службы изоляции, в отличие от «холодных» участков трубопроводов, где процессы старения покрытия развиваются гораздо с меньшей скоростью, а сроки его службы возрастают до нескольких десятков лет. В этом различие механизма изменения защитной способности покрытий на «горячих» и «холодных» участках трубопроводов [18,24,35,41,52,64].

Согласно Б.И. Борисову [17] к основным нагрузкам, действующим на защитное покрытие, относятся:

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

Под их влиянием изоляция находится в сложном напряженном состоянии, работая одновременно на сжатие, растяжение и сдвиг (рисунок 3.3).



$p_{гр}^n$ ,  $p_{гр}^τ$  – 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 3.3 – Схема основных усилий, действующих на изоляционное покрытие подземного газопровода

Кольцевые напряжения в слое покрытия  $\sigma_{кц}$  есть векторная сумма кольцевых напряжений, вызванных давлением транспортируемого газа  $\sigma_{кц}(p_{газа})$ , нормальной составляющей вертикального давления грунта  $\sigma_{кц}(p_{гр}^n)$  и температурным перепадом  $\sigma_{кц}(p_Q)$ . Продольные напряжения в покрытии  $\sigma_{пр}$  возникают в результате действия на слой покрытия усилий, создаваемых давлением транспортируемого газа. Касательные напряжения  $\tau$  возникают в результате действия тангенциальной составляющей вертикального давления грунта на слой покрытия [4,5,13,30,40,89].

Эквивалентные напряжения  $\sigma_{эkv}$ , возникающие в слое покрытия от действия всех вышеперечисленных нагрузок, согласно IV теории прочности определяются по формуле:

$$\sigma_{\text{эkv}} = \sqrt{\sigma_{\text{кц}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 - \sigma_{\text{кц}} \cdot \sigma_{\text{пр}} + 3\tau^2} \quad (3.1)$$

Определив распределение напряжений в слое покрытия, делают прогноз о вероятности его отслаивании: отслаивание покрытия будет происходить в том случае, когда эквивалентные напряжения будут превышать величину адгезионной прочности покрытия на сдвиг.

### 3.3 Методика расчета напряженно-деформированного состояния защитного покрытия тройникового узла с применением программного пакета Ansys Mechanical

#### 3.3.1 Постановка задачи расчета

В процессе строительства и ввода в эксплуатацию тройниковый узел подвержен различным нагрузкам. При этом нагрузки испытывает как сам корпус тройника, так и слой защитного покрытия. Краткое описание характера и время действия нагрузок представлены в таблице 3.1 [4,5,13,40,43,45,85].

Таблица 3.1 – Характерные нагрузки защитного покрытия

Нагрузка	Период действия	Краткое описание	Примечание
Температурная нагрузка в результате сварочного процесса	Строительство газопровода	Корпус тройникового соединения с защитным покрытием жестко приварен к линейной части. При сварке происходил нагрев модели точечным источником тепла до температуры плавления металла	Данный вид нагрузки является нестационарным. По окончании сварочного процесса и завершения этапа строительства происходит релаксация (уменьшение) напряжений
Давление транспортируемого газа	Эксплуатация газопровода	Внутренние полости корпуса нагружены давлением 7,5 МПа. Возникающие напряжения в корпусе воспринимаются слоем покрытия	Нагрузка является стационарной, так как действует на весь период эксплуатации газопровода
Давление грунта	Эксплуатация газопровода	Действует на внешнюю поверхность покрытия вследствие взаимного перемещения тройника и грунта. Изменяется как по поверхности покрытия, так и по времени	Нагрузка является стационарной, так как действует на весь период эксплуатации газопровода

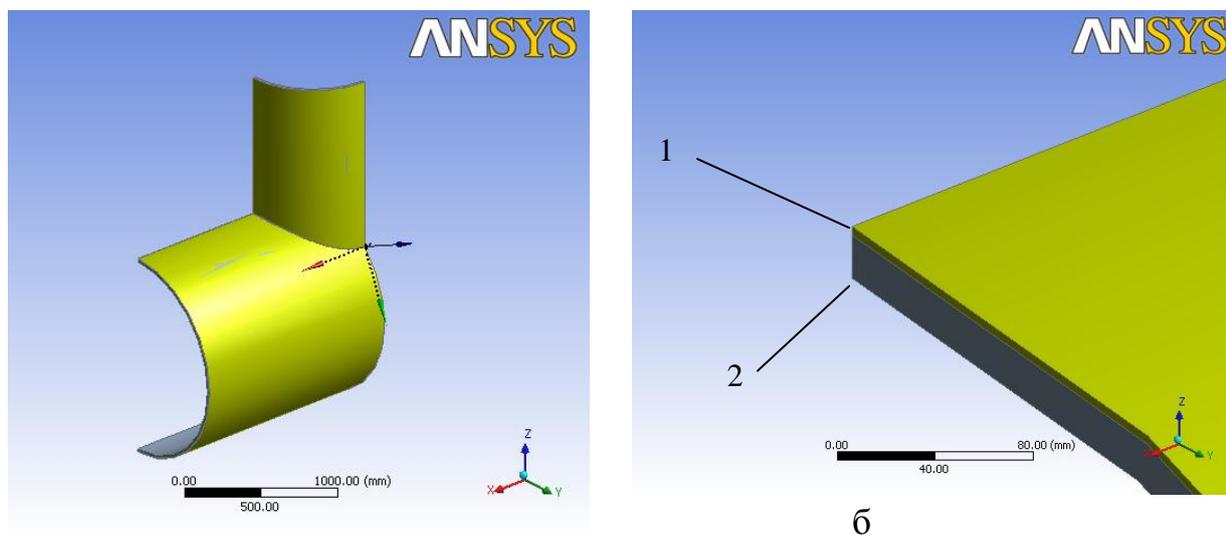
В данном разделе приведена методика автоматизированного расчета напряженно-деформированного состояния слоя защитного покрытия. Исходной моделью для расчета является модель тройникового узла (см. рисунок 3.3).

Результатом расчета будет являться наглядное представление о распределении деформаций и напряжений по поверхности слоя покрытия.

### 3.3.2 Ввод исходных данных

Для расчета используется геометрическая модель, созданная в графическом редакторе SolidWorks. Геометрическая модель показана на рисунке 3.4 и представляет собой четверть корпуса тройника, поскольку он симметричен относительно плоскостей XY и YZ. Расчет производился согласно следующих источников литературы [14,88,96–99].

После создания геометрической модели выполняется ее импортирование. Исходные данные для расчета представлены в таблице 3.2.



1 – слой покрытия; 2 – корпус тройника

Рисунок 3.4 – Геометрическая модель: общий вид модели (а); масштабирование модели (б)

Был определен тип анализа. В данном случае был использован температурный анализ для выполнения теплового расчета действия сварочного процесса. Назначался тип (рисунок 3.5) используемого элемента, определялись свойства материала.

Таблица 3.2 – 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
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/°C	$1,25 \cdot 10^{-5}$
коэффициенты линейного расширения покрытия, 1/°C	$2,6 \cdot 10^{-4}$

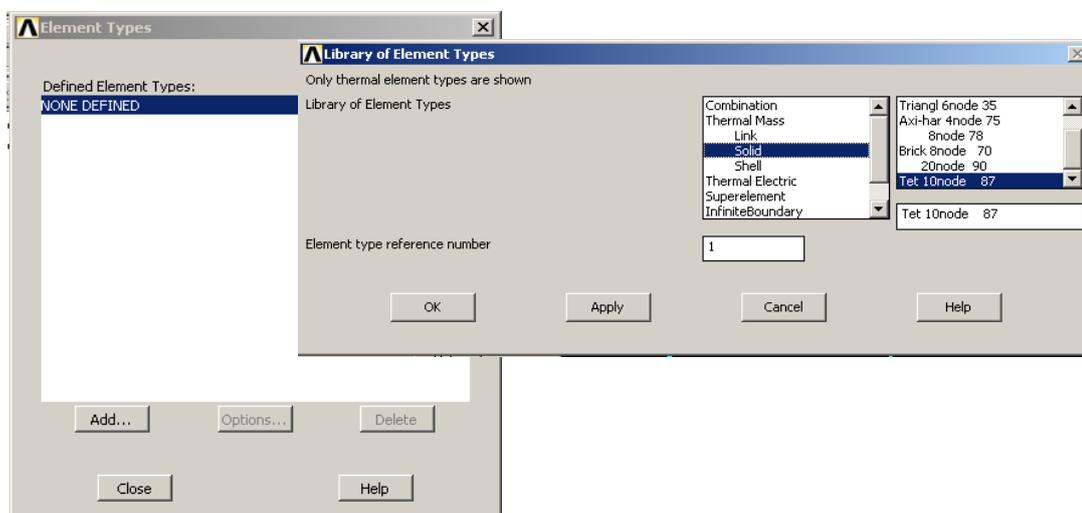


Рисунок 3.5 – Выбор типа элемента

Задавались свойства материала (рисунок 3.6).

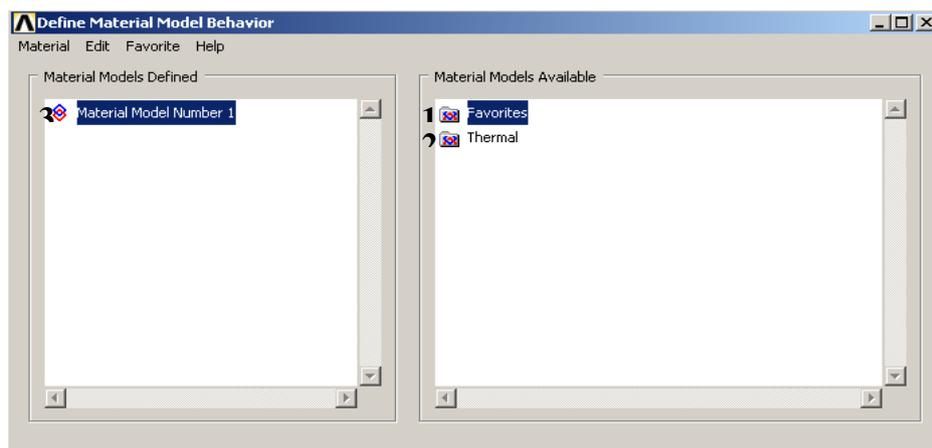


Рисунок 3.6 – Определение свойств материала

В данном случае назначались следующие параметры:

- Favorites > Linear Static > Linear Isotropic:  $E_X = 2.1E5$  (модуль упругости),  $PRXY = 0.28$  (коэффициент Пуассона) > ОК;
- Density:  $DENS = 7800$  (плотность);
- Thermal Expansion:  $ALPX = 1,25E-5$  (коэффициент линейного расширения).
- Thermal > Conductivity > Isotropic:  $KXX = 50$  (коэффициент теплопроводности);
- Thermal > Specific Heat:  $C = 460$  (теплоемкость).
- Material > New Model: 2 > ОК.

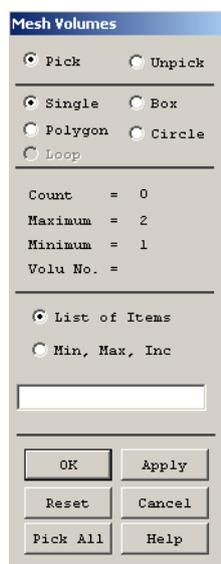
Первыми двумя пунктами задавали свойства стали (корпус тройника), третьим – определяли второй материал (покрытие). Повторяли пункт 1 и 2, задали свойства покрытия с параметрами:  $E_X = 500$ ,  $PRXY = 0,25$ ,  $DENS = 930$ ,  $ALPX = 2,6E-4$ ,  $C = 1880$ .

Задавали единицы измерения температуры. Каждому объему графической модели присваивали материал. Указателем выбирался корпус тройника или вводился его номер (объем 2). Указывался слой покрытия или вводился его номер (объем 1). Выполнялась дискретизация модели. В диалоговом окне выбирался уровень дискретизации (в данном случае 6 (default)). Задавались параметры автоматической генерации конечноэлементной сетки (рисунок 3.7).

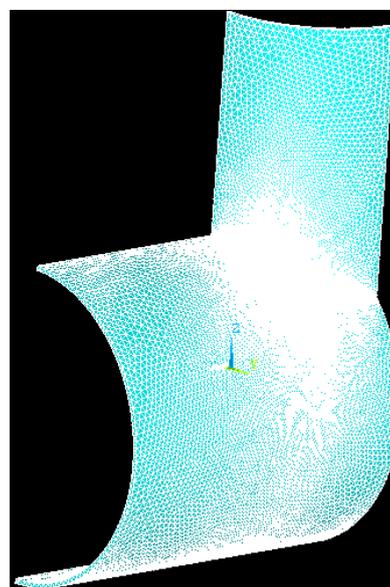


Рисунок 3.7 – Задание параметров автоматической генерации сетки

Производилось построение конечноэлементной сетки. Указывался импортированный объем или вводился его номер (объемы 1, 2) в окне выбора, показанном на рисунке 3.8, а. Результат построения конечноэлементной сетки представлен на рисунке 3.8, б.



а



б

Рисунок 3.8 – Окно выбора при дискретизации модели (а) и конечноэлементная модель тройника с покрытием (б)

### 3.3.3 Тепловой расчет исходной модели

Назначался тип анализа (команды – Solution > Analysis Type > New Analysis > Transient). Данный тип анализа применяется для расчета нестационарных процессов, в пределах решаемой задачи – это распространение тепла сварочного процесса.

Выполнялось приложение температурной нагрузки к геометрической мо-

дели и задание теплофизических параметров окружающей среды.

Задавалась температура окружающей среды и коэффициент теплоотдачи. Присваивались следующие значения переменных: [Sfa] Apply Film Coef on areas=Constant Value, VAL1 Film coefficient = 20 (коэффициент теплоотдачи) и VAL2I BULK TEMPERATURE = - 20 (температура окружающей среды).

При выполнении расчетов предполагалось, что источник температуры в зоне сварного шва является нестационарным (рисунок 3.9).

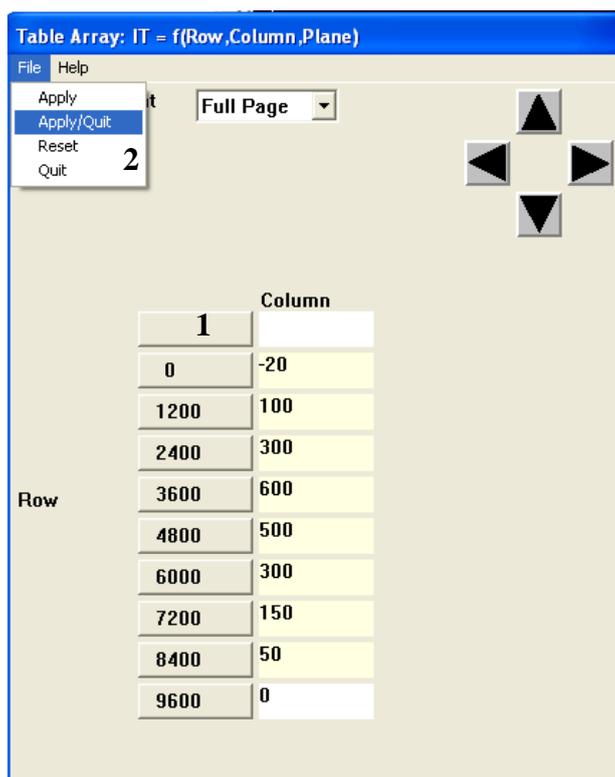


Рисунок 3.9 – Задание нестационарной температурной нагрузки

В соответствии с рисунком 3.9 заполняли поля таблицы 1 (I столбец – время с момента начала действия сварочной дуги, II столбец – значение температуры в зоне сварного шва) и далее: File > Apply/Quit. Задавалась начальная температура тройникового узла. Задавались параметры нестационарного расчета, указывающие количество итераций. Производились вычисления (команды – Main Menu > Solution > Solve > Current LS > ОК). При запуске решения выдавалось окно статуса, в котором приводилась краткая характеристика задачи. Также выводилось диалоговое окно (рисунок 3.10) для подтверждения запуска ре-

шения, что подтверждалось нажатием ОК. После завершения решения было выведено окно с сообщением Solution is done (рисунок 3.11).

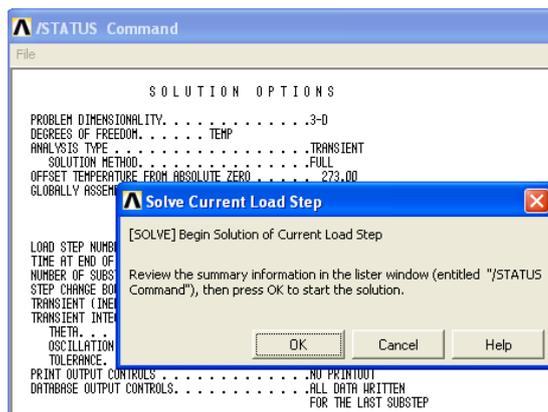


Рисунок 3.10 – Подтверждение запуска решения

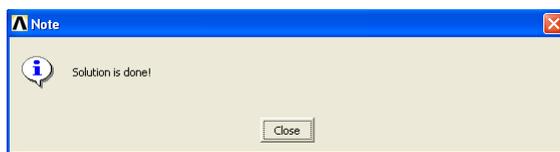


Рисунок 3.11 – Завершение вычислений

Осуществлялся вывод результатов вычислений (команды – Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu). В открывшемся диалоговом окне (рисунок 3.12) выбирался тип результата – Stress (напряжения) и его обозначение – von Mises stress (эквивалентные напряжения по Мизесу).

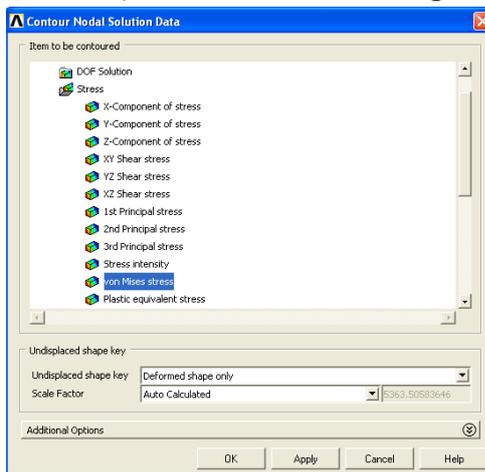
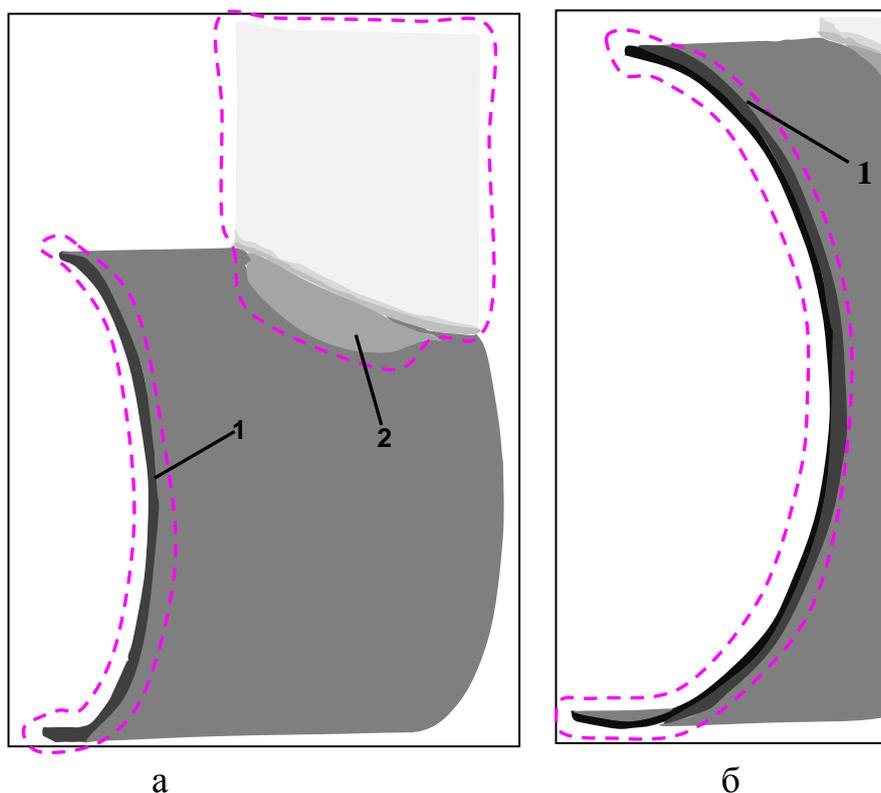


Рисунок 3.12 – Диалоговое окно вывода результатов

Результат теплового расчета покрытия представлен на рисунке 3.13, а. Поверхность покрытия разделена на несколько зон цветовым способом. Каждому значению цвета соответствует определенное значение напряжений (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Интерпретация цветовой шкалы напряжений

Характеристика цвета	Диапазон напряжений, МПа
	0,2 – 0,9
	0,9 – 1,7
	1,7 – 2,5
	2,5 – 3,3
	3,3 – 4,1
	4,1 – 4,9
	4,9 – 5,7
	5,7 – 6,5
	6,5 – 7,3



а – общий вид модели; б – зона концентрации напряжений в покрытии  
 1 – зона концентрации напряжений; 2 – зона уменьшения напряжений в покрытии

Рисунок 3.13 – Результат моделирования НДС покрытия вызванного температурным перепадом по окончании сварочного процесса

Также на рисунке обозначены зоны концентрации и ослабления напряжений в покрытии (рисунок 3.13, а). Видно, что цветовая гамма меняется от светло- (наименее нагруженные области) до темно-серого цвета (наиболее нагру-

женные участки). Рассмотрим подробнее выделенные на рисунке 3.13, а зоны.

Согласно полученным результатам автоматизированного расчета концентрация напряжений наблюдается в области 1 покрытия (рисунок 3.13, б). При этом полученный результат подтверждается теоретически. Известно, что температура сварочного процесса распространяется вдоль слоя защитного покрытия, уменьшаясь от его кромки. Так как термические напряжения прямо пропорциональны температурному перепаду, следовательно, будет наблюдаться уменьшение напряжений по поверхности покрытия от его кромки. На патрубке (область 2, рисунок 3.13, а) температурные перепады по окончании сварочного процесса будут минимальны, следовательно, будут минимальны термические напряжения, что подтверждается результатами автоматизированного расчета [49,50,92,95].

### 3.3.4 Прочностной расчет исходной модели

Производилось переключение на прочностной анализ, используя результаты теплового следующими командами:

– Main Menu > Preprocessor > Element Type > Switch Elem Type > Thermal to Structural > ОК;

– Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Temperature > From Therm Analy > выбирался файл с расширением \*.rth, где \* – название рабочего файла > ОК.

Производился выбор типа анализа (команды – Solution > Analysis Type > New Analysis > Static > ОК). Происходило переключение с нестационарного типа анализа на стационарный для ускорения результатов вычислений. Задавали условия симметрии на плоскостях XY и YZ: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > Symmetry B.C. > On Areas.

Указывали мышкой поверхности, лежащие на плоскостях XY и YZ, или вводили их номера в окне выбора.

Осуществляли приложение нагрузок (давления транспортируемого газа) к геометрической модели (рисунок 3.14).

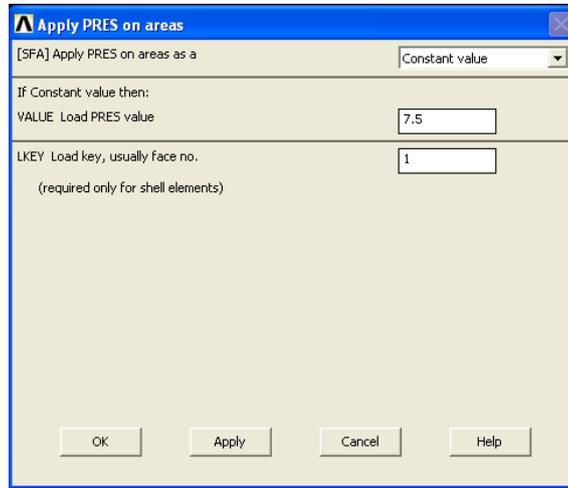


Рисунок 3.14 – Задание давления на поверхностях

Указание поверхностей, воспринимающих внутреннее давление, выполняется с использованием следующих команд: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Areas. Указывали внутренние поверхности корпуса или вводили их номера в окне выбора. В открывшемся окне (см. рисунок 3.14) вводили в поле VALUE Load PRES value значение давления 7,5 МПа. Запуск расчета производился следующей командой: Main Menu > Solution > Solve > Current LS > OK.

Осуществляли вывод результатов вычислений (команда – Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu). В открывшемся диалоговом окне (рисунок 3.15) выбирали тип результата – Stress (напряжения) и его обозначение – von Mises stress (эквивалентные напряжения по Мизесу).

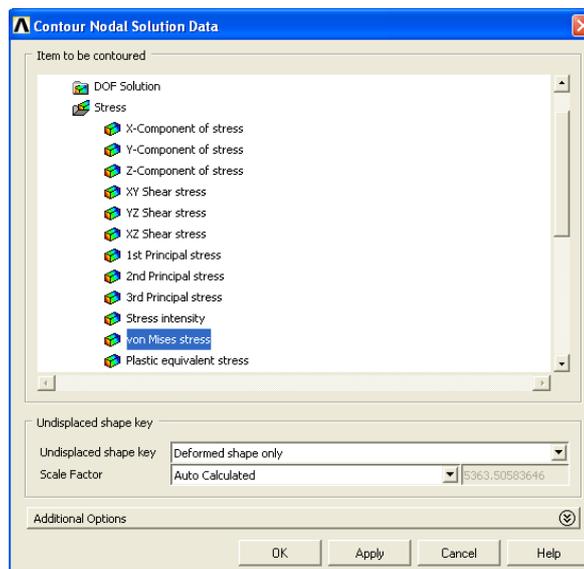


Рисунок 3.15 – Диалоговое окно вывода результатов

Таким образом, 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 3.16, таблица 3.4).

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.

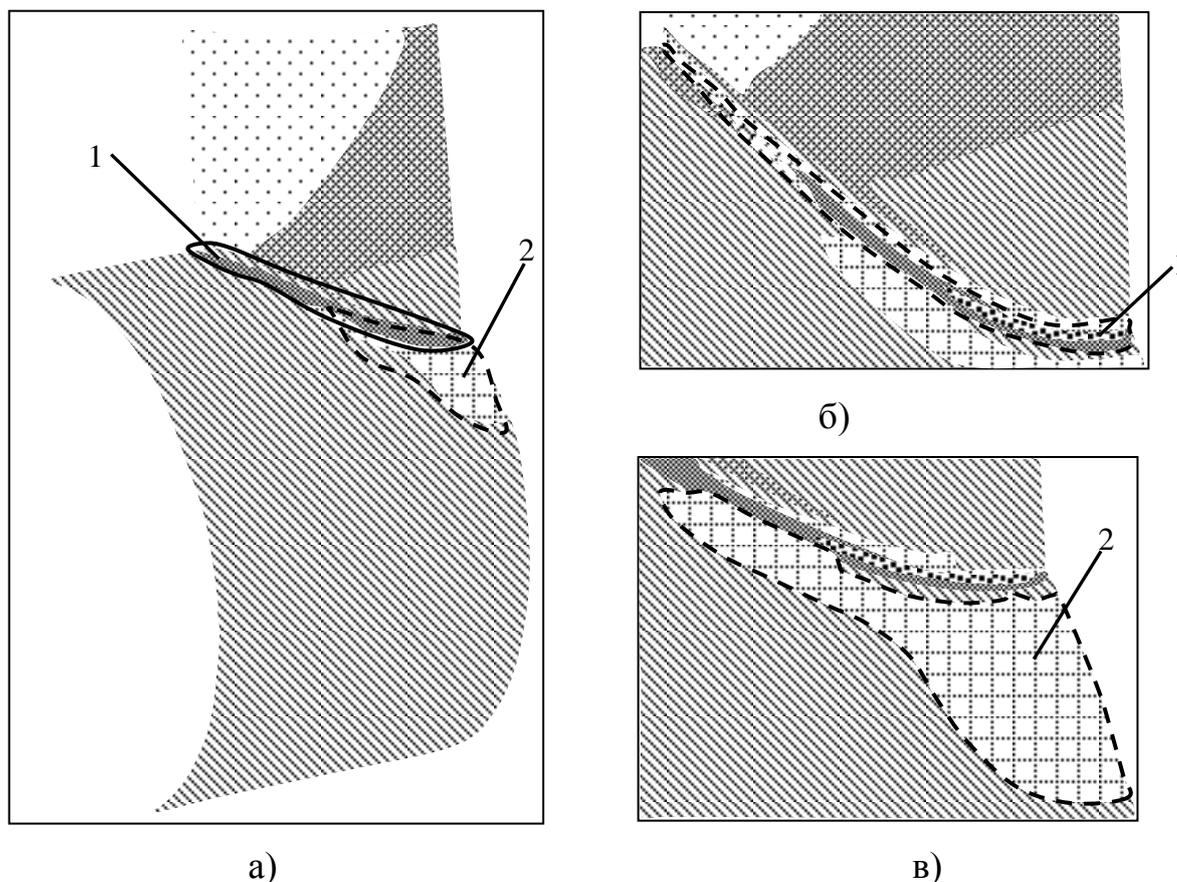
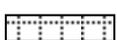
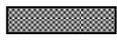


Рисунок 3.16 – Результаты расчета оценки вероятности отслаивания покрытия  
а – общий вид модели; б, в – участки концентрации напряжений в слое покрытия

Наиболее нагруженной областью является участок покрытия, нанесенный на зону стыка основной трубы и патрубка (рисунок 3.16, б). Данный результат хорошо согласуется с аналитическими методами расчета, в основу которых принимается интенсификация напряжений в зоне стыка. При этом значение

напряжений в данной области превышает величину адгезии покрытия, что является свидетельством о высокой вероятности отслаивания покрытия. Площадь распространения зоны невелика, может составлять 10 – 15 % от радиуса основной трубы. Однако характер изменения напряжений в самой зоне имеет нелинейный характер, наблюдается резкое усиление напряжений. При этом увеличение напряжений происходит на 70 – 140 %.

Таблица 3.4 – 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

Зона 2 (рисунок 3.16, в) расположена на основной трубе и является переходным участком между стыком и телом трубы. Увеличение напряжений объясняется местом расположением выделенной зоны:

- примыкает к зоне 1 (НДС увеличивается на 13 – 20 %);
- расположена в области с большим значением удельной потенциальной энергии изменения формы, нежели верхняя часть основной трубы, примыкающая к стыку (НДС увеличивается на 7 – 15 %).

Как следует из экспериментов и аналитических исследований [91,94,95], результаты, полученные с помощью этих методик, могут отклоняться от реальных значений, как в пользу запаса прочности, так и наоборот. Характер таких отклонений носит непрогнозируемый характер, в результате чего в ряде случа-

ев имеет место только качественное совпадение действительных и расчетных величин. Это в наибольшей степени относится к тройниковым соединениям, полученным путем врезки в действующий трубопровод.

Указанные факторы имеют под собой реальную причину – отсутствие адекватной и простой модели напряженного состояния тройникового соединения, пригодной для использования в инженерных расчетах [15,28,38,62,93,94,100].

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

### 3.4 Характеристики объектов диагностирования

Полученные результаты по определению потенциально опасных участков были перепроверены экспериментальным путем. Для этого на базах хранения было продиагностировано полиуретановое покрытие 10 крутоизогнутых отводов, 10 тройников и 7 шаровых кранов, находящихся на площадках хранения. В таблицах 3.5 – 3.7 представлена исходная информация об объектах контроля.

Таблица 3.5 – Исходная информация о крутоизогнутых отводах

Показатель	Значение показателя		
	2	3	4
1			
Наименование изделия	Отвод ОГ 90 <sup>0</sup>	Отвод ОГ 26 <sup>0</sup>	Отвод ОГ 45 <sup>0</sup>
Количество, штуки	4	3	3
Д×δ, мм	1220×21,3	1420×25,8	1420×25,8
Марка стали	К60	К60	К60
Тип покрытия	Полиуретановое		
Марка покрытия	Уризол	Уризол	Уризол
ТУ на покрытие	ТУ 1469-002-04834179-2005		

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4
Тип исполнения покрытия	Пк-60	Пк-60	Пк-60
Длина неизолированных концевых участков	130/135	120/124	130/135
Тип / количество сварных швов	Продольный/2	Продольный/1	Продольный/1
Местоположение сварных швов	3 и 9 ч	12 ч	12 ч

Таблица 3.6 – Исходная информация о тройниках

Показатель	Значение показателя			
	1	2	3	4
Наименование изделия	Тройник	Тройник	Тройник	Тройник
Количество, штуки	4	3	3	3
D×δ (магистраль тройника (МТ)), мм	1420×25,8	1220×21,3	1220×21,3	1220×21,3
D×δ (ответвление тройника (ОТ)), мм	1220×21,3	325×12	1220×21,3	1220×21,3
Марка стали (МТ)	К60	К60	К60	К60
Марка стали (ОТ)	К60	К48	К60	К60
Тип покрытия	Полиуретановое			
Марка покрытия	UP-1000/Frucis 1000A			
ТУ на покрытие	ТУ 1469-014-01395041-07			
Тип исполнения покрытия	Пк-60	Пк-60	Пк-60	Пк-60

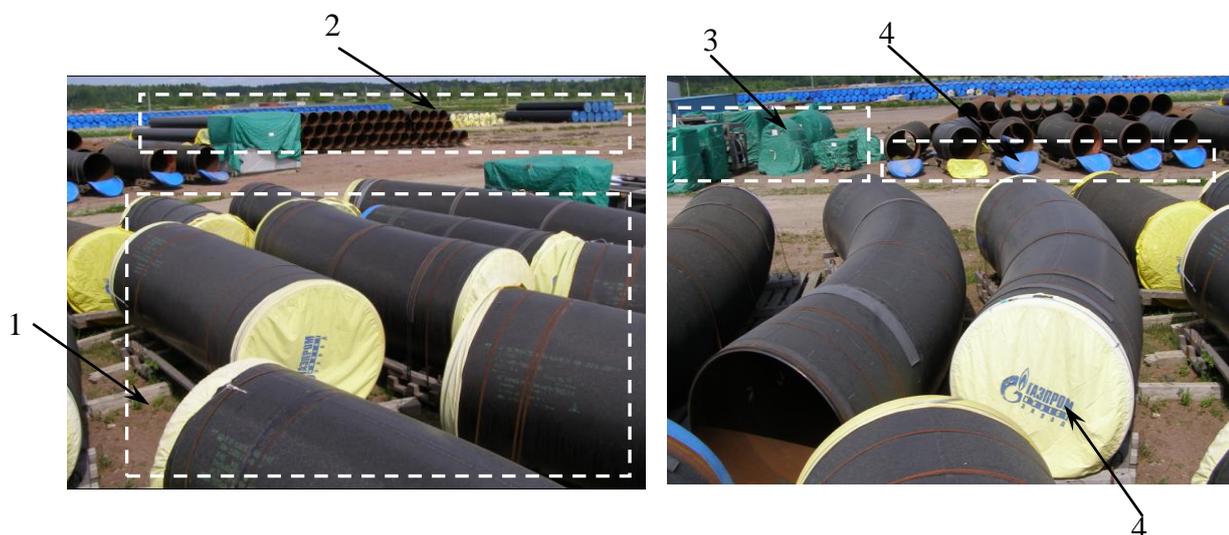
Продолжение таблицы 3.6

1	2	3	4
Длина неизолированных концевых участков	130/135	130/135	130/135
Тип / количество сварных швов	Продольный/1, продольный/1, поперечный/1	Продольный/1, поперечный/1	Продольный/1, про- дольный/1, поперечный/1
Местоположение сварных швов	МП 6 ч, ВП 3 ч, МП – ВП	МП 6 ч, МП – ВП	МП 6 ч, ВП 2,45 ч, МП – ВП

Таблица 3.7 – Исходная информация о шаровых кранах

Показатель	Значение показателя			
	Кран шаро- вый	Кран шаро- вый	Кран шаро- вый	Кран шаровый
Количество, штуки	2	2	2	1
Ду, мм	700	700	700	700
Марка стали	09Г2С	09Г2С	09Г2С	09Г2С
Тип покрытия	Полиуретановое			
ТУ на покрытие	ТУ 1469-002-04834179-2005			
Тип исполнения покрытия	Пк–60	Пк–60	Пк–60	Пк–60

Общий вид базы хранения фасонных изделий представлен на рисунке 3.17.



а)

б)

1 – площадка хранения отводов; 2 – площадка хранения труб;

3 – площадка хранения тройниковых узлов; 4 – заглушки

Рисунок 3.17 – Общий вид базы хранения: площадки хранения отводов и труб (а); площадки хранения тройниковых узлов и отводов (б)

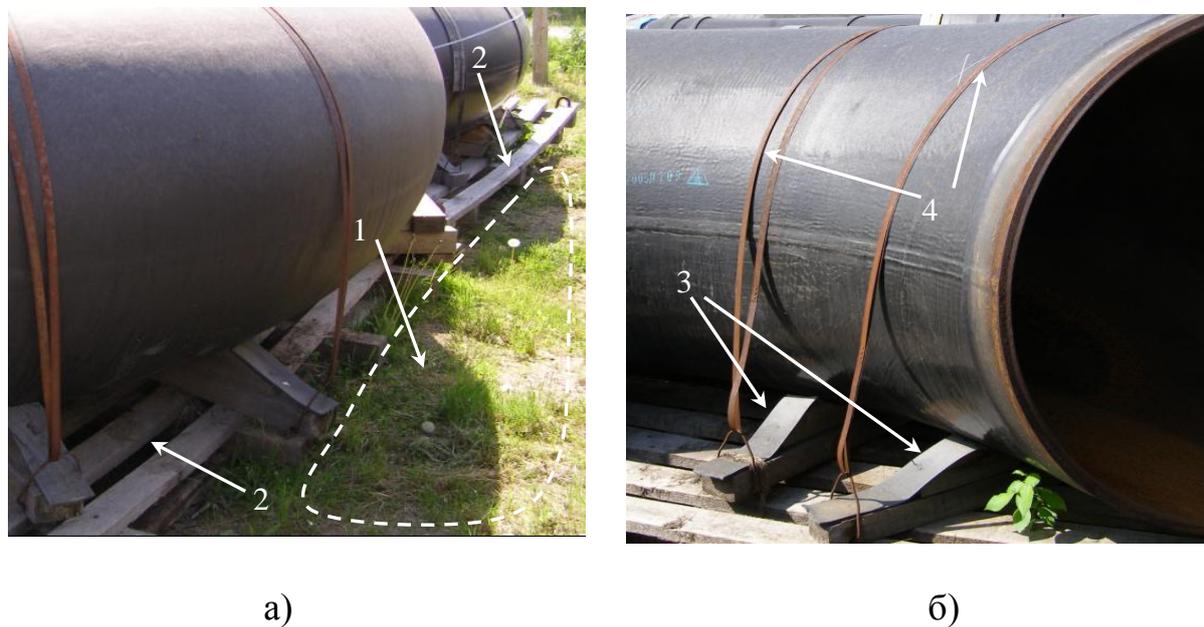
Изделия хранятся по площадкам сгруппировано. На большинстве отводов установлены торцевые заглушки. Заглушки предназначены для защиты свободных от покрытия торцевых участков отводов от негативных факторов окружающей среды, предохранения кромок покрытия от усадки и последующего отслоения под действием сезонных температурных колебаний. Заглушки изготовлены из синтетического полотна, на внешнюю поверхность которого нанесена гидроизолирующая поливинилхлоридная пленка.

Крутоизогнутые отводы хранятся на настиле из деревянных подставок с применением противооткатных упоров (выполнены в виде деревянных призм, рисунок 3.18).

Отводы дополнительно зафиксированы металлическими лентами. Концы лент жестко зафиксированы петлями по краям упоров. Отводы хранятся без защитных укрытий, следовательно, подвержены влиянию атмосферных условий (ультрафиолетовое излучение, атмосферная влага).

Хранение тройников, в основном, производится в деревянных корпусных тарах (ящиках), расположенных на деревянных подставках и укрытых по всей

поверхности гидроизолирующим полимерным материалом (рисунок 3.19, а). Однако иногда наблюдается хранение на деревянных подставках в атмосферных условиях (рисунок 3.19, б).

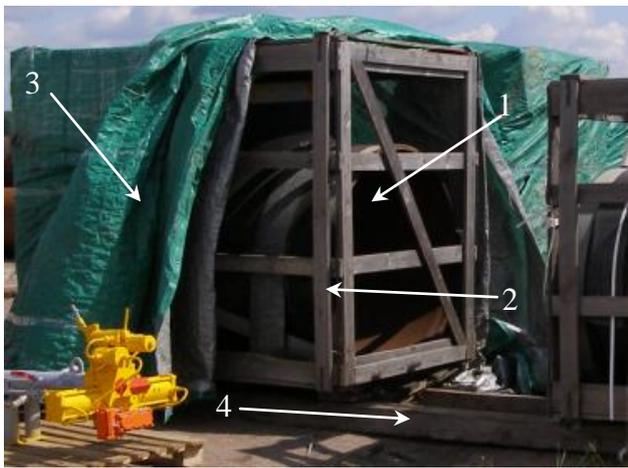


1 – поверхность грунта; 2 – деревянные подставки; 3 – противооткатные упоры;  
4 – металлические фиксирующие ленты

Рисунок 3.18 – Типовая схема хранения отводов: подставки под отводы (а);  
фиксирующие элементы (б)

При хранении в крытых условиях тройник дополнительно фиксируется с деревянной тарой синтетическими полимерными лентами (рисунок 3.20, а). Укрывные гидроизоляционные материалы обмотаны в нескольких сечениях по периметру липкой рулонной лентой для предотвращения их отрыва от корпусной деревянной тары под действием атмосферных потоков воздуха (ветра) (рисунок 3.20, б). При хранении в атмосферных условиях (рисунок 3.20, в) торцы тройниковых изделий заизолированы заглушками, выполненными из синтетического полотна. Фиксация тройников к деревянным подставкам выполнена металлическими фиксирующими полосами.

На площадках хранения было выполнено обследование состояния полиуретанового покрытия шаровых кранов. Общий вид площадки хранения фасонных изделий представлен на рисунке 3.21.



а)



б)

1 – тройник; 2 – деревянный сквозной корпус; 3 – укрывной материал;  
4 – деревянные подставки

Рисунок 3.19 – Типовые схемы хранения тройниковых узлов: в крытых условиях (а); в атмосферных условиях (б)



а)



б)



в)

1 – фиксирующие синтетические ленты; 2 – липкая рулонная лента;  
3 – металлические фиксирующие ленты; 4 – заглушки

Рисунок 3.20 – Особенности хранения тройниковых узлов: в крытых условиях (а, б); в атмосферных условиях (в)

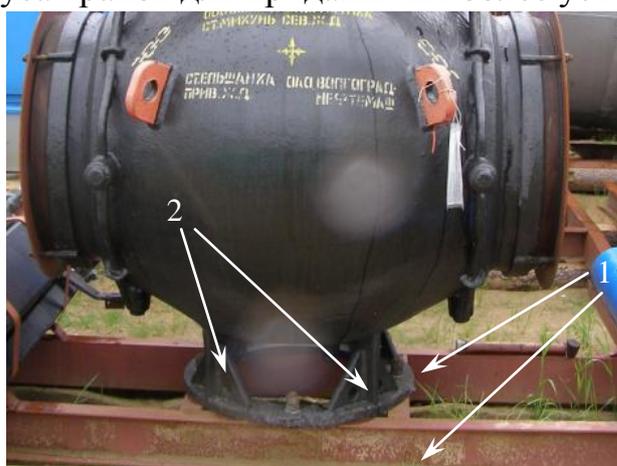
Изделия хранятся по площадкам сгруппировано. В первом ряду хранятся корпуса шаровых кранов с защитным покрытием (поз. 1), во втором ряду – корпуса кранов без покрытия (поз. 2), но на их поверхность нанесен слой краски. В непосредственной близости расположены приводы корпусов (поз. 3). Изделия хранятся на металлических подставках (поз. 4).



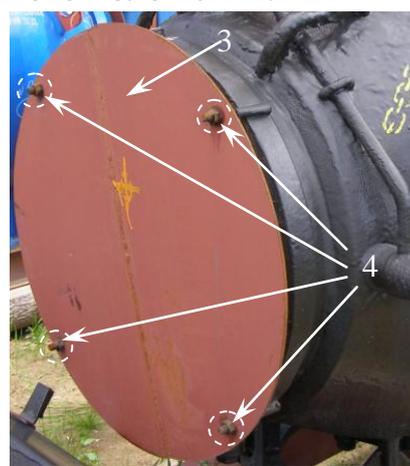
1 – шаровые краны с защитным покрытием; 2 – шаровые краны без покрытия (окрашенные); 3 – стойка привода; 4 – металлические подставки

Рисунок 3.21 – Площадка хранения шаровых кранов

Изделия хранятся на стальных подставках (рисунок 3.22, а). На корпусах кранов установлены торцевые металлические заглушки. Заглушки приварены к корпусу и жестко присоединены стягивающими болтами (рисунок 3.22, б). При этом отсутствуют какие-либо укрытия поверхности шаровых кранов от воздействия атмосферных явлений. Также не наблюдается дополнительной фиксации корпуса кранов для придания им более устойчивого положения.



а)



б)

1 – стальные подставки; 2 – опоры корпуса; 3 – стальная торцевая заглушка; 4 – фиксирующие стяжные элементы

Рисунок 3.22 – Особенности хранения шаровых кранов: вид спереди (а); вид сбоку (б)

### 3.5 Методика диагностирования состояния покрытия

В ходе диагностирования покрытий выполнялись измерения толщины слоя магнитным толщиномером.

Далее приведены методики диагностирования покрытий для тройников, шаровых кранов и крутоизогнутых отводов.

#### 3.5.1 Методика диагностирования защитного покрытия тройников

Схема расположения контрольно-измерительных сечений по поверхности покрытия тройникового узла представлена на рисунке 3.23.

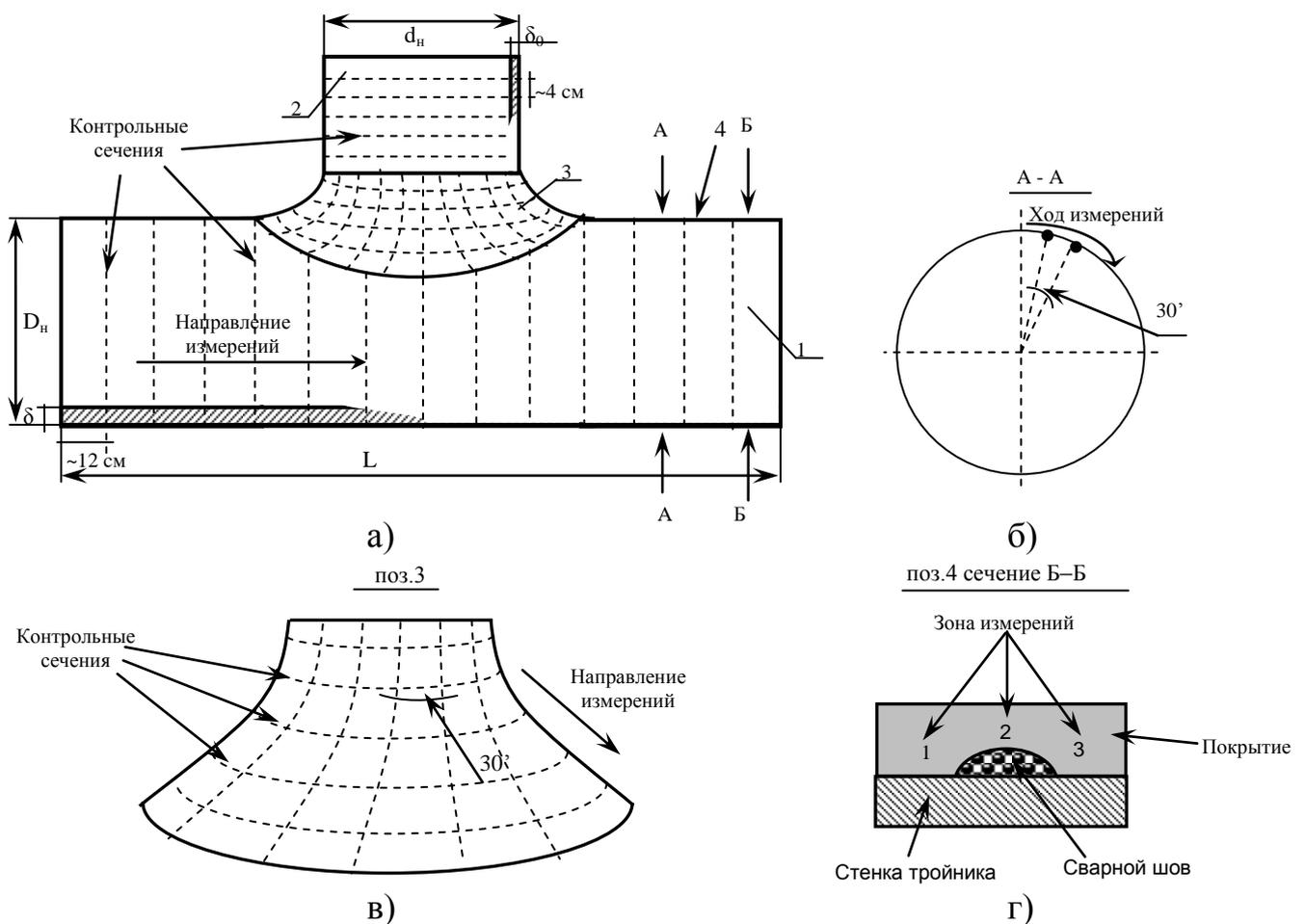


Рисунок 3.23 – Схема диагностирования покрытия тройникового узла: общий вид (а); детальные сечения (б, в, г)

Измерения проводились в четырех зонах тройникового соединения: магистраль тройника (поз. 1) (см. рисунок 3.23, а), ответвление тройника (поз. 2)

(см. рисунок 3.23, б), стыковое соединение (поз. 3) (см. рисунок 3.23, в), сварные швы (поз. 4) (см. рисунок 3.23, г).

Количество контрольных сечений зависит от длины МТ (L) и расстояния между ними. Расстояние между сечениями составило 100 – 150 мм. В каждом сечении проводятся измерения по окружности с дискретностью в 30°, т.е. 24 измерения по сечению (разрез А-А).

Для ОТ измерения проводились в четырех-шести контрольных сечениях по его длине от сварного шва. Расстояние между сечениями составило 30 – 40 мм. В каждом сечении проводились измерения по окружности с дискретностью в 30°, т.е. 24 измерения по сечению.

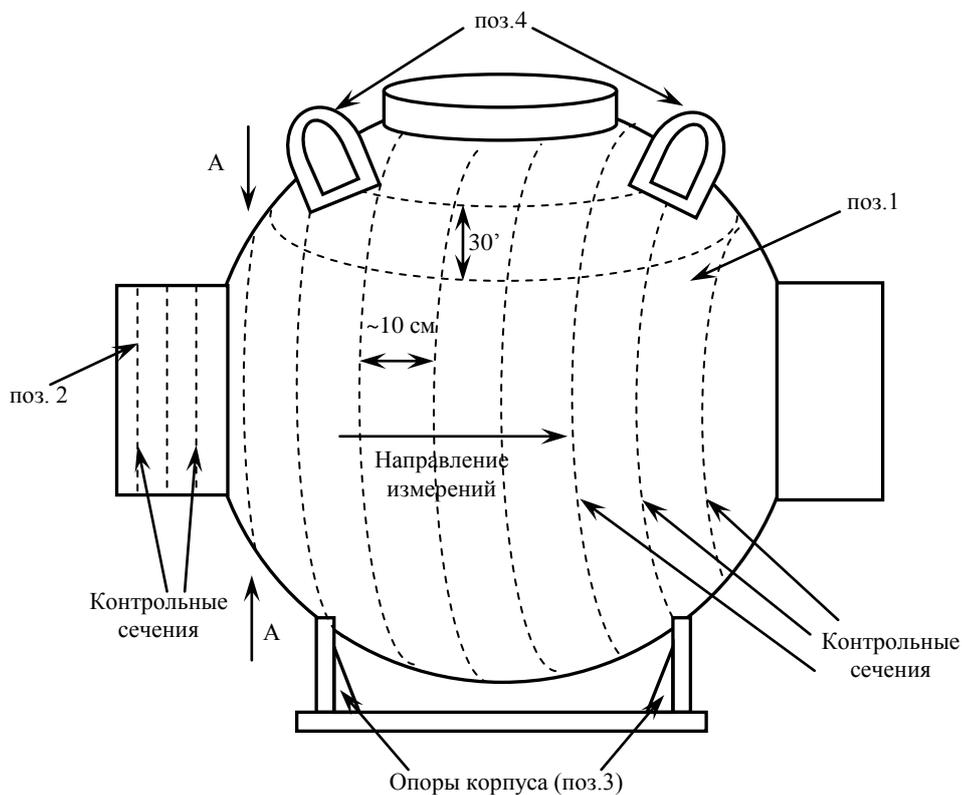
Для зоны 3 измерения проводились по сетке. Измерения выполнялись от сварного шва, расположенного на ОТ. Количество контрольных сечений составило четыре – девять (в зависимости от геометрии тройника). Полученные сечения разбили на секторы по 30°.

Измерения для зоны 4 производились вдоль всего шва и с обеих сторон от него на расстоянии 1 – 2 см. Измерения на продольном шве МТ не осуществлялись ввиду особенностей хранения (труднодоступное место). На поперечном шве измерения проводились для разных настроек прибора (настройки на диаметр МТ и диаметр ОТ). Измерения выполнялись по окружности шва с промежутком 30°. На продольном шве ОТ измерения проводились вдоль шва. Расстояние между измерительными точками составило 3 – 5 см.

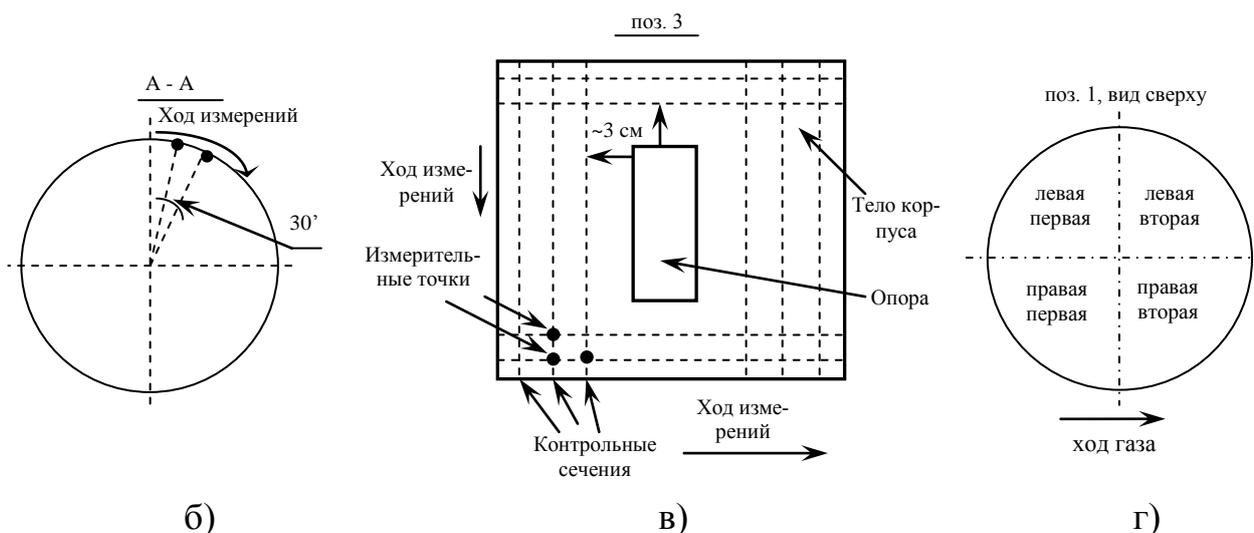
### 3.5.2 Методика диагностирования защитного покрытия корпуса запорной арматуры

Схема расположения контрольно-измерительных сечений по поверхности покрытия корпуса шарового крана представлена на рисунке 3.24.

Измерения проводились в четырех зонах запорной арматуры: корпус крана (поз. 1), присоединяемые патрубки (поз. 2), опоры корпуса (поз. 3), проушины и иные выступающие части корпуса (поз. 4).



а)



б)

в)

г)

Рисунок 3.24 – Схема диагностирования покрытия корпуса запорной арматуры:  
общий вид (а); детальные сечения (б, в, г)

Для корпуса (поз. 1) проводились измерения в 10 контрольных сечениях, расстояние между сечениями составило 10 – 15 см. В каждом сечении проводятся измерения по окружности с дискретностью в 30°, т.е. 24 измерения по сечению (разрез А – А).

Для присоединяемых патрубков (поз. 2) измерения проводились в трех

контрольных сечений по его длине. В каждом сечении проводятся измерения по окружности с дискретностью в 30°, т.е. 24 измерения по сечению.

Далее производились измерения около опор корпуса (поз. 3), которые являются труднодоступными местами. Измерения проводились по телу корпуса на расстоянии 3 см от опоры (маркером или мысленно наносили контрольные сечения). Количество контрольных сечений вдоль – три с каждой стороны, поперек – два с каждой стороны. Число измерительных точек по сечению – 15, т.е. 10 контрольных сечений, в каждом из которых делалось 15 замеров. Шаг сканирования составил 1,5 см.

В последнюю очередь производили измерения в зонах выступа (проушинах) (поз. 4). Измерения проводили аналогично измерениям около опор корпуса, с небольшими различиями:

- на некоторых кранах количество измерительных точек по сечению – 10;
- расстояние от проушины – 1,5 см.

Указано месторасположение выступающей части (правая первая, правое вторая, левая первая, левая вторая), т.е. примерные геометрические координаты на теле корпуса.

### 3.5.3 Методика диагностирования защитного покрытия крутоизогнутого отвода

Схема расположения контрольно-измерительных сечений по поверхности покрытия крутоизогнутого отвода представлена на рисунке 3.25.

Измерения проводились в двух зонах крутоизогнутого отвода: труба отвода (поз. 1), сварные швы (поз. 2).

Для труб отводов измерения проводились в 15 контрольных сечениях (расстояние между сечениями составило 25 см). В каждом сечении проводились измерения по окружности с дискретностью в 30°, т.е. 24 измерения по сечению (разрез А-А). Измерения для зоны 2 производились вдоль всего шва и с обеих сторон от него на расстоянии 1 – 2 см, при этом число измерительных точек составило 15 и 30. Указаны местоположение шва (часовая ориентация) и его тип.

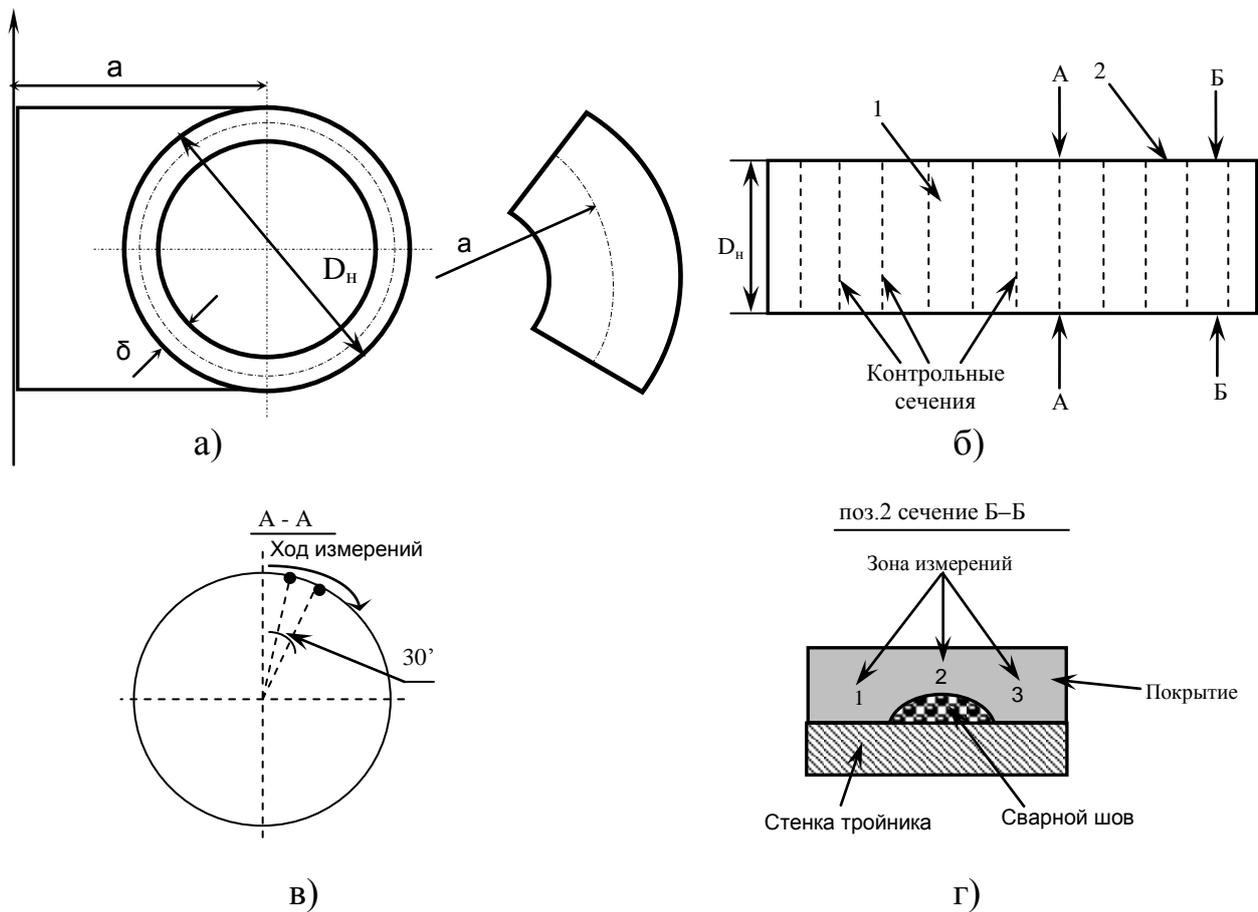


Рисунок 3.25 – Схема диагностирования покрытия крутоизогнутого отвода: общий вид (а, б); детальные сечения (в, г)

Также при анализе толщины покрытия установим диапазон толщины, при котором изделие с покрытием соответствует техническим требованиям, и при этом вероятность отслаивания покрытия будет наименьшей. Согласно Временному регламенту приемки качества антикоррозионного покрытия запорной арматуры, утвержденному ОАО «Газпром» [20], для изделий диаметром 820 мм и выше, толщина покрытия должна быть не менее 2 мм, в противном случае изделие с покрытием не соответствует техническим требованиям. Однако с учетом проведенных в ООО «Институт ВНИИСТ» исследований, установлено, что при толщине покрытия свыше 4,5 мм вероятно снижение прочности адгезии. Поэтому при анализе толщины покрытия введем следующий диапазон:

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

### 3.6 Анализ результатов диагностирования защитных покрытий тройников

При анализе результатов диагностирования защитных покрытий тройников отдельно рассматриваются следующие зоны по кольцевым сечениям:

- корпус (магистраль) тройника (зона 1);
- штуцер (ответвление) тройника (зона 2);
- особые конструктивные зоны (стыковое соединение, сварные швы).

Измерения проводились не во всех точках кольцевых (контрольных) сечений из-за особенностей хранения и геометрии изделий (см. рисунки 3.19, 3.20, рисунок 3.26).



Рисунок 3.26 – Характерные недоступные для контроля зоны тройника: локальные участки покрытия, в которых не были проведены измерения (а, б, в)

По результатам измерений установлено, что на магистрали тройников толщина покрытия соответствует оптимальному значению 2,0 – 4,5 мм. Наблюдаются незначительные наплывы на тройнике № 3 (рисунок 3.27). При этом наплывы расположены у кромок, что объясняется ориентацией тройников при нанесении покрытия (см. рисунок 3.1).

Неоднородность толщины покрытия характеризуется коэффициентом вариации  $V$ . Согласно авторам [26,36,48] классификация выборки будет следующей:

- $V < 17\%$  – абсолютно однородная;
- $17\% \leq V \leq 33\%$  – достаточно однородная;

–  $33\% < V \leq 40\%$  – недостаточно однородная;

–  $V > 40\%$  – неоднородная.

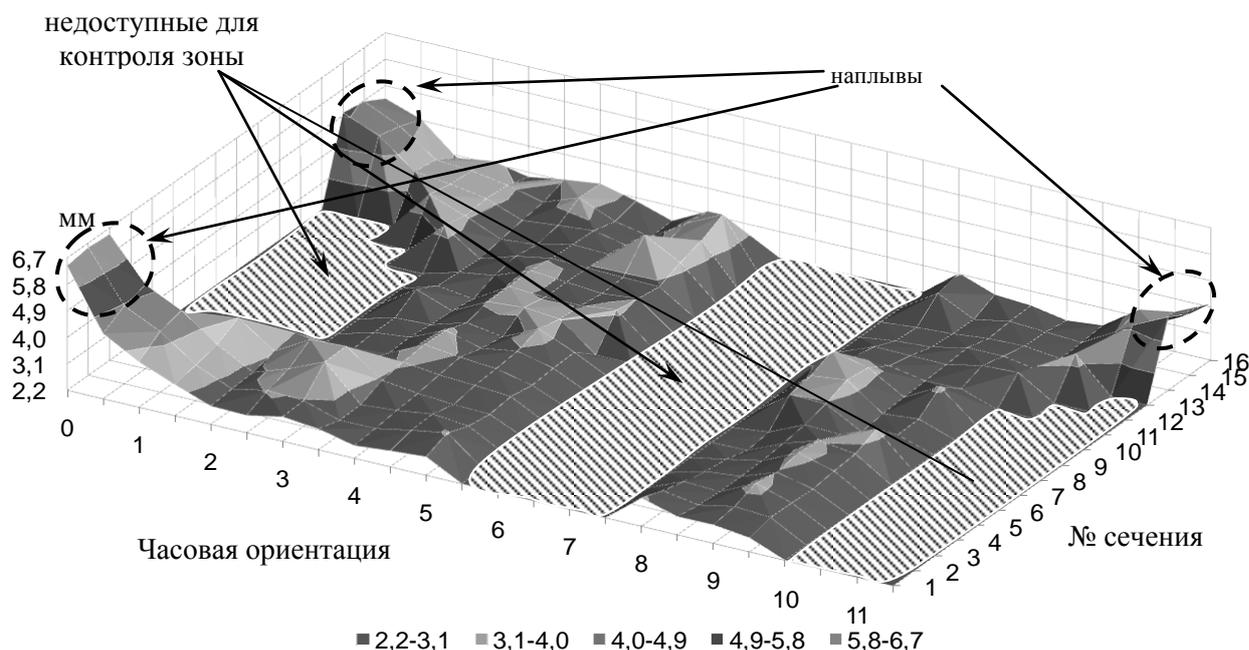


Рисунок 3.27 – Распределение слоя покрытия по поверхности корпуса тройника

Чем меньше значение коэффициента вариации  $V$ , тем равномернее было нанесено покрытие и отсутствовало гравитационное перераспределение массы покрытия после нанесения при отверждении, т.е. влияние «фактора нанесения» минимально или отсутствует.

Случай  $V < 17\%$  характерен для отработанной технологии нанесения покрытия (в основном заводская автоматизированная технология), в частности процесс заводской изоляции труб. При  $V > 33\%$  рекомендуется выполнить оптимизацию технологии нанесения покрытия.

Так как  $V_{11} < 17\%$  (коэффициент вариации зоны 1 тройника №1) а также остальные за исключением  $V_{13}$  меньше 17%, то и значение толщины покрытия этих зон соответствует оптимальному значению. При этом только 8,6% измеренных значений в зоне 1 тройника №3 были вне диапазона оптимальных значений.

Установлено, что на поверхности ответвлений всех трех тройников толщина покрытия соответствует оптимальному значению 2,0 – 4,5 мм (рисунок 3.28). Наплывов покрытия по поверхности ответвления не обнаружено. Так как коэффициент вариации меньше 17%, то толщина покрытия находится в диапазоне

ОПТИМАЛЬНЫХ значений.

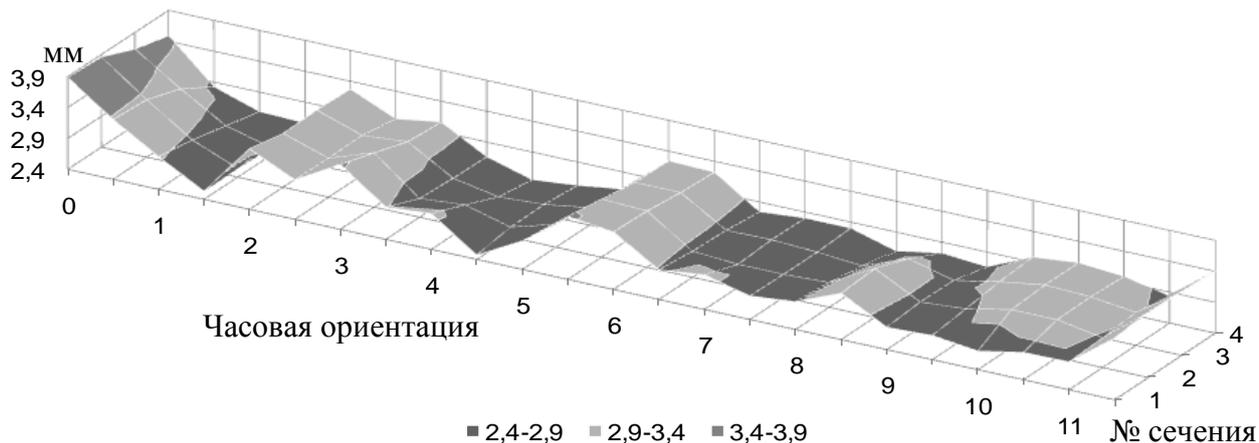


Рисунок 3.28 – Распределение слоя покрытия по поверхности отвода тройника

Установлено, что в зоне 3 на покрытии всех тройников наблюдаются наплывы, которые образовались в результате стекания неотвердевшего покрытия с магистрали (см. рисунок 3.1).

Так как коэффициент вариации толщины покрытия для данной зоны в большинстве случаев больше 33% , то значительная доля площади поверхности покрытия имеет толщину, не соответствующую оптимальному диапазону значений (рисунок 3.29).

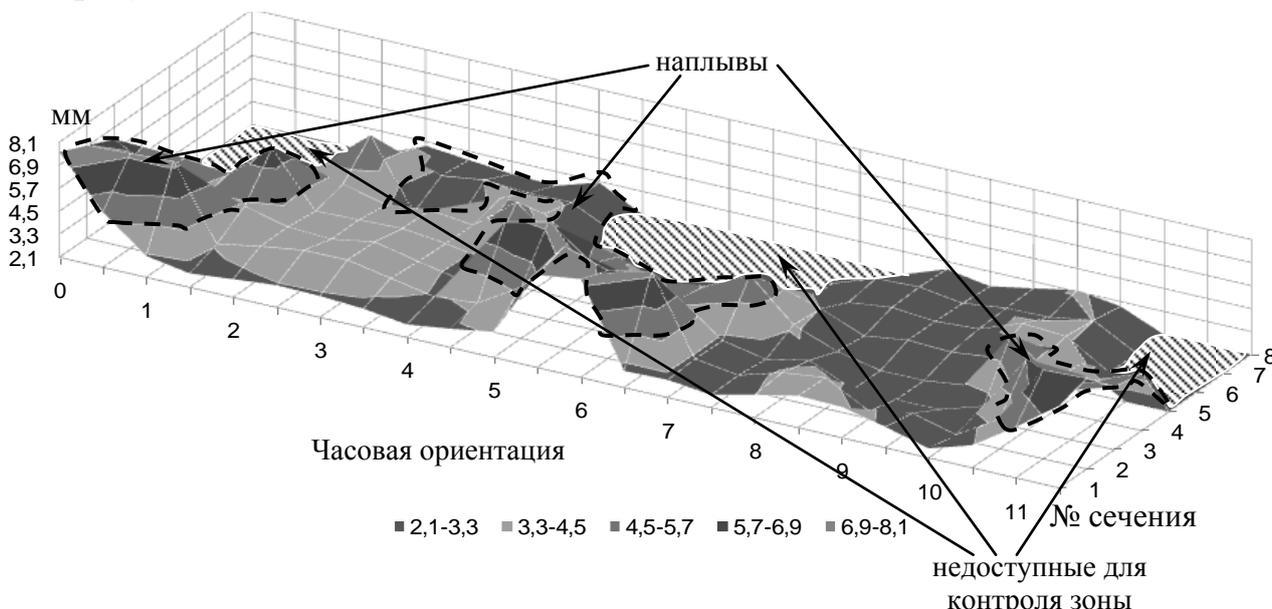
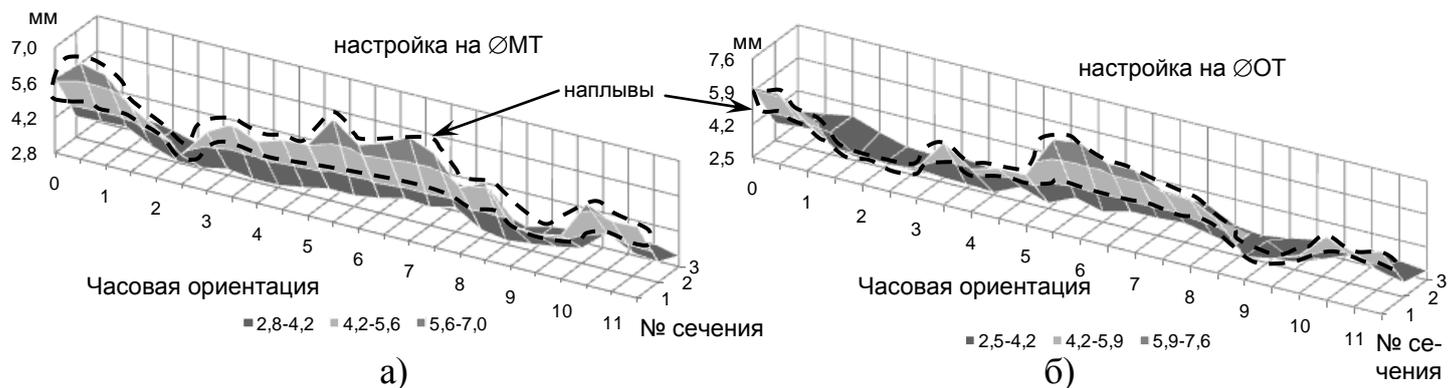


Рисунок 3.29 – Распределение слоя покрытия по поверхности отвода тройника

В зоне сварных швов наблюдаются наплывы на тройниках № 2 – № 9 (рисунок 3.30). При этом наплывы расположены со стороны ответвлений. Так как ко-

эффицент вариации  $17\% < V < 33\%$ , то доля площади поверхности покрытия с толщиной, не соответствующей оптимальному диапазону значений, незначительна.



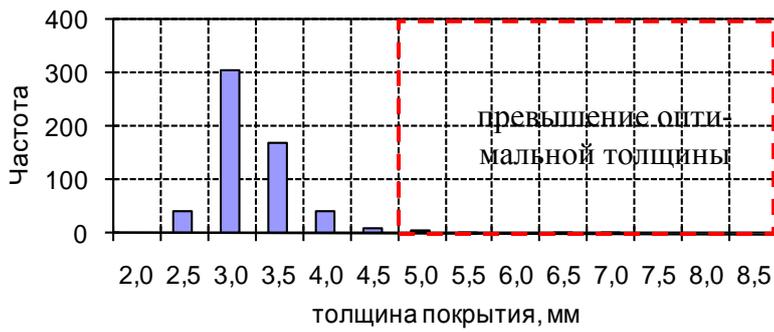
а – настройка на диаметр МТ; б – настройка на диаметр ОТ

Рисунок 3.30 – Распределение слоя покрытия по поверхности сварных швов

Для всех тройников неоднородность толщины покрытия примерно одинакова и составляет 27 %. Поэтому, в целом наблюдается равномерность нанесения покрытия, однако процесс нанесения требует дополнительных технологических улучшений. Качество равномерности нанесения покрытия можно характеризовать как удовлетворительное. На всех контролируемых изделиях толщина покрытия соответствует техническим требованиям (не менее 2 мм).

На рисунке 3.31 представлены итоговые гистограммы распределения толщины покрытия и ее статистические характеристики для каждой зоны тройников.

Таким образом, качественное нанесение покрытия на поверхность тройников затруднено в зоне соединения магистрали и ответвления, а также в окрестности сварных швов. Покрытие, нанесенное на эти участки, характеризуется увеличенной или уменьшенной толщиной по сравнению с толщиной покрытия на других участках поверхности, соответственно в данных местах возможно снижение прочности адгезии, а также уменьшение морозоустойчивости покрытия.



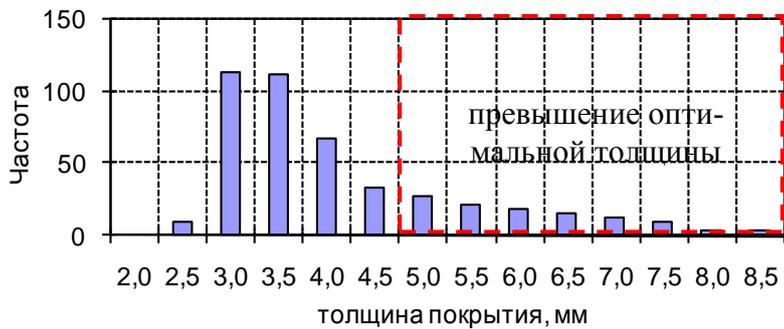
а)

Среднее, мм	3,00
Медиана, мм	2,91
Мода, мм	3,13
Стандартное отклонение, мм	0,49
Дисперсия выборки, мм <sup>2</sup>	0,24
Экссесс	13,84
Асимметричность	2,75
Минимум, мм	2,22
Максимум, мм	6,55
Коэффициент вариации, %	16,45



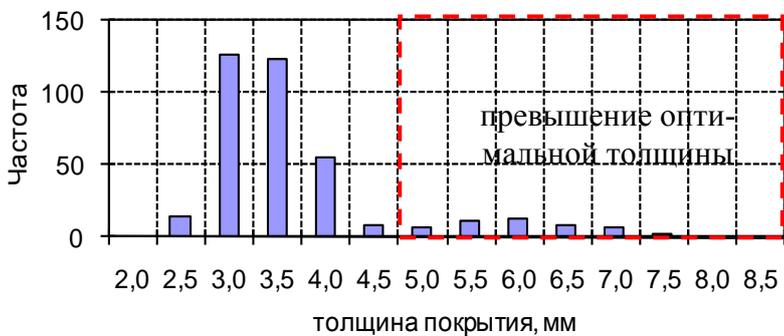
б)

Среднее, мм	3,07
Медиана, мм	3,00
Мода, мм	2,98
Стандартное отклонение, мм	0,37
Дисперсия выборки, мм <sup>2</sup>	0,14
Экссесс	0,03
Асимметричность	0,64
Минимум, мм	2,35
Максимум, мм	4,18
Коэффициент вариации, %	12,21



в)

Среднее, мм	3,89
Медиана, мм	3,43
Мода, мм	3,31
Стандартное отклонение, мм	1,29
Дисперсия выборки, мм <sup>2</sup>	1,68
Экссесс	0,98
Асимметричность	1,29
Минимум, мм	2,30
Максимум, мм	8,43
Коэффициент вариации, %	33,26



г)

Среднее, мм	3,49
Медиана, мм	3,18
Мода, мм	2,90
Стандартное отклонение, мм	1,00
Дисперсия выборки, мм <sup>2</sup>	1,01
Экссесс	3,03
Асимметричность	1,87
Минимум, мм	2,32
Максимум, мм	7,47
Коэффициент вариации, %	28,79

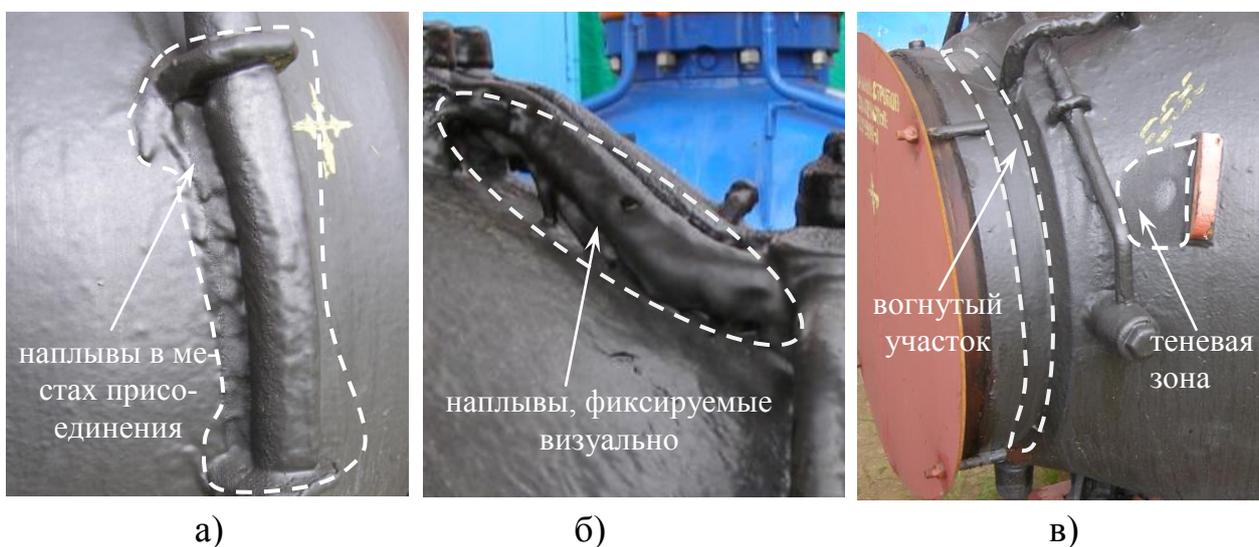
Рисунок 3.31 – Статистические характеристики толщины покрытия тройников:  
а – зона №1; б – зона № 2; в – зона № 3; г – зона № 4

### 3.7 Анализ результатов диагностирования защитных покрытий шаровых кранов

При анализе результатов диагностирования защитных покрытий шаровых кранов отдельно рассматриваются следующие зоны по сечениям:

- корпус шарового крана (зона 1);
- присоединяемые патрубки (зона 2);
- особые конструктивные зоны (опоры корпуса, транспортировочные проушины) (рисунок 3.32).

Измерения проводились не во всех точках контрольных сечений из-за особенностей хранения и геометрии изделий (см. рисунки 3.21, 3.22, 3.33).



а, б, в – дефекты покрытия, фиксируемые визуально

Рисунок 3.32 – Особые конструктивные зоны шаровых кранов



а, б, в – локальные участки покрытия, в которых не были проведены измерения

Рисунок 3.33 – Характерные недоступные для контроля зоны шаровых кранов

По результатам измерений установлено, что на корпусе кранов наблюдаются наплывы покрытия в следующих зонах: верхняя и нижняя части корпуса; участки присоединения опор и иных выступающих частей (см. рисунок 3.32, а).

При этом толщина покрытия в некоторых зонах достигает до 12 мм. Так как коэффициент вариации составляет  $V \approx 33\%$ , то значительная доля площади поверхности покрытия имеет толщину, не соответствующую оптимальному диапазону значений (рисунок 3.34).

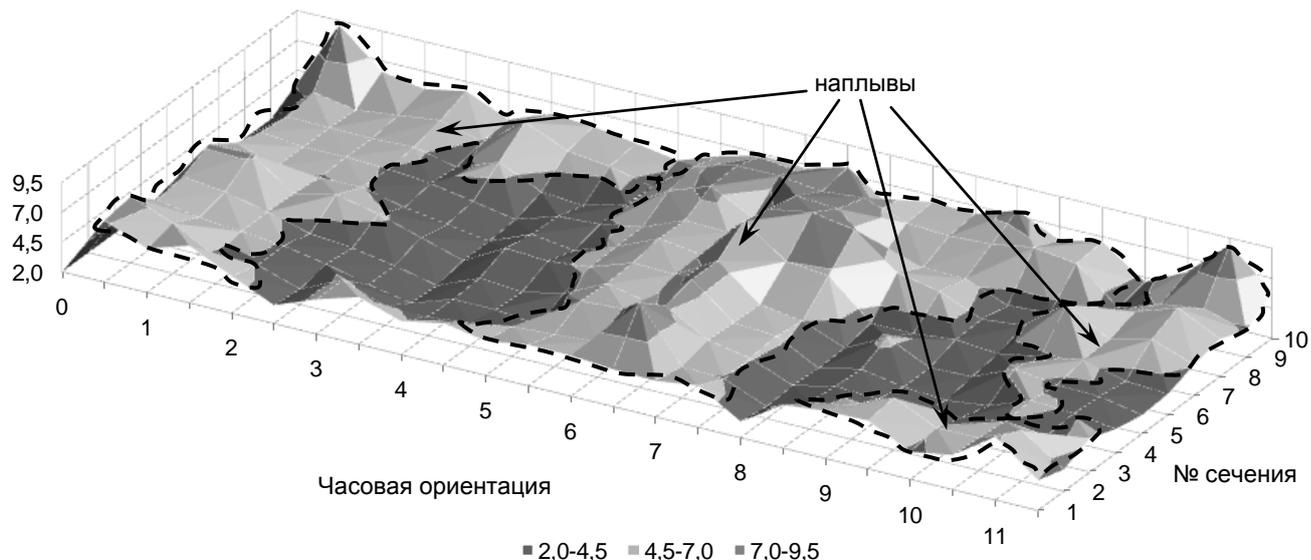
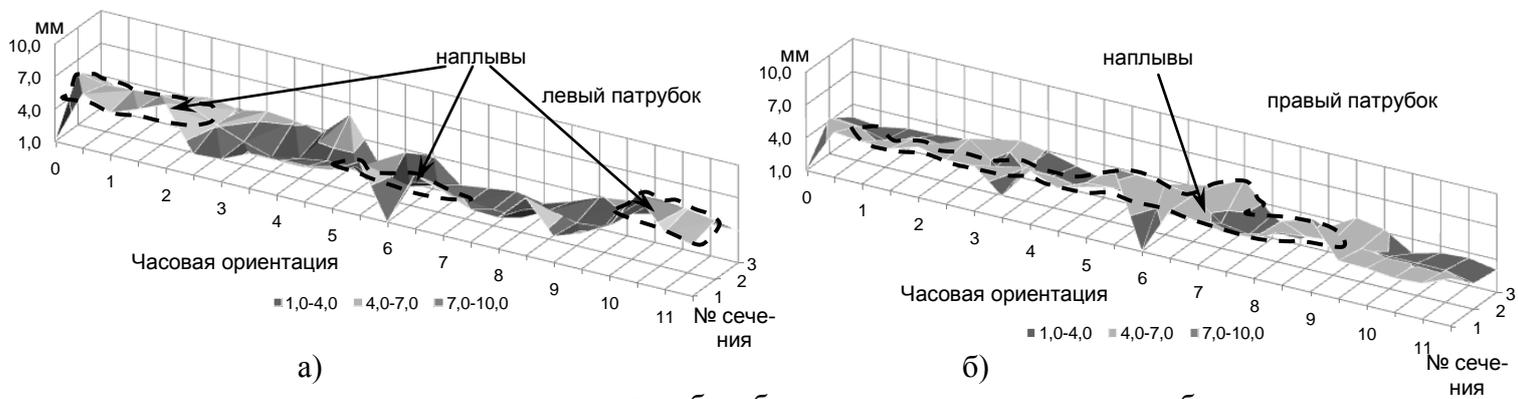


Рисунок 3.34 – Распределение слоя покрытия по поверхности корпуса крана

Установлено, что на присоединяемых патрубках кранов наплывы наблюдаются главным образом в зоне стыка патрубка и корпуса, так как в этом месте присутствует вогнутый участок, в который и стекает покрытие при нанесении (см. рисунок 3.32, в). Так как коэффициент вариации составляет  $V \approx 33\%$ , то значительная доля площади поверхности покрытия имеет толщину, не соответствующую оптимальному диапазону значений. Недостаточная толщина покрытия наблюдалась только на присоединяемых патрубках крана № 1 и составила 2,9 % от измеренных значений (рисунок 3.35).

По результатам измерений установлено, что на всех обследованных кранах в местах присоединения опор корпуса наблюдались наплывы покрытия (рисунок 3.36 а – г).



а – измерения на левом патрубке; б – измерения на правом патрубке  
 Рисунок 3.35 – Распределение слоя покрытия по поверхности присоединяемых патрубков

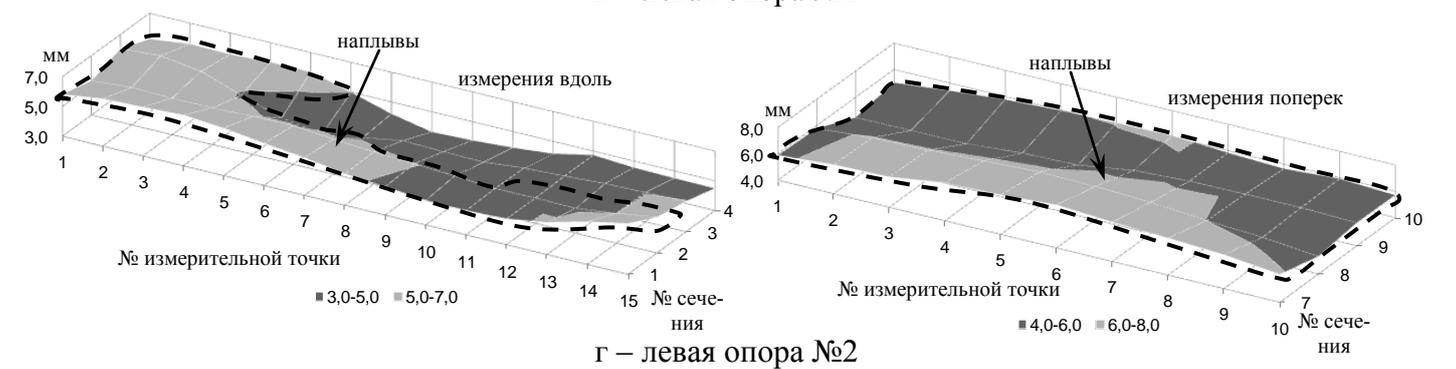
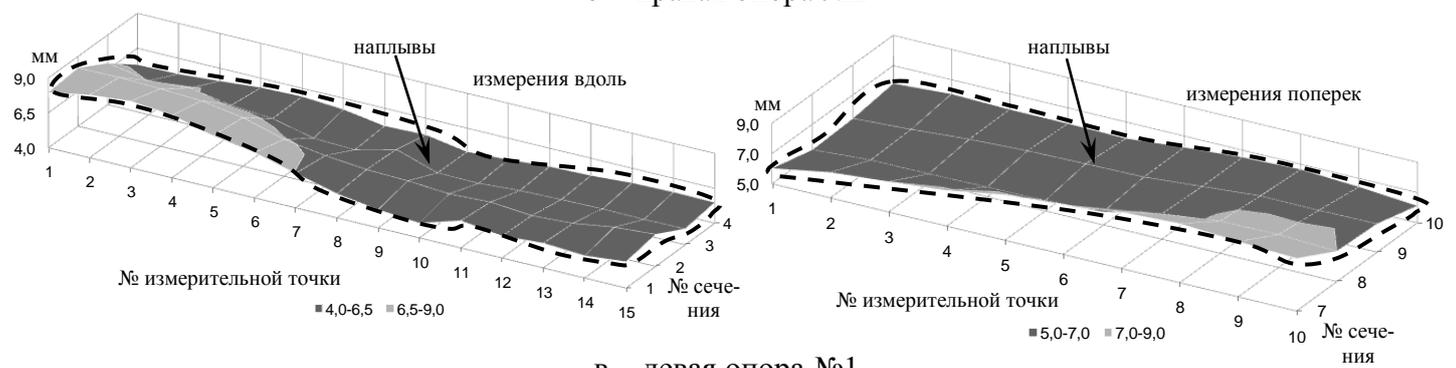
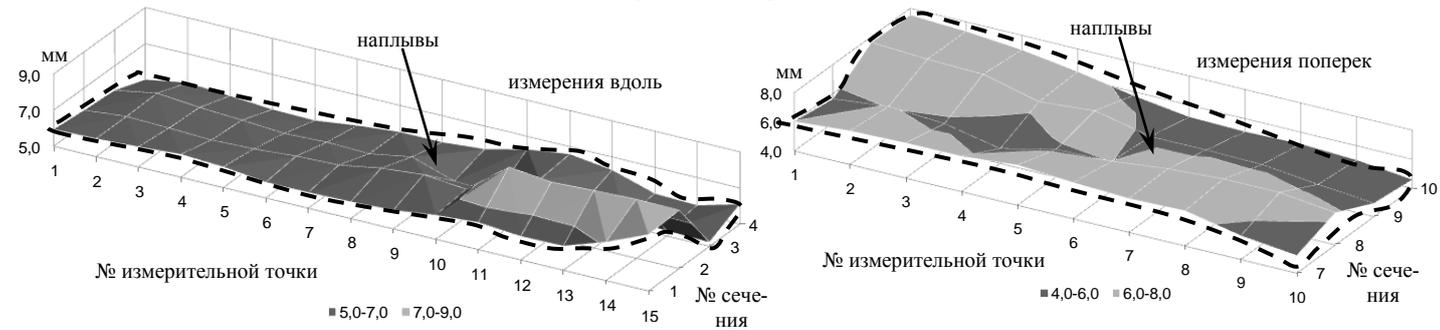
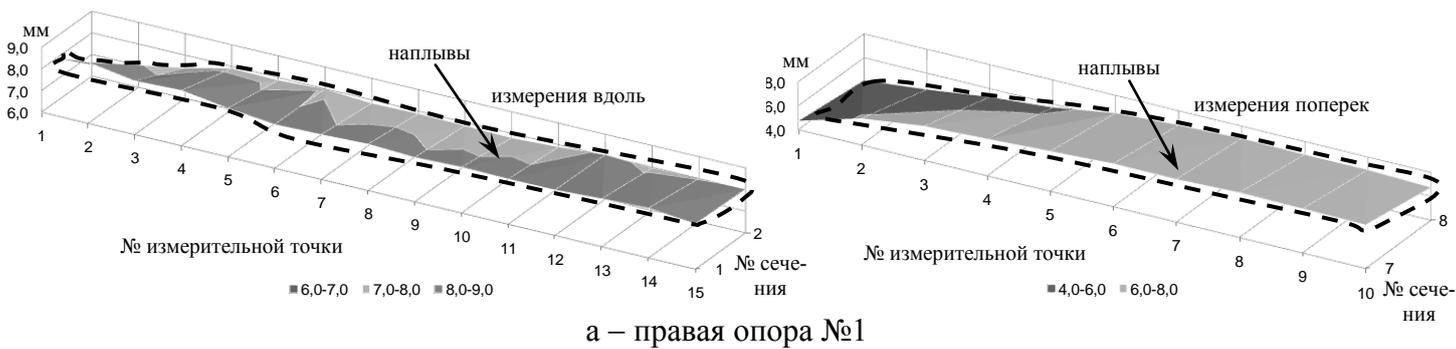
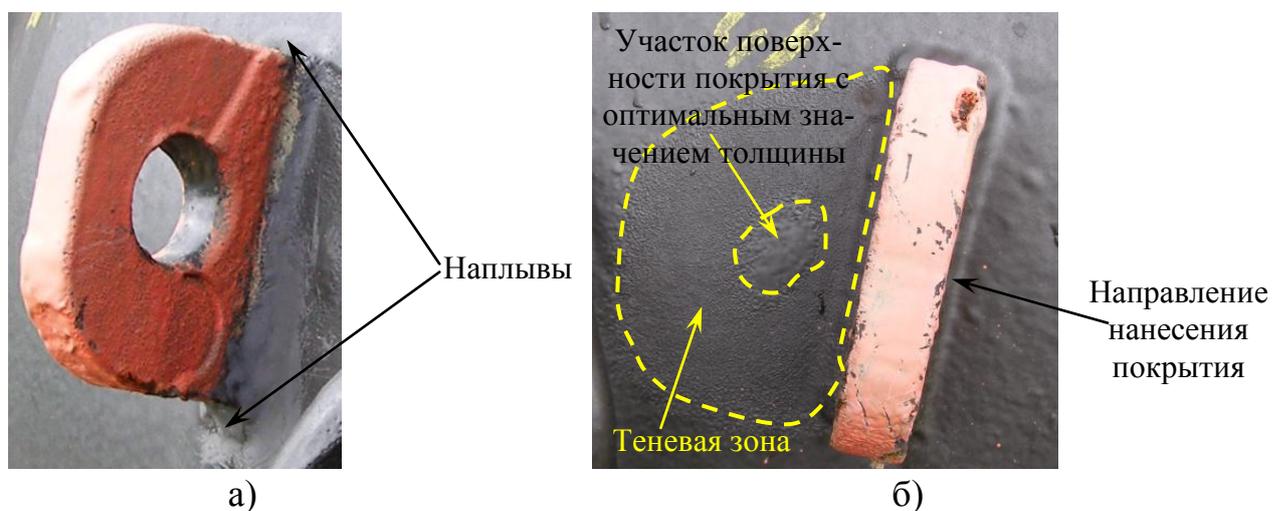


Рисунок 3.36 – Распределение слоя покрытия около опор корпуса

Так как коэффициент вариации составляет  $V \approx 17\%$ , то должна присутствовать равномерность толщины покрытия и наблюдаться незначительное количество наплывов. Однако значительная доля площади поверхности покрытия имеет толщину не соответствующую оптимальному диапазону значений. В ходе анализа (см. главу 1) было установлено, что на опоры корпуса (которые являются ребрами жесткости и, как следствие, имеют недостаточную толщину покрытия) наносятся дополнительные слои покрытия с целью увеличения его общей толщины до оптимальных значений. Поэтому, в местах, расположенных в окрестности опор (зона 3), образовались наплывы.

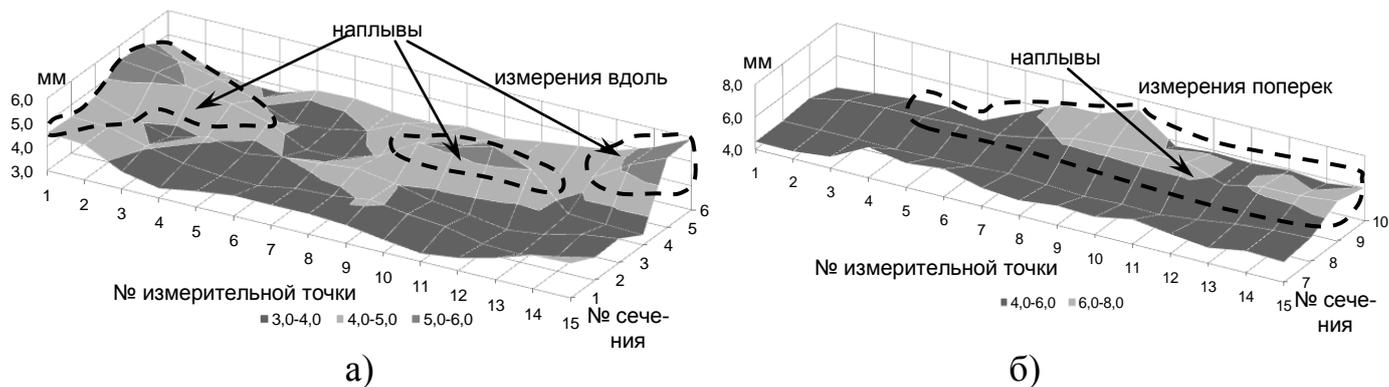
Наплывы расположены около проушин и ориентированы поперек (рисунок 3.37, а, рисунок 3.38). За проушиной образуется теневая зона с недостаточной толщиной покрытия (меньше оптимального диапазона значений) (см. рисунок 3.32, в). Однако из-за сквозного отверстия (конструктивная особенность) при нанесении покрытия в теневой зоне наблюдается участок поверхности покрытия с оптимальным значением толщины (рисунок 3.37, б).

Коэффициент вариации составляет  $V \approx 25\%$ , то некоторая доля площади поверхности покрытия имеет толщину, не соответствующую оптимальному диапазону значений. Количество зон в области проушин, характеризующихся недостаточной толщиной покрытия для каждого изделия, составило: кран № 2 – 0,8 %; кран № 3 – 0,25 %; кран № 4 – 0,25 %.



а – расположение наплывов около проушины; б – теневая зона

Рисунок 3.37 – Особенности распространения наплывов вокруг проушин



а – измерения вдоль; б – измерения поперек

Рисунок 3.38 – Распределение слоя покрытия около проушин

Для всех шаровых кранов неоднородность толщины покрытия примерно одинакова и составляет 31 %. Поэтому, в целом наблюдается недостаточная равномерность нанесения покрытия, процесс нанесения требует дополнительных технологических улучшений. Качество равномерности нанесения покрытия можно характеризовать как удовлетворительное.

На всех контролируемых изделиях толщина покрытия почти соответствует техническим требованиям (не менее 2 мм). Участков с недостаточной толщиной покрытия было зафиксировано малое количество от измеренных значений и соответственно изделия составило: кран № 1 – 0,3 %; кран № 2 – 0,4 %; кран № 3 – 0,1 %; кран № 4 – 0,1 %.

На рисунке 3.39 и в таблице 3.8 представлены итоговые гистограммы распределения толщины покрытия и ее статистические характеристики для каждой зоны кранов.

Таким образом, во всех исследуемых зонах поверхности покрытия шаровых кранов наблюдается значительное отклонение толщины покрытия от оптимального значения (наибольшее наблюдается в зоне опор корпуса и составляет 99 %). Во всех зонах покрытие было нанесено неравномерно, о чем свидетельствует высокое значение коэффициента вариации. Неравномерность является следствием большого количества экранирующих элементов, расположенных по телу корпуса крана.

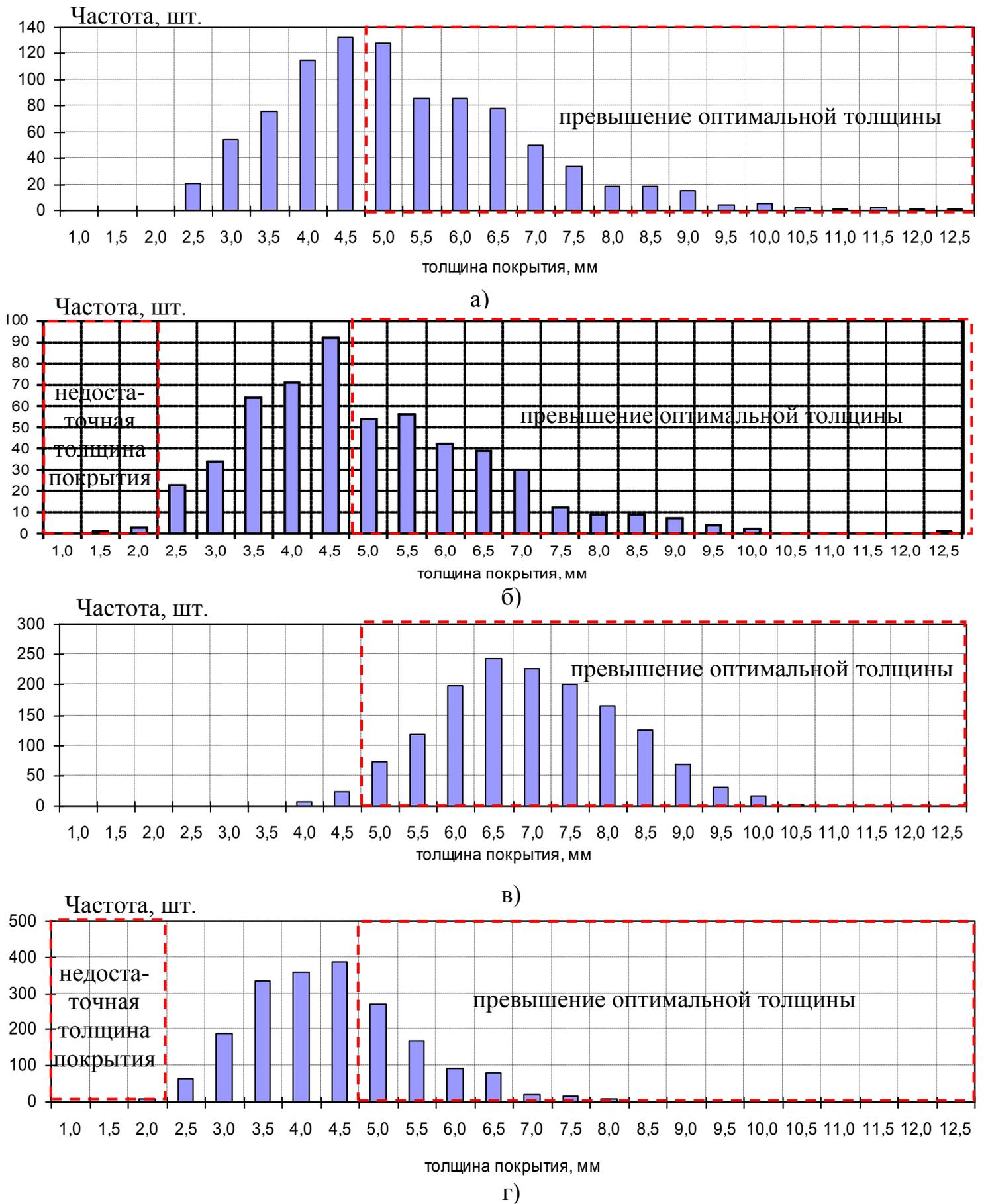


Рисунок 3.39 – Статистические характеристики толщины покрытия кранов:

а – зона №1; б – зона № 2; в – зона № 3; г – зона № 4

Таблица 3.8 – Основные статистические характеристики толщины покрытия шаровых кранов

Статистический параметр	Корпус крана	Присоединяемые патрубки	Транспортировочные проушины	Опоры корпуса
Среднее, мм	5,01	4,74	6,75	4,15
Медиана, мм	4,78	4,41	6,70	4,05
Мода, мм	4,08	4,13	8,00	4,01
Стандартное отклонение, мм	1,61	1,58	1,21	1,06
Дисперсия выборки, мм <sup>2</sup>	2,58	2,49	1,46	1,13
Эксцесс	1,03	0,79	-0,35	0,39
Асимметричность	0,84	0,77	0,14	0,61
Минимум, мм	2,06	1,21	3,54	1,86
Максимум, мм	12,08	12,10	10,47	8,55
Коэффициент вариации, %	32,04	33,29	17,89	25,63

### 3.8 Анализ результатов диагностирования защитных покрытий крутоизогнутых отводов

При анализе результатов диагностирования защитных покрытий отводов отдельно рассматриваются следующие зоны по кольцевым сечениям:

- труба отвода (зона 1);
- зоны сварных швов (зона 2).

Измерения проводились не во всех точках кольцевых (контрольных) сечений из-за особенностей хранения и геометрии изделий (см. рисунки 3.17, 3.18, 3.40).

На поверхностях отводов наблюдаются наплывы покрытия в следующих зонах (рисунок 3.41):

- на кромках покрытия;
- на боковых образующих.



а, б – локальные участки покрытия, в которых не были проведены измерения

Рисунок 3.40 – Зоны отводов, недоступные для контроля:

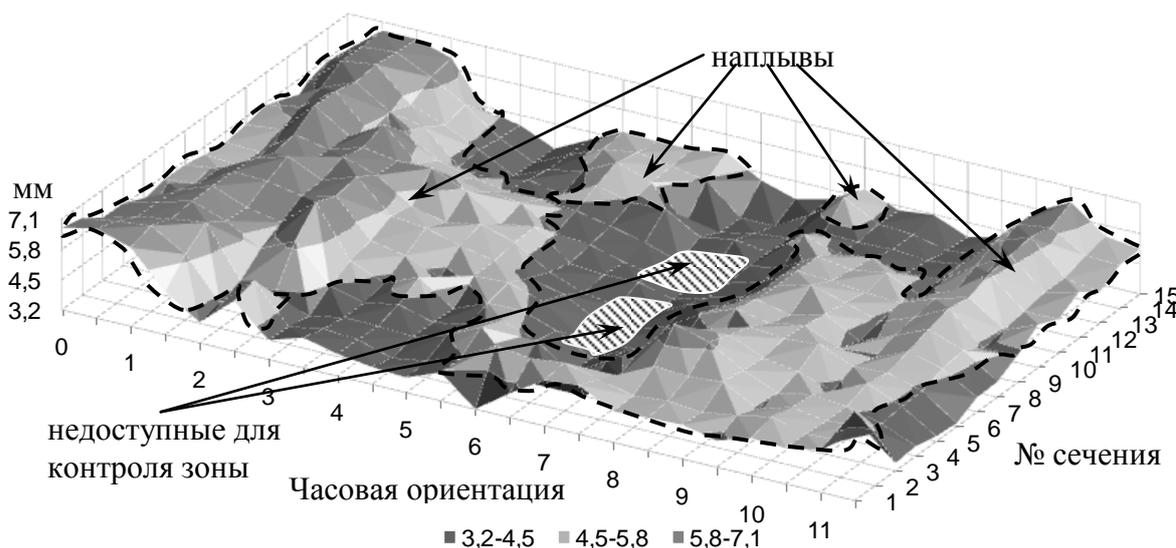


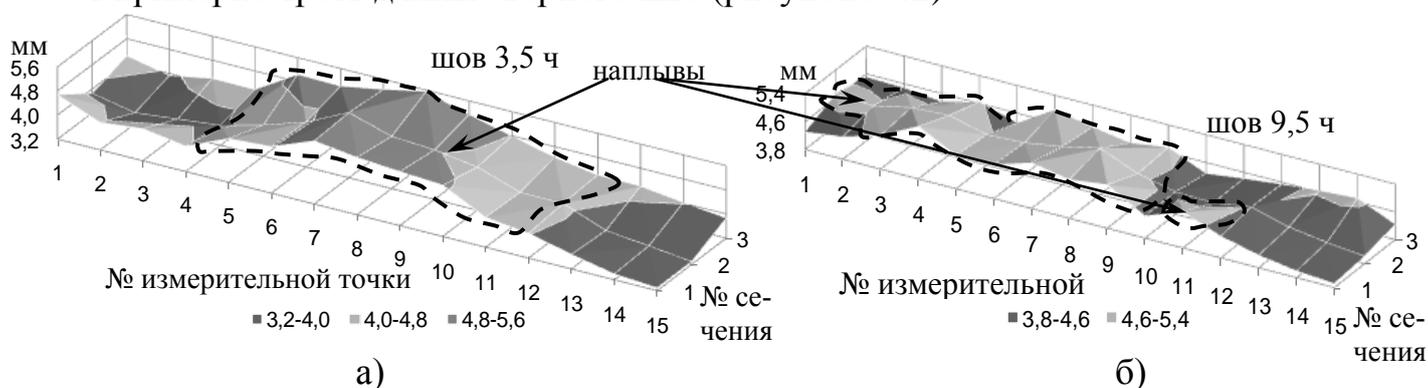
Рисунок 3.41 – Распределение слоя покрытия по поверхности трубы отвода

На кромках покрытия наплывы ориентированы следующим образом: 1 – 2,5 ч; 3,5 – 4,5 ч; 7,5 – 9 ч; 9,5 – 10,5 ч (ориентация часовая). В области изогнутой части отвода характер распространения наплывов неоднороден, зависит от диаметра отвода и от угла изгиба.

Так как коэффициенты вариации  $17\% < V_1 < 33\%$ , то должна присутствовать равномерность толщины покрытия и наблюдаться незначительное количество наплывов. Однако значительная доля площади поверхности покрытия (в особенности на отводе № 1) имеет толщину, не соответствующую оптимально-

му диапазону значений. Поэтому можно сделать вывод о том, что на отвод № 1 были нанесены дополнительные слои покрытия.

В зоне сварных швов наблюдаются наплывы, которые расположены в середине зоны сварного шва в обе стороны. Длина участка с наплывами составляет примерно треть длины сварного шва (рисунок 3.42).



а – измерения на шве 3,5 часа; б – измерения на шве 9,5 часа

Рисунок 3.42 – Распределение слоя покрытия по поверхности сварных швов

Анализ результатов статистической обработки показывает малые значения коэффициентов вариации ( $V \leq 17\%$ ), при которых выборка считается однородной, и, как следствие, можно сделать вывод о равномерности нанесения покрытия. Однако значительная доля площади поверхности покрытия (в особенности на отводах № 1, № 3) имеет толщину, не соответствующую оптимальному диапазону значений.

Таким образом, особенности нанесения и формирования слоя покрытия аналогичны предыдущему случаю, когда наблюдался некий сдвиг диапазона оптимальных значений.

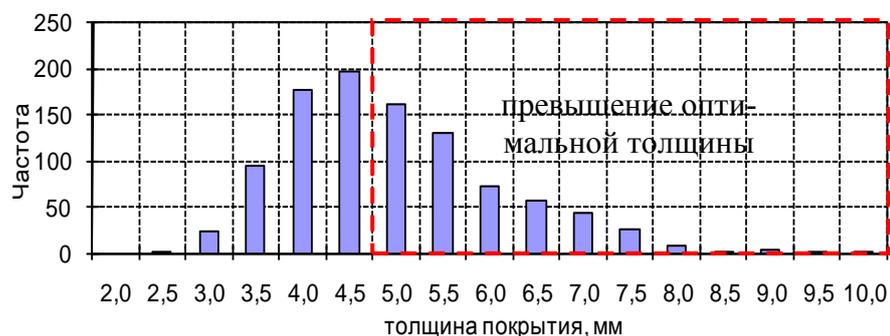
Так как коэффициенты вариации  $17\% < V < 33\%$ , то должна присутствовать равномерность толщины покрытия и наблюдаться незначительное количество наплывов. Однако значительная доля площади поверхности покрытия (в особенности на отводе № 1) имеет толщину, не соответствующую оптимальному диапазону значений. Поэтому можно сделать вывод о том, что на отвод № 1 были нанесены дополнительные слои покрытия.

Для всех продиагностированных отводов наблюдается недостаточная

равномерность нанесения покрытия. Процесс нанесения требует дополнительных технологических улучшений. Качество равномерности нанесения покрытия можно характеризовать как удовлетворительное.

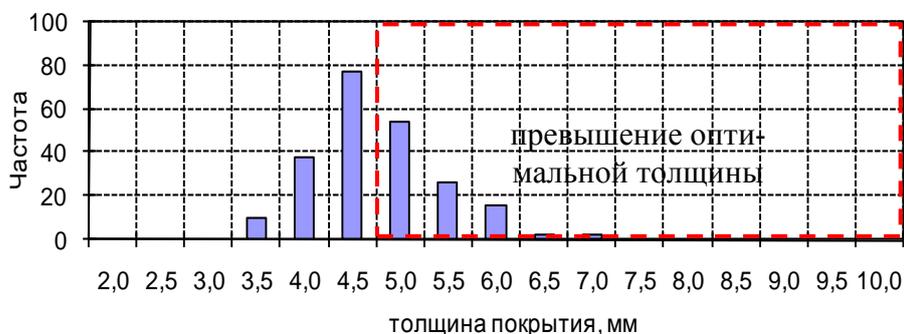
На всех контролируемых изделиях толщина покрытия соответствует техническим требованиям (не менее 2 мм).

На рисунке 3.43 представлены итоговые гистограммы распределения толщины покрытия и ее статистические характеристики для каждой зоны отводов.



Среднее, мм	4,74
Медиана, мм	4,55
Мода, мм	4,38
Стандартное отклонение, мм	1,17
Дисперсия выборки, мм <sup>2</sup>	1,37
Экссесс	1,12
Асимметричность	0,93
Минимум, мм	2,33
Максимум, мм	9,57
Коэффициент вариации, %	24,71

а)



Среднее, мм	4,51
Медиана, мм	4,42
Мода, мм	4,01
Стандартное отклонение, мм	0,66
Дисперсия выборки, мм <sup>2</sup>	0,44
Экссесс	0,56
Асимметричность	0,57
Минимум, мм	3,07
Максимум, мм	6,90
Коэффициент вариации, %	14,71

б)

Рисунок 3.43 – Статистические характеристики толщины покрытия отводов:

а – зона №1; б – зона № 2

Таким образом, во всех исследуемых зонах поверхности покрытия отводов наблюдается значительное отклонение толщины покрытия от оптимальной при малых значениях коэффициентов вариации. При отсутствии различных экранирующих элементов на поверхности отвода, а также наиболее простой геометрической формой среди всех исследуемых фасонных изделий получен-

ные результаты могут быть объяснены избыточным объемом нанесенного изолирующего материала.

### 3.9 Анализ результатов статистической обработки толщины покрытия фасонных изделий

На рисунке 3.44 (а – в) и в таблице 3.9 представлены статистические характеристики толщины покрытия для различных фасонных изделий.

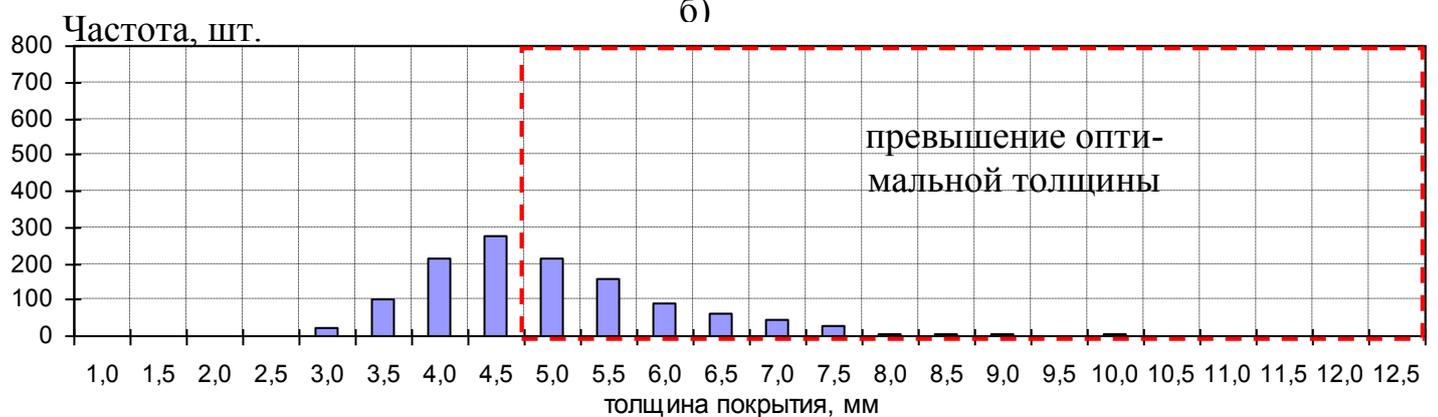
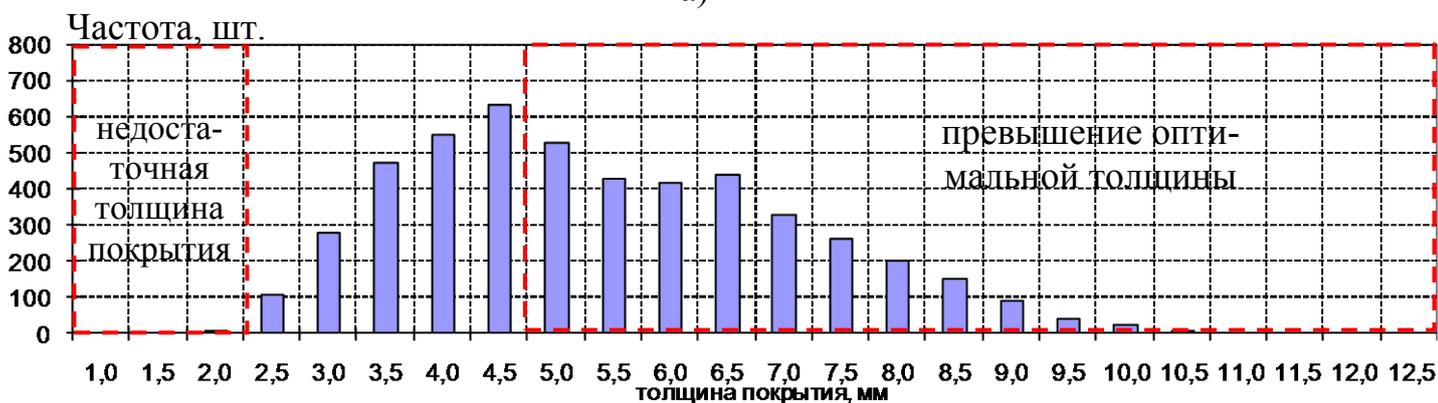
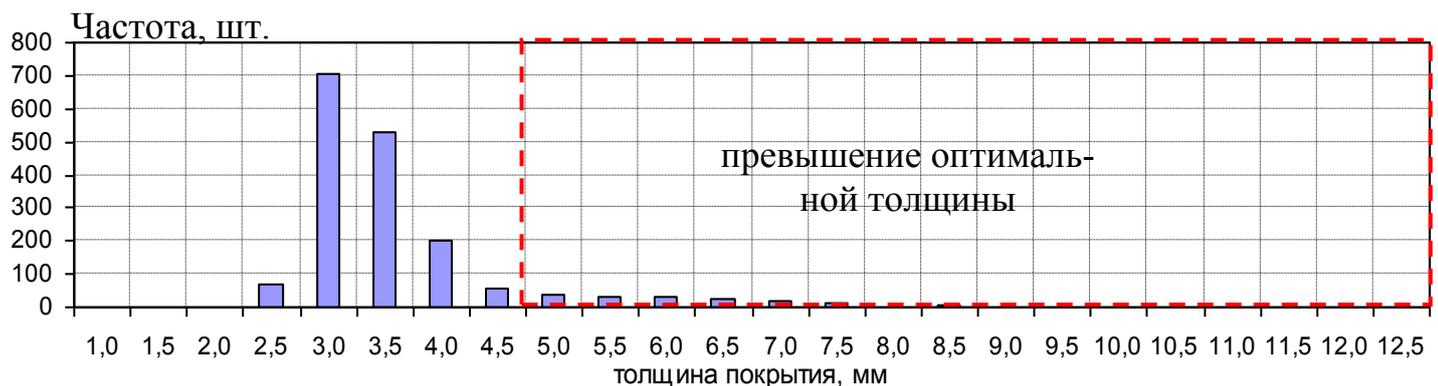


Рисунок 3.44 – Статистические характеристики толщины покрытия:

а – тройников; б – шаровых кранов; в – отводов

Таблица 3.9 – 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
Экцесс	5,82	-0,34	1,56
Асимметричность	2,32	0,48	1,02
Минимум, мм	2,22	1,21	2,33
Максимум, мм	8,44	12,10	9,57
Доля измерений, находящихся вне диапазона оптимальных значений, %	9,74	58,9	49,67

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 3.45).

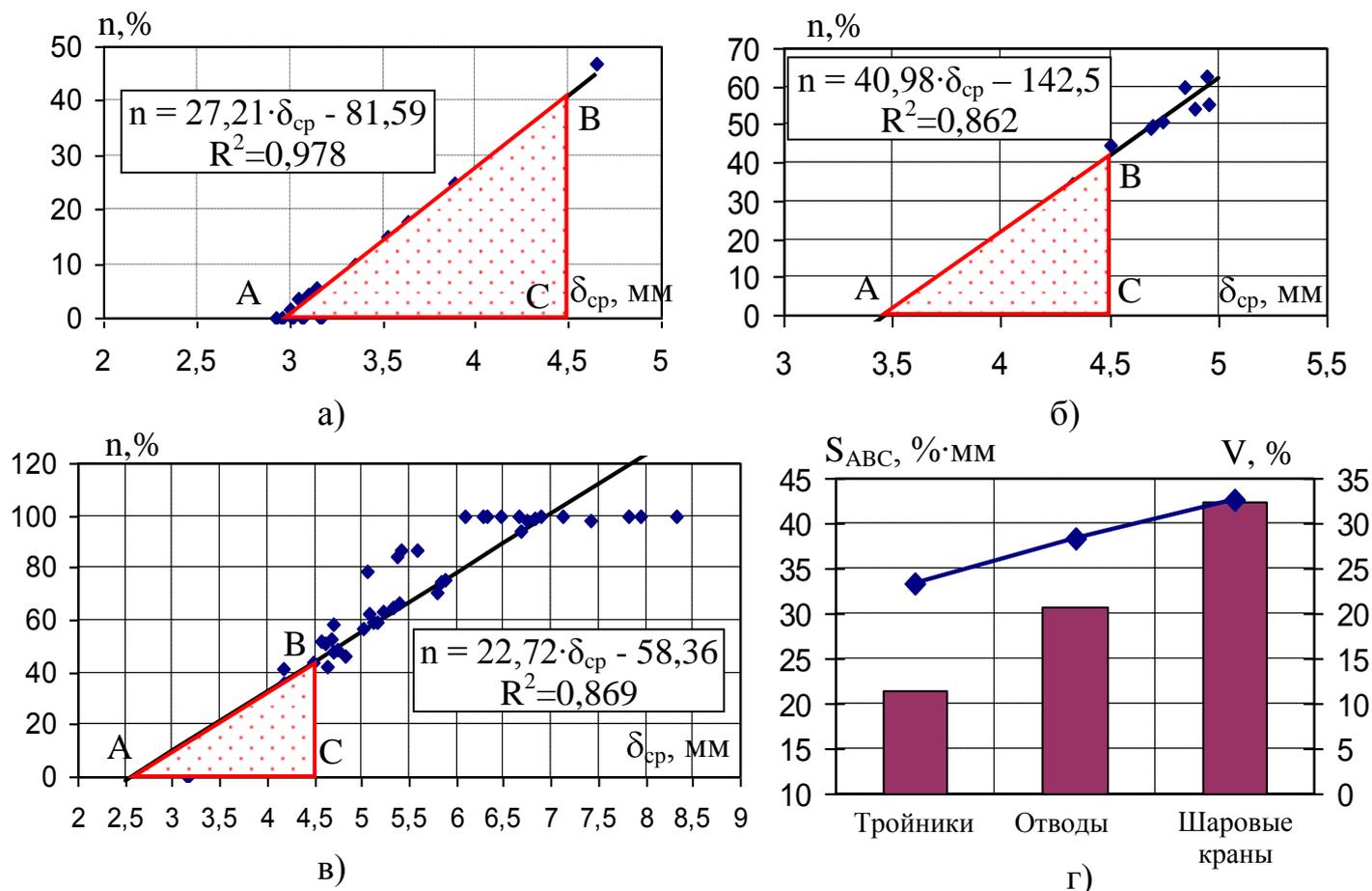


Рисунок 3.45 – Результаты оценки равномерности толщины покрытия: а – тройники; б – отводы; в – шаровые краны; г – общая по изделиям

При равномерном нанесении покрытия величина  $n$  должна равняться 0 при значениях  $\delta_{\text{ср}} = 2 - 4,5$  мм. Однако этого не наблюдается, что подтверждается положительным значением площади  $S_{\text{ABC}}$  (рисунок 3.45, а – в). Зависимость данной площади от неоднородности толщины покрытия имеет следующий вид:  $S_{\text{ABC}} = 2,274 \cdot V - 31,68$  с  $R^2 = 0,991$  (рисунок 3.45, г).

Следовательно, максимально допустимая неоднородность толщины покрытия для фасонных изделий определится из условия  $S_{\text{ABC}} = 0$ . Таким образом, максимально допустимая неоднородность толщины покрытия для фасонных изделий составляет 14%.

На основании статистических параметров толщины покрытия был установлен критерий выбора участков для контроля сплошности на основании балльной системы оценок (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – 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
$\delta_{\text{ср}}$	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 в соответствии с статистическими показателями полученные баллы  $I$  складываются и получается интегральный балл  $\Sigma I$ . Проведение контроля сплошности необходимо, когда  $\Sigma I \geq 3$ . При этом первоочередными для контроля являются участки с наибольшим значением  $\Sigma I$ . Далее представлен анализ толщины покрытия для каждой зоны фасонных изделий.

Результаты измерений для тройников представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – 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 3.11 видно, что проведение контроля сплошности покрытия необходимо в области стыкового соединения и сварного шва. Результаты измерений для запорной арматуры представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – 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 3.12 видно, что проведение контроля сплошности покрытия необходимо по всей поверхности шаровых кранов.

Результаты измерений для отводов представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – 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 3.13 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.

4 Разработка требований к технологии трассового нанесения и ремонта защитного покрытия запорной арматуры и соединительных деталей трубопроводов

4.1 Общие требования к технологии трассового нанесения покрытия на узлы сложной конфигурации

Нанесение защитного покрытия на элементы подземных газопроводов, характеризующихся сложной геометрией поверхности, предполагает проведение подготовительных мероприятий, направленных на обеспечение оптимальных условий работы персонала, а также снижения влияния неблагоприятных факторов, способствующих снижению эксплуатационных характеристик наносимого покрытия. К таким мероприятиям относятся:

- формирование и обустройство траншеи вокруг объекта, на поверхность которого предполагается нанести защитное покрытие;
- применение средств, обеспечивающих требуемое положение устройств распыления относительно поверхностей при нанесении покрытия, а также препятствующих переносу грунта на подготовленные защищаемые поверхности.

Подготовка траншеи при проведении работ по восстановлению или замене защитного покрытия выполняется с учетом следующих требований:

- геометрия рабочих зон должна обеспечивать оптимальное размещение

персонала и оборудования при нанесении подготовленных составов на защищаемые поверхности вне зависимости от их пространственной ориентации;

– в случае обводнения траншеи должны быть реализованы мероприятия, направленные на сбор воды в подготовленных на дне траншеи приемках, с последующим ее откачиванием за пределы траншеи насосами;

– при осыпании стенок траншеи должны быть реализованы мероприятия по их укреплению;

– для удобства работы персонала при наличии на дне траншеи обводненного вязкого грунта рекомендуется укладка на дно деревянных трапов или щитов.

Геометрические характеристики траншеи определяются глубиной заложения объекта, а также его габаритными размерами.

К средствам, обеспечивающим оптимальное расположение средств распыления, относятся различные подставки или подмости, на которых размещается оператор.

Пример выполнения обустройства траншеи при нанесении защитного покрытия на тройник показан на рисунке 4.1. Для тройников и отводов диаметром 530 – 1420 мм выделяются три сектора нанесения покрытия.

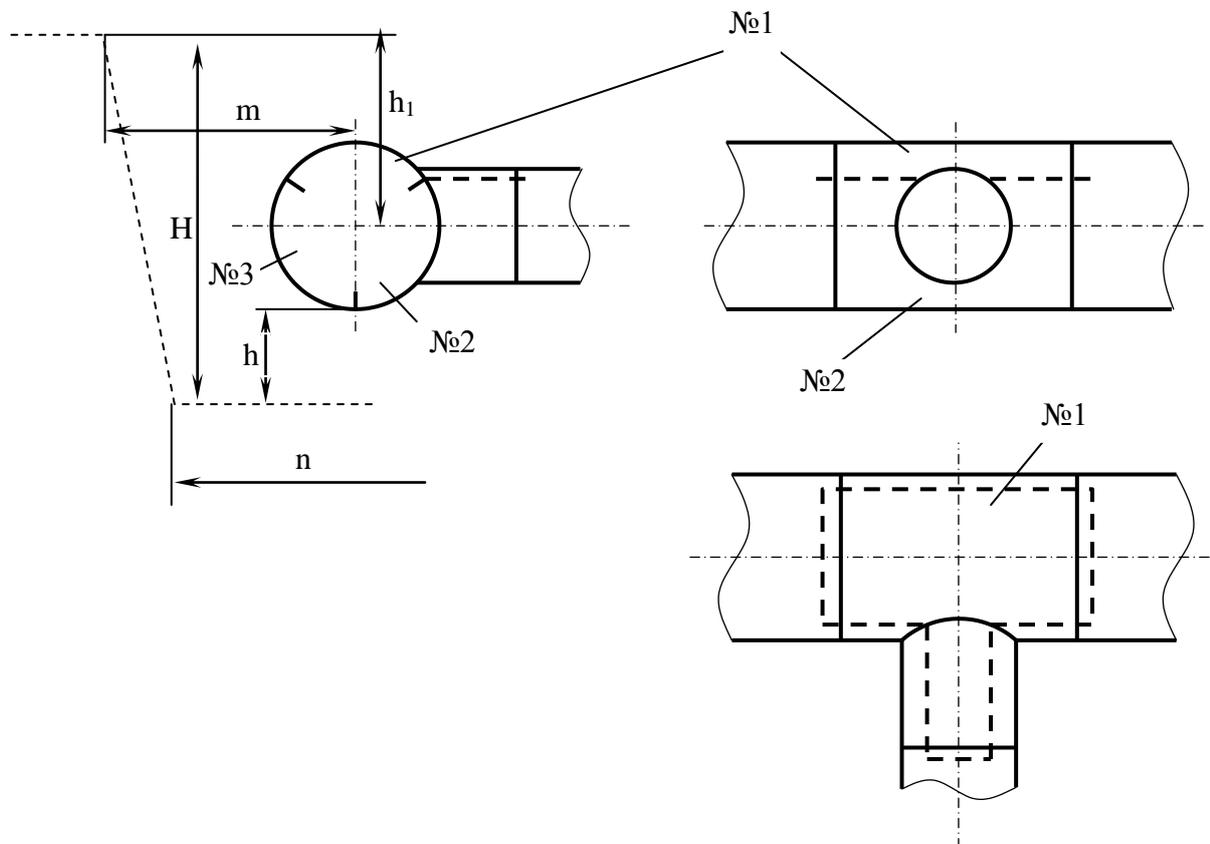
Первый сектор – верхняя образующая трубы между 10 и 2 ч. При нанесении покрытия оператор располагается на подставке или непосредственно на тройнике (отводе).

Второй и третий секторы – боковая-нижняя образующие трубы между 6 и 10 ч, а также между 2 и 6 ч. Нанесение покрытия выполняется со дна траншеи.

При нанесении покрытия на тройники и отводы диаметром менее 530 мм выделяются два сектора нанесения, располагаемые слева и справа от оси газопровода (магистрального патрубка).

На поверхности корпуса шарового крана диаметром 530 – 1420 мм выделяется шесть секторов нанесения (рисунок 4.2). На секторы, расположенные в верхней части крана (№ 1 – № 4), покрытие наносится с подставок или подмостей. На выступающие элементы корпуса (опору, транспортировочные проу-

шины, цапфы) покрытие наносится отдельно от основных поверхностей в пределах назначенных секторов.



$H$  – глубина траншеи;  $h_1$  – расстояние от поверхности земли до оси объекта;  
 $n$  – расстояние от оси объекта до стенки траншеи по линии дна;  
 $m$  – расстояние от оси объекта до стенки траншеи по уровню бровки;  
 $h$  – расстояние от нижней образующей объекта до дна траншеи

Рисунок 4.1 – Схема расположения секторов нанесения защитного покрытия по поверхности тройника

При нанесении покрытия на краны диаметром меньше 530 мм выделяется два сектора нанесения, справа и слева от крана.

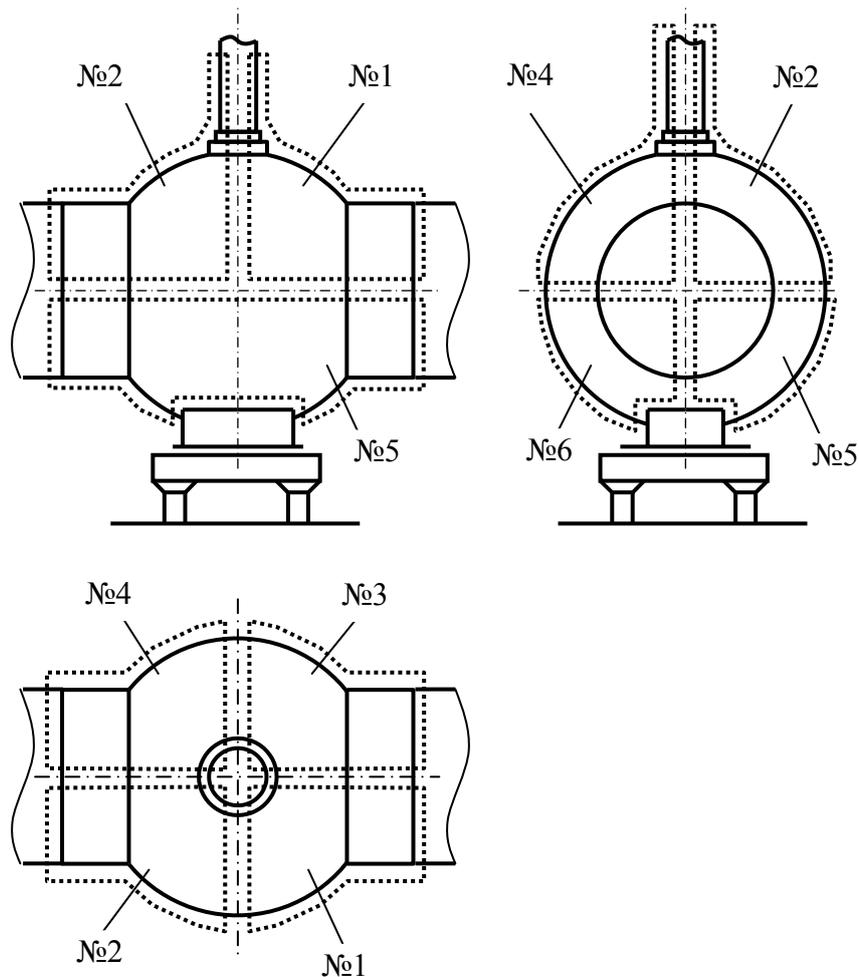


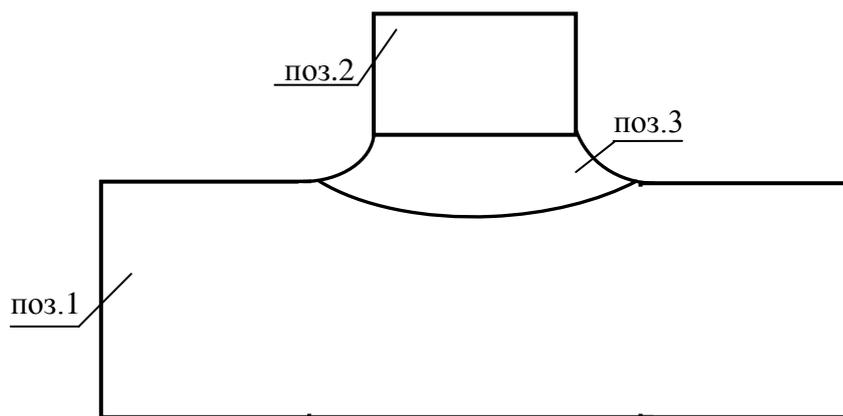
Рисунок 4.2 – Схема расположения секторов нанесения защитного покрытия по поверхности корпуса шарового крана

4.2 Разработка порядка и очередности нанесения покрытия на узлы сложной конфигурации

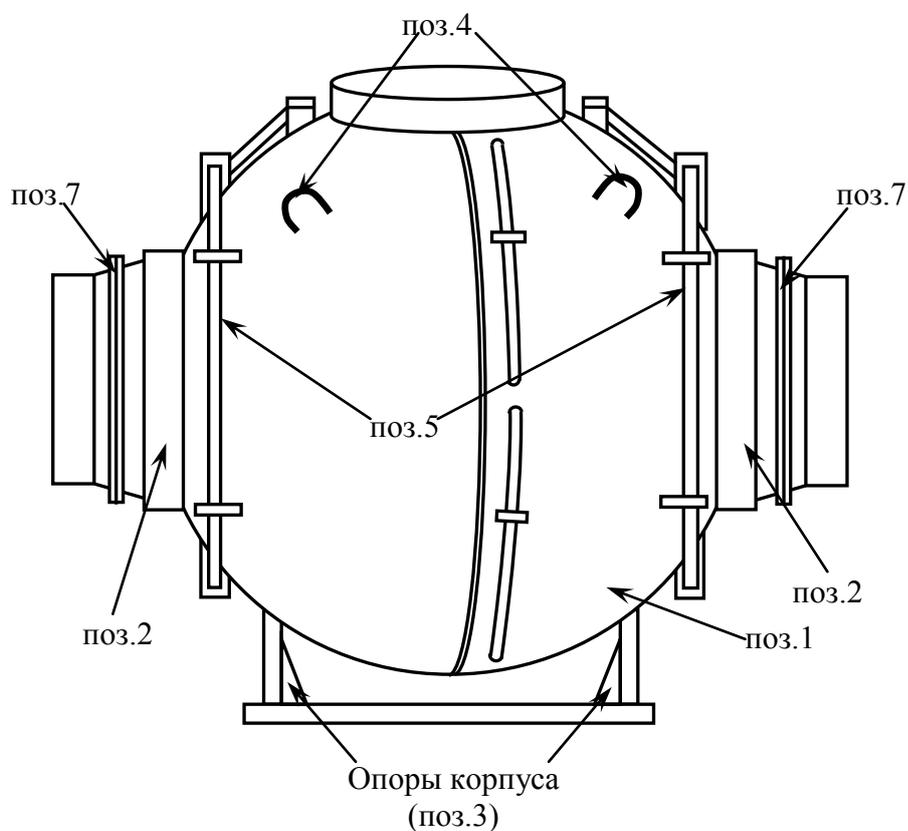
На рисунке 4.3 представлены схемы фасонных изделий.

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 4.1.



а)



б)

Рисунок 4.3 – Общий вид фасонных изделий:  
тройник (а); шаровый кран (б)

Таблица 4.1 – 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

#### 4.3 Оптимизация траектории движения инструмента при нанесении покрытия

Оптимизация траектории движения распылительного инструмента необходима:

- 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  $V$ .

Расстояние между инструментом и металлической поверхностью  $L$  зави-

сит от размера и вида поверхности. К примеру, при нанесении покрытия на ровные цилиндрические поверхности диаметром 1020 – 1420 мм оптимальное расстояние рекомендуется принимать 40 – 50 см.

Если нанесение выполняется на поверхности малых размеров, то величину L следует принимать пропорционально их диаметру.

При нанесении покрытия на поверхности сложной конфигурации и неоднородной формы, величину L следует принимать пропорционально их главному линейному размеру, а также с учетом количества различных выступающих частей.

Если пистолет-распылитель расположен слишком близко к металлической поверхности, то сужается ширина струи и площадь напыления покрытия, и, как следствие, на поверхности изделия образуются потеки покрытия, перекосы слоев. Также возможно, растворяющее влияние покрытия на уже изолированную поверхность. Поэтому необходимо увеличить скорость перемещения инструмента.

Если пистолет-распылитель держать слишком далеко, раздробившиеся капли покрытия могут высохнуть еще до попадания на поверхность, вызывая чрезмерное опыление уже окрашенных поверхностей.

Пистолет-распылитель при движении не должен также описывать большую дугу или быть сильно наклоненным к поверхности распыления. Движение пистолета по дуге вызовет неровную толщину покрытия.

При нанесении покрытия нельзя перемещать пистолет-распылитель волнообразно и петлеобразно. Перемещение пистолета-распылителя следует выполнять движением корпуса и руки, а не кисти.

Пистолет-распылитель должен быть ориентирован под прямым углом к распыляемой поверхности. При перпендикулярном положении пистолета-распылителя покрытие имеет почти одинаковую толщину. Если держать его под углом, то возрастает ширина отпечатка струи покрытия, что приведет к неоднородности его толщины. Также несоблюдение этого правила приводит к появлению полос разного оттенка на покрываемой поверхности.

Нанесение покрытия на изделие следует производить участками, в виде полос, по несколько проходов, нанесенная полоса покрытия должна перекрывать полосу от предыдущего нанесения на 1/3 [59].

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

$$V = \frac{Q}{d\delta} \quad (4.1)$$

где  $\delta$  – толщина покрытия, мм.

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.

В таблице 4.2 представлены каталог и технические характеристики наиболее распространенных сопел.

Таблица 4.2 – Характеристики сопел пистолетов-распылителей

Диаметр сопла, мм	Ширина струи, мм							Расход покрытия, л/мин
	150–200	200–250	250–300	300–350	350–400	400–450	450–500	
0,74	329	429	529	629	729	829	929	3,41
0,79	331	431	531	631	731	831	931	3,90
0,84	333	433	533	633	733	833	933	4,43
0,89	335	435	535	635	735	835	935	4,96
0,99	339	439	539	639	739	839	939	6,17
1,09	343	443	543	643	743	843	943	7,31
1,14	-	445	545	645	745	-	-	8,21
1,19	-	447	547	647	747	-	-	8,93
1,24	-	449	549	649	749	-	-	9,73
1,30	-	451	551	651	751	-	-	10,56
1,35	-	453	553	653	753	-	-	11,36
1,40	-	455	555	655	755	-	-	12,30
1,60	-	463	563	663	763	-	-	16,12
1,65	-	465	565	665	765	-	-	16,77

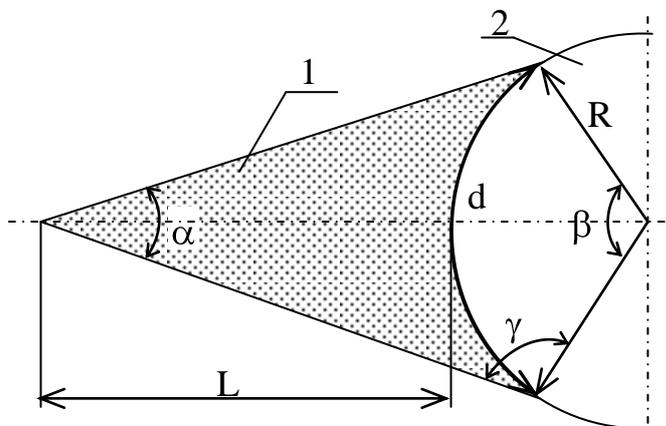
Из таблицы 4.2 выбирается размер сопла, (трехзначное число, указанное в таблице), прикрепленный к грифу сопла.

Например, выбрано сопло с размером 531. Первая цифра 5 указывает на ширину угла струи распыления в угловых градусах. В данном случае –  $50^\circ$ .

Вторые две цифры 31 указывают на диаметр сопла (в тысячных долях дюйма). Диаметр сопла определяет расход материала и, соответственно, количество наносимого на поверхность покрытия. В данном случае диаметр сопла – 0,31 или 0,79 мм [47].

Для труднодоступных элементов фасонных изделий, а также для элементов малого диаметра следует использовать сопла с небольшим углом выхода для того, чтобы обеспечить более равномерное покрытие сложных участков. Для этого имеются сопла с углом до  $20^\circ$ . Необходимо также следить за тем, чтобы отверстие сопла было оптимального размера; это зависит от доли твердых веществ в материале покрытия. Если отверстие распылителя слишком маленькое, то распылитель может засориться. Если используется двусторонний распылитель (поворачивается на  $180^\circ$ ), засор можно просто и быстро удалить разворотом сопла, но резкое прекращение подачи может привести к появлению отложений на рабочей поверхности и образованию слоя покрытия разной толщины [70,75,77].

Ширина полосы покрытия  $d$  определяется согласно схеме на рисунке 4.4.



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

Рисунок 4.4 – Схема нанесения покрытия на криволинейную поверхность

Согласно теореме синусов угол  $\gamma$  составит:

$$\frac{R}{\sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{L+R}{\sin \gamma} \Rightarrow \gamma = \arcsin \left( \frac{L+R}{R} \sin \frac{\alpha}{2} \right). \quad (4.2)$$

Угол  $\beta$  составит

$$\beta = 360 - 2\gamma - \alpha. \quad (4.3)$$

Ширина полосы покрытия  $d$  составит

$$d = \frac{\pi R \beta}{180}. \quad (4.4)$$

В таблице 4.3 представлено соответствие размеров элементов фасонных изделий характеристикам распылительного инструмента.

Таблица 4.3 – 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 (транспортровочные 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

#### 4.4 Требования к технологии нанесения покрытия на криволинейные поверхности деталей и узлов сложной конфигурации

Фасонные изделия обладают сложной развитой поверхностью, имеющей различные многочисленные экранирующие элементы (острые кромки, вогнутые зоны, застойные участки), которые препятствуют равномерному распределению покрытия.

При проведении работ изоляции фасонных изделий отмечается большая неравномерность толщины покрытия на различных участках изделия (минимальная толщина – на острых кромках, ребрах жесткости, в зонах сварных швов; максимальная – на вогнутых участках, в застойных зонах).

Поэтому при нанесении покрытия на изделия сложной конфигурации процесс нанесения покрытия следует начинать с наиболее труднодоступных участков, а затем равномерно покрывать остальную поверхность изделия.

Однако равномерное нанесение покрытия на ребра жесткости и вогнутые участки фасонных изделий осуществляется с трудом при помощи распылительной установки. Поэтому предварительно следует обрабатывать данные места кистью.

Перечень участков поверхности фасонных изделий, в которых происходит образование наплывов и потеков (с учетом рисунка 4.3) представлен в таблице 4.4.

Таким образом, необходимо, прежде всего, контролировать толщину покрытия в указанных зонах.

Нажатием спускового механизма (курка), оператор включает пистолет-распылитель и управляет количеством материала, проистекающего из сопла, поэтому оператор должен знать, как правильно использовать этот режим работы, чтобы достигнуть самой эффективной техники распыления

Варианты перемещения пистолета-распылителя при напылении покрытия приведены в таблице 4.5.

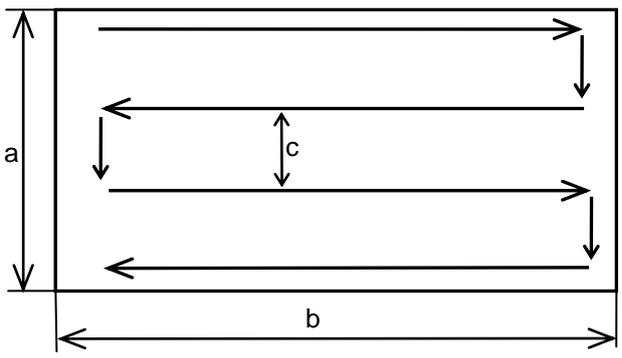
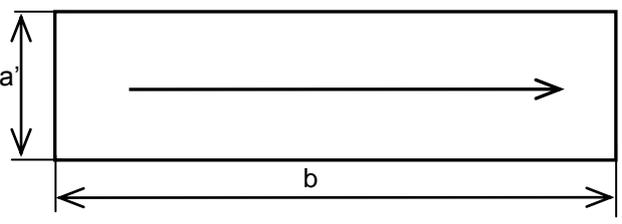
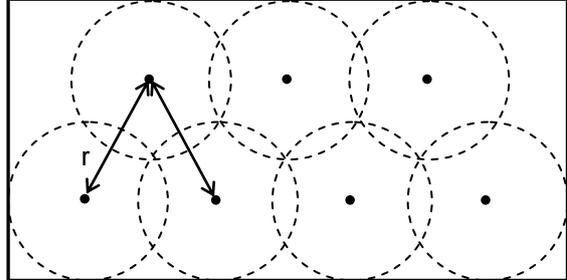
Таблица 4.4 – Участки поверхности фасонных изделий, склонные к образованию наплывов покрытия

Наименование изделия	Участки поверхности фасонных изделий, склонные к образованию наплывов
Тройник (рисунок 4.3, а)	Участок поверхности корпуса (поз.1), расположенный между 1 – 2 ч; 5 – 7 ч; 10 – 11 ч
	Участок поверхности штуцера (поз.2), расположенный между 1 – 2 ч; 10 – 11 ч
Шаровый кран (рисунок 4.3, б)	Участок поверхности корпуса крана (поз.1), расположенный между 4,5 – 7,5 ч, а также между часами 10,5 – 1,5 ч
	Участок поверхности корпуса крана, расположенный около присоединяемых патрубков, а также зона стыка патрубков и корпуса (поз.2), являющаяся вогнутым участком
	На расстоянии 10 см от места присоединения опор (поз.3) по поверхности корпуса
	На расстоянии 10 см от места присоединения транспортировочных проушин (поз.4) по поверхности корпуса
	Зона присоединения стойки привода (поз.6)
Отвод	Участок поверхности отвода, расположенный между 11 – 1,5 ч
	Вдоль по телу отвода на расстоянии 50 см от кромки покрытия. Наплывы в основном расположены между: 1 – 2,5 ч; 3,5 – 4,5 ч; 7,5 – 9 ч; 9,5 – 10,5 ч
	Изогнутый участок (колесо) отвода
	Середина зоны сварного шва (поз.2) в обе стороны на расстояние 2 см. Длина участка с наплывами составляет примерно треть длины сварного шва

Покрытие на изделие следует наносить за несколько проходов. Количество проходов определяется размерами и формой поверхности изделия. Для того чтобы не образовывалось потеков и для нанесения покрытия равномерной толщины, рекомендуется производить 5 – 10 проходов при нанесении каждой очередной полосы. Количество проходов зависит от опыта маляра, площади покрытия, диаметра

сопла форсунки.

Таблица 4.5 – Траектория перемещения пистолета-распылителя при напылении покрытия

Траектория нанесения покрытия методом безвоздушного горячего распыления	Схема перемещения
<p>Продольно-поперечные движения следует применять при нанесении покрытия на цилиндрические поверхности. Размеры <math>a</math> и <math>b</math> следует принимать для удобства ручной досягаемости человека (оптимальные размеры <math>a_{\text{опт}}</math> и <math>b_{\text{опт}}</math> для поверхностей диаметром 1020 – 1420 мм составляют примерно 50 – 90 см, в иных случаях принимаются пропорционально размерам рабочей поверхности). Шаг нанесения <math>c</math> зависит от ширины полосы покрытия <math>d</math> и должен обеспечивать требуемый уровень перекрытия полос</p>	
<p>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</p>	
<p>Точечные движения следует применять при нанесении покрытия на ажурные изделия, а также 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 %</p>	

Для того чтобы обеспечить требуемый уровень прочности адгезии, покрытие следует наносить не одним слоем требуемой толщины, а

несколькими тонкими слоями. Слой большой толщины и массы имеет высокий запас потенциальной энергии, которая по мере отвердевания преобразуется в кинетическую, тем самым способствуя произвольному перемещению и растеканию покрытия по поверхности фасонных деталей. При достижении боковых образующих трубного узла нарушается сплошность слоя покрытия под действием сил тяжести (уменьшается сила сцепления), и верхние слои покрытия образуют потеки на боковых поверхностях и на нижних частях изделий.

Кроме того, для достижения оптимального результата имеют значение рабочее давление и температура наносимого материала. Если рабочее давление слишком высокое, то наносимый материал настолько сильно распыляется, что увеличивается вероятность образования аэрозолей, в результате чего возрастают потери материала покрытия, т.е. для обработки определенной площади требуется большее количество покрытия. Слишком низкое рабочее давление приводит к неполному распылению, в результате капли покрытия случайно падают на обрабатываемую поверхность, что не позволяет получить ровную и гладкую окрашенную поверхность.

Температура наносимого материала влияет на его вязкость. При использовании покрытий со слишком большой вязкостью поверхность нанесенного покрытия получается складчатой и неровной. Покрытия с малой вязкостью могут привести к деформации слоя или образованию наплывов из-за недостаточной вязкости.

Кроме того, использование слишком разбавленных покрытий приводит к получению слоев меньшей толщины. В результате этого могут потребоваться дополнительное нанесение покрытия для получения слоя необходимой толщины.

Также дополнительной рекомендацией по оптимизации процесса нанесения покрытия является использование армирующих материалов и наполнителей. Армирующие материалы представляют собой сетку, с толщиной прутков решетки 70 – 80 % от требуемой толщины покрытия.

Материал сетки – стеклоткань или стекловолокно. При нанесении покрытие заполняет ячейки сетки, а излишнему перемещению покрытия препятствуют прутья сетки.

Армирующие наполнители изменяют текстуру покрытия, меняя тем самым его пластические и механические свойства. Покрытие при этом быстрее отвердевает в состоянии покоя.

#### 4.5 Требования к технологии нанесения покрытия особых труднодоступных участков деталей и узлов

В таблице 4.6 представлен характер движения пистолета-распылителя для участков поверхности фасонных изделий.

Таблица 4.6 – 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	Поверхность отвода
Продольные движения	Стыковое соединение корпуса и штуцера	Транспортировочные проушины, ребра жесткости, опоры корпуса, стык корпуса крана и присоединяемых патрубков, линии импульсного газа	-
Точечные	-	Транспортировочные проушины, ребра жесткости, опоры корпуса, стык корпуса крана и присоединяемых патрубков	-

При нанесении покрытия на внутренние углы сопряженных поверхностей следует каждую сторону угла окрашивать отдельно. После проведения первого вертикального прохода рядом с углом, последующими горизонтальными движениями следует окрашивать основные поверхности поочередно справа и слева, стараясь не заходить в уже окрашенные зоны смежной поверхности.

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 4.5.

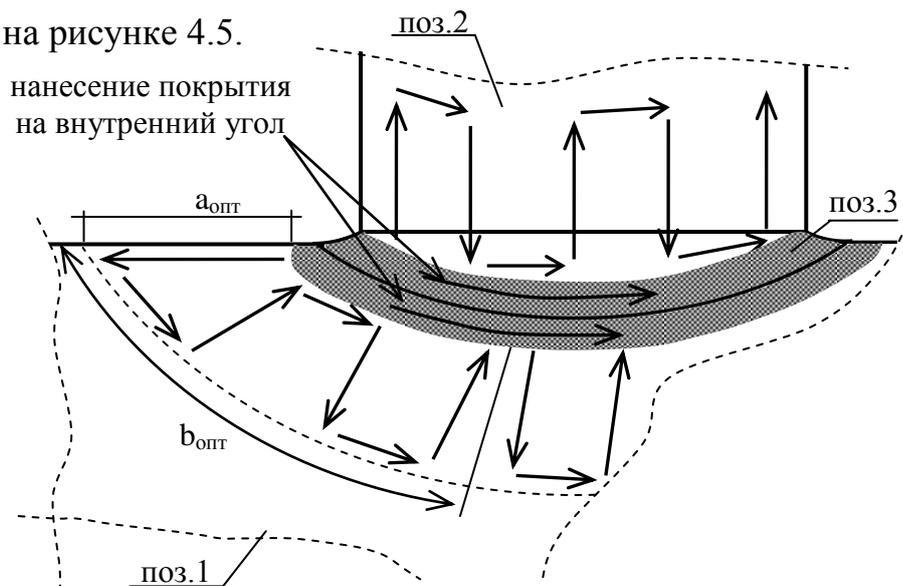


Рисунок 4.5 – Нанесение покрытия на стыковое соединение корпуса и штуцера

На транспортировочную проушину покрытие следует наносить в два этапа (рисунок 4.6, 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).

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 4.6, а).

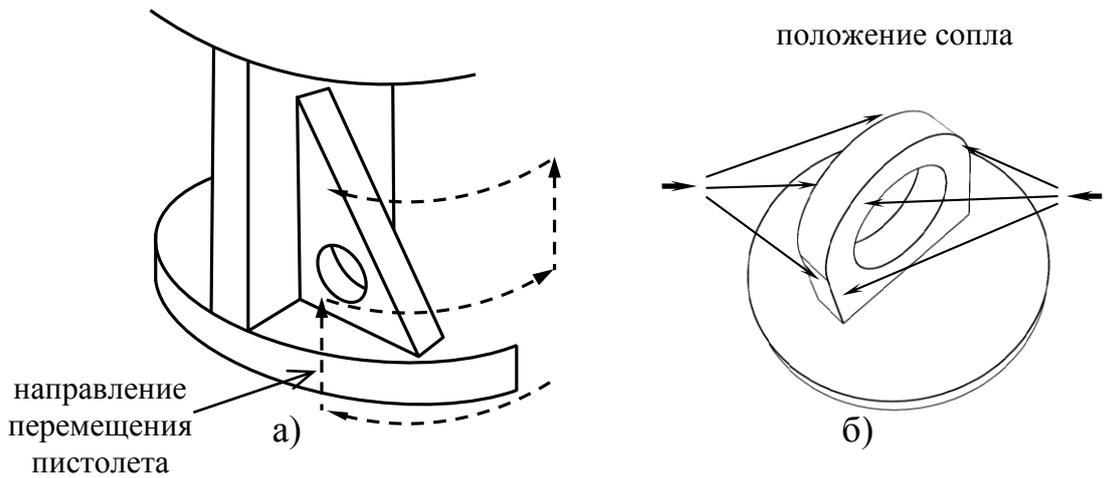


Рисунок 4.6 – Схема нанесения покрытия на опору корпуса (а) и транспортировочную проушину (б)

Нанесение покрытия в области стыка корпуса крана и присоединяемых патрубков следует выполнять продольными движениями (рисунок 4.7, а). Таким же методом следует наносить покрытия на ребра жесткости (рисунок 4.7, б).

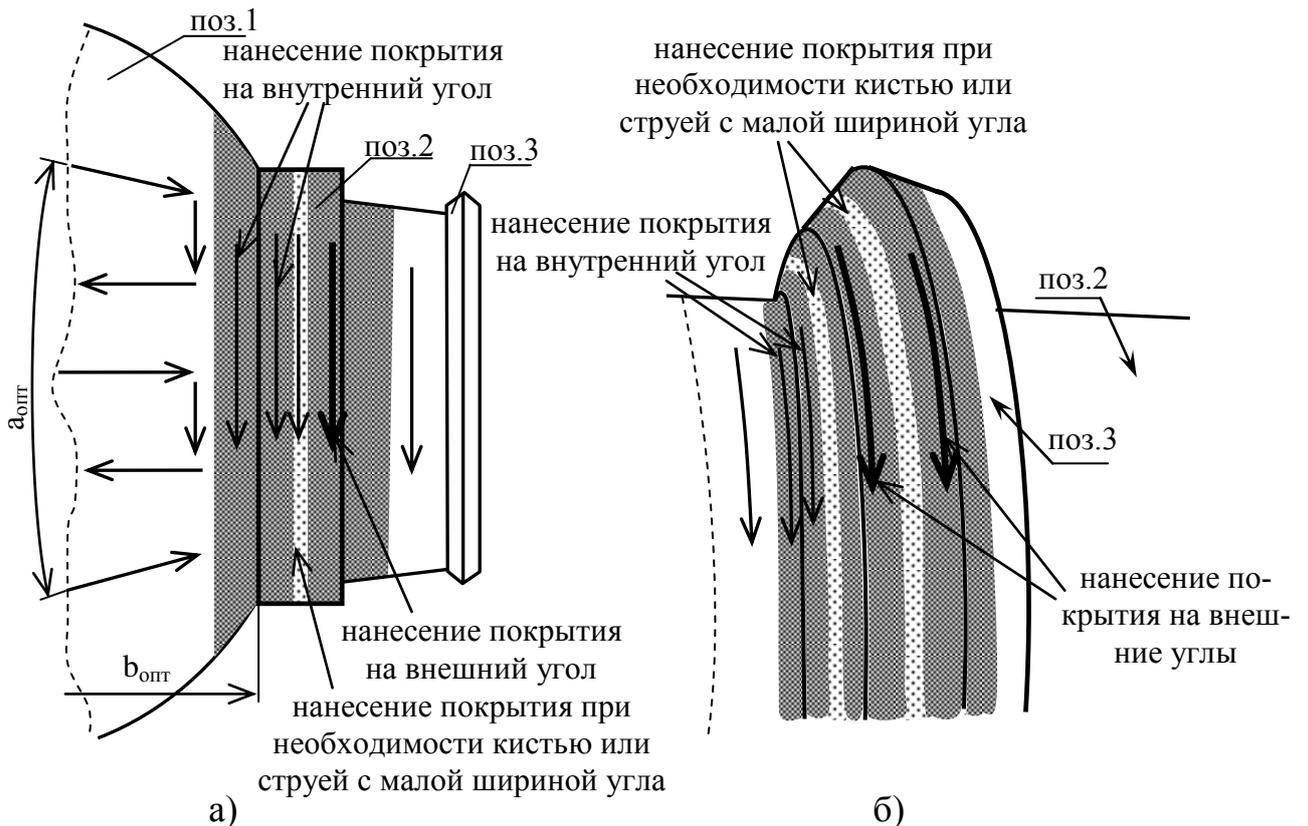


Рисунок 4.7 – Нанесение покрытия на отдельные элементы шарового крана: стык корпуса крана и присоединяемые патрубки (а); ребро жесткости на присоединяемом патрубке (б)

Наносить покрытия на линии импульсного газа шарового крана следует вертикальными проходами пистолета-распылителя в два этапа, чтобы получить полное покрытие (рисунок 4.8, а, б). Чтобы избежать потеков или перекосов слоев, рекомендуется увеличить скорость прохода пистолета-распылителя. Также допускается наносить покрытие вручную кистью на труднодоступные участки (рисунок 4.8, б).

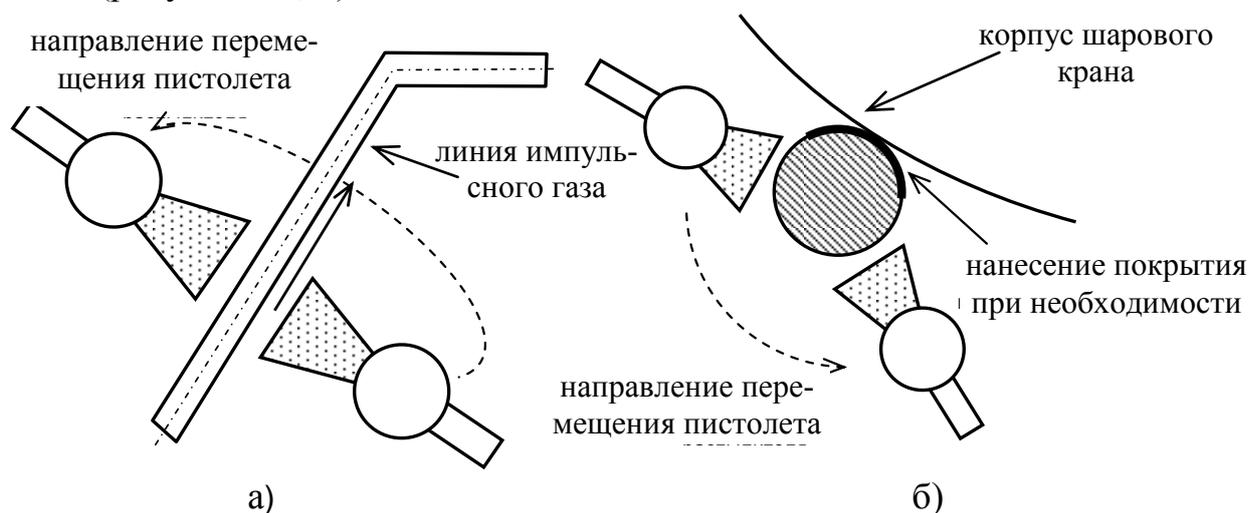


Рисунок 4.8 – Нанесение покрытия на линии импульсного газа:  
общий вид (а); поперечное сечение (б)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований сделаем следующие 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 избирательным 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.П. Ларьков, О.И. Парамонов Защитные свойства покрытия усиленного типа «Кортекор – 867» для изоляции подземной трубопроводной арматуры, эксплуатирующейся в условиях Сибири и регионов Крайнего Севера // Арматуростроение – 2013. – № 1(82) – С. 53 – 57.
2. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. – М.: Высш. шк., 2000. – 560 с.
3. Алешин Н.П. Физические основы акустических методов контроля. – М.: Изд-во. МВТУ, 1986. – 44 с.
4. Алямовский А.А. SolidWorks/Cosmos Works. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК, 2004. – 432 с.
5. Ангалев А. М., Зарицкий С. П., Перов С. Л., Стрельцов С. А., Якубович В. А. Методы и приборы определения напряжений в трубопроводах технологического газа компрессорных станций: Обз. Инф. Сер.: Транспорт и подземное хранение газа. – М.: ООО “ИРЦ Газпром”, 2004. – 61 с.
6. Антикоррозионное полиуретановое покрытие усиленного типа «Кортекор-867», эксплуатирующееся в районах Крайнего Севера А.П. Ларьков ООО «КОРТЕКОР ГРУПП» // Коррозия территории НЕФТЕГАЗ, 2012. – №1 (21) – с. 34 – 36.
7. Аппен А.А. Температуроустойчивые неорганические покрытия. Изд. 2-е, пер. и доп. Л. «Химия», 1976. – 296 с.
8. Бартнев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
9. Бартнев Г.М., Бартнева А.Г. Релаксационные свойства полимеров. – М.: Химия, 1992. – 382 с.
10. Бартнев Г.М., Зеленев Ю.В. Физика и механика полимеров. – М.: Высшая школа, 1983. – 392 с.
11. Бартнев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров. – Л.: Химия, 1990. – 432 с.

- 12.Басин В. Е. Адгезионная прочность. М.: Химия, 1981. – 208 с.
- 13.Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с., ил.
- 14.Белостоцкий А.М., Малявин В.П., Дикарев А.И. и др. Экспериментальные и численные исследования напряженного состояния тройниковых соединений при действии моментных нагрузок // Сборник трудов МИСИ им. В.В. Куйбышева. – 1982. – № 188. – С. 35 – 49
- 15.Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 560 с.
- 16.Бокшицкий М.Н. Длительная прочность полимеров. – М.: Химия, 1978. – 312 с.
- 17.Борисов Б.И. Защитная способность изоляционных покрытий подземных трубопроводов. – М.: Недра, 1987. – 123 с.
- 18.Бурденков Г. А., Булатова Е. Г., Карбань О. В. Дисперсионные кривые моды  $a_0$  в тонких пластинах // Дефектоскопия. – 1991. – №11. – С. 35 – 38.
- 19.Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. – М.: АСВ, 1995. – 572 с.
- 20.Временный регламент приемки качества антикоррозионного покрытия запорной арматуры, нанесенного в заводских условиях, для объектов капитального строительства магистральных и технологических газопроводов ОАО «Газпром» – М.: ИРЦ «Газпром», 2010. – 23 с.
- 21.ВСН 008 – 88 Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Противокоррозионная и тепловая изоляция – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 59 с.
- 22.Гарбер Ю.И. Работоспособность противокоррозионных покрытий подземных трубопроводов – М.: ВНИИОЭНГ, 1987. – С.32 – 39.
- 23.Гарбер Ю.И. Эффективность изоляционных покрытий, нанесенных в трассовых условиях // Строительство трубопроводов. 1992. – №7. – С.21 – 24.

- 24.Глаговский Б. А., Московенко И. Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
- 25.Глазов Н.П., Шамшетдинов К.Л., Глазов Н.Н. Сравнительный анализ требований к изоляционным покрытиям трубопроводов // Защита металлов. – 2006. Т. 42. – № 1. – С. 103 – 108.
- 26.Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.: ил.
- 27.Гольдфарб А. Я. Специфические российские проблемы в области защитных покрытий трубопроводов / А. Я. Гольдфарб // Коррозия территории нефтегаз. 2007. – №2(7). – С.14 – 19.
- 28.Горшков А.Г., Трошин В.Н., Шалашилин В.И. Соппротивление материалов: Учеб. пос. 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с. – ISBN 5-9221-0181-1.
- 29.ГОСТ 10692 – 80 Трубы стальные, чугунные и соединительные части к ним. Приемка, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 9 с.
- 30.ГОСТ 20295-85. Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов:.– М.: Изд-во стандартов, 1986. – 15 с.
- 31.ГОСТ 9.401-91 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР – 1991. – 33 с.
- 32.ГОСТ 9.602-2005 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 56 с.
- 33.ГОСТ Р 51164-98 Трубопроводы стальные магистральные общие требования к защите от коррозии – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 43 с.
- 34.Грачев Л. Л., Филатов И. С., Черский И. Н. О физико-механических

- аспектах и методике испытания полимерных материалов при низких температурах. – В кн.: Хладостойкость полимерных материалов и изделий. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1974, с. 3 – 9.
35. Гуревич Д.Ф. Основы расчета трубопроводной арматуры – М.: Машгиз, 1956. – 321 с.
36. Гусейнзаде, М. А. Методы математической статистики в нефтяной и газовой промышленности / М. А. Гусейнзаде, Э. В. Калинина, М. Б. Добкина. – М.: Недра, 1979. – 339 с.
37. Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1965. – 762 с.
38. Дранченко Б.Н., Портнов Б.Б., Селезнев А.В., Комаров С.Н. Систематизация экспериментальных данных по концентрации напряжений в тройниковых соединениях внутренним давлением // Теплоэнергетика – 1988. – № 7. – С. 27 – 29.
39. Жубанов Б. А., Диндоин В. И., Филатов И. С. Исследование фотодеструкции полифениленоксида при низких температурах методом ЭПР. В кн.: Свойства и применение полимерных материалов при низких температурах: Тез. Всесоюз. конф. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1977, с. 84 – 85.
40. Зацепин В. В. Анализ методов расчета напряженного состояния тройникового соединения трубопровода: Обз. Инф. Сер.: Транспорт и подземное хранение газа. – М.: ООО “ИРЦ Газпром”, 2004. – 52 с.
41. Зацепин В. В. Напряженное состояние узла врезки отвода в газопровод, находящийся под давлением // Молодежная наука – нефтегазовому комплексу. Тезисы докладов научной конференции аспирантов, молодых преподавателей и сотрудников вузов и научных организаций. Том 3. Секция «Транспорт и хранение нефти и газа». – М.: «Нефть и газ», 2004. – С. 11.
42. Защита от коррозии покрытиями на основе жидких терморективных материалов наружной поверхности труб, соединительных деталей,

- запорной арматуры и монтажных узлов Яковлев С.В. ООО «ВолгоУралНИПИгаз» – Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2008. – № 9. – С. 95 – 97.
- 43.Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир. 1975. – 473 с.
- 44.Зиневич А.М., Козловская А.А. Антикоррозионные покрытия. М.: Стройиздат, 1989. – 112 с.
- 45.Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
- 46.Карякина М.И. Физико-химические основы процессов формирования и старения покрытий. М.: Химия, 1980. – 124 с.
- 47.Каталог окрасочного оборудования безвоздушного распыления производства Contracor GmbH, Германия [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.contracor.ru/painting/nozzles/size.html> (проверено 22.12.2013).
- 48.Кибзун и др. Теория вероятностей и математическая статистика. базовый курс с примерами и задачами. – М.: Физматлит, 2002. – 224 с.
- 49.Куликов Ю.А., Стасенко И.В. Напряженно-деформированное состояние тройниковых соединений тонкостенных труб методом конечных элементов // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1979. – Вып. 20. – С. 229 – 237.
- 50.Куликов Ю.А., Стасенко И.В. Расчет тройниковых соединений тонкостенных труб методом конечных элементов // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1977. – Вып. 18. – С. 141 – 152.
- 51.Ларьков А.П. Защитные свойства толстослойных покрытий «Кортекор» для запорной арматуры, эксплуатирующейся в условиях Крайнего Севера // Практика противокоррозионной защиты – 2011. – № 2(60) – С. 28 – 35.
- 52.Магалиф В. Я., Хорева В. И. Изгиб криволинейных труб с учетом влияния внутреннего давления // Труды ВНИИСТ выпуск 25, – Москва – 1971.
- 53.Минин Л.С., Окопный Ю.А., Радин В.П., Хроматов В.Е. Сборник задач

- по курсу «Механика материалов и конструкций». – М.: МЭИ, 1998. – 303 с.
54. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практическое пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.: ил.
55. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Акустические методы контроля: Практическое пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991. – 283 с.: ил.
56. Низьев С.Г. О противокоррозионной защите магистральных и промысловых трубопроводов современными полимерными покрытиями // Территория Нефтегаз – 2009. – № 91 – С. 28 – 35.
57. Низьев С.Г. Особенности и перспективы противокоррозионной защиты магистральных нефтепроводов // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. – 2007. – №4 – С. 9 – 22.
58. Низьев С.Г., Низьева Ю.С., Ларьков А.П. О перспективах и проблемах заводской изоляции соединительных деталей запорной арматуры трубопроводов // Территория нефтегаз – № 12. – 2008. С. 54 – 59.
59. Оптимизация нанесения покрытия – горячее распыление вместо нанесения кистью / Р. Штецель, Е. Потатурина, И. Лаппат, М. Форрат // Литейщик России. – 15/06/2013. – № 6. – С. 15 – 20 .
60. Протасов В.Н. Полимерные покрытия в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1985.
61. Протасов В.Н., Мурадов А.В., Макаренко А.В. Технические требования к полимерным покрытиям различных объектов нефтегазовой отрасли. Состояние и перспективы // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2010. – № 9 – С. 26 – 28.
62. Рождественский В.В. О прочности сварных тройников // Вопросы прочности трубопроводов и резервуаров: Сб. трудов ВНИИСТ. – М., 1960. – Вып. 10. – С. 96 – 109.
63. Сазонов А.П., Алексашин А.В. Полимерные защитные покрытия

- газопроводов // Коррозия ТНГ. – 2009. – № 1(12) – С. 19 – 27.
64. Санжаровский А. Т., Потапов В. Б., Петрусенко Е. В., Уразов Б. В. Изоляционные материалы и покрытия для защиты труб от коррозии // Строительство трубопроводов. – 1997. – №1. – С. 21 – 28.
65. Саргсян А.Е. Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности. Основы теории с примерами расчетов. – Учебник для вузов. – 2-е изд., испр. И доп. – М.: Высш. шк., 2000. – 286 с.: ил.
66. Свечкопалов А. П. Надежные технологии – гарантия стабильного развития. // Сфера Нефтегаз – 2007. – № 1 – С. 13 – 20.
67. Смирнов А.Ф. и др. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1975. – 480 с.
68. СНиП III-4-80\* Техника безопасности в строительстве – М.: Госстрой СССР, 1980. – 15 с.
69. Сопротивление материалов: Учеб. пособие. – 2-е изд., испр. / Н.А. Костенко, С.В. Балясникова, Ю.Э. Волошановская и др.; Под. ред. Н.А. Костенко. – М.: Высш. шк., 2004. – 430 с.: ил.
70. СП 34-116-97 Инструкция по проектированию, строительству и реконструкции промышленных нефтегазопроводов – М.: Издательство стандартов, 1997. – 114 с.
71. СТО Газпром 2-4.1-273-2008. Технические требования к соединительным деталям для объектов ОАО «Газпром» – Введ. 14.04.2009 – М.: ИРЦ «Газпром» 2008. – 55 с.
72. Стрижевский И.В., Зиневич А.М., Никольский К.К. Защита металлических сооружений от подземной коррозии. – М.: Недра, 1981. – 293 с.
73. Сусоров И.А. Антикоррозионное полимочевинуретановое покрытие «Форпол-Ойл» для изоляции труб, запорной арматуры и фасонных деталей магистральных нефтепроводов // Коррозия территории НЕФТЕГАЗ, 2011. – №2 (19) – с. 56 – 61.
74. Технические требования к наружным покрытиям на основе

- термореактивных материалов для антикоррозионной защиты труб, соединительных деталей, запорной арматуры и монтажных узлов трубопроводов с температурой эксплуатации от минус 20 °С до плюс 100 °С. Утв. Членом Правления ОАО «Газпром» Б.В. Будзуляком 02.08.2005 г. – М.: ИРЦ «Газпром», 2005. – 73 с.
75. Технологическая инструкция по нанесению системы наружного антикоррозионного покрытия «БИУРС» на соединительные детали, запорную арматуру и трубы газо-, нефте-, продуктопроводов, компрессорных и газораспределительных станций. – ООО «ХимБалт», 2007. – 6 с.
76. Технические условия погрузки и крепления грузов Раздел «Трубы» – М.: Транспорт, 1988. – 33 с.
77. ТИ 0707.25073.00007 – Технологическая инструкция «Ремонт дефектных участков антикоррозионного покрытия усиленного типа». – М.: Издательство стандартов, 2007. – 45 с.
78. Тобольский А. Свойства и структура полимеров. – М.: Химия, 1978. – 322 с.
79. ТУ 1390–014–86695843–2011 «Трубы и детали трубопроводов стальные с наружным двухслойным эпоксидным антикоррозионным покрытием» – М.: Изд-во стандартов, 2011. – 67 с.
80. ТУ-14-3-1954-94. Трубы стальные электросварные прямошовные диаметром 1220 и 1420 мм с наружным полиэтиленовым антикоррозионным покрытием. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 60 с.
81. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1970. – 544 с.
82. Филатов И. С. Особенности поведения полимерных материалов и пути их создания для условий холодного климата. – В кн.: Конструкционные полимеры при низких температурах. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1976, с. 3 – 15.
83. Филатов И.С. Климатическая устойчивость полимерных материалов. – М.: Наука, 1983. – 216 с.

- 84.Формирование покрытий на основе полиуретановых ЛКМ / Лакокрасочная промышленность – Июль, 2012 – С. 13–24.
- 85.Хог Э., Чой К., Комков В. Анализ чувствительности при проектировании конструкций / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 428 с.
- 86.Хрулев В. М. Клеи и пластики. – М.: Высшая школа, 1970. – 368 с.
- 87.Чахов И. К., Диндоин В. И., Филатов И. С. Фотостарение простых полиэфиров. В кн.: Конструкционные полимеры при низких температурах. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1976, с. 16 – 22.
- 88.Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. М.: Машиностроение – 1, 2004. – 512 с.
- 89.Чухно А. А. К методике определения температурных напряжений в многослойных пластинах при экспонировании. В кн.: Атмосферостойкость и механические свойства полимеров при низких температурах. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1975, с. 35 – 40.
- 90.Чухно А.А. К методике определения температурных напряжений в многослойных пластинах при экспонировании. В кн.: Атмосферостойкость и механические свойства полимеров при низких температурах. – Якутск: ЯФ СО АН СССР. – 1975 – С. 35 – 40.
- 91.Chen T.-Y., Chen D.-Z., Wang Y.-Q. The parametrical stress analysis of tubular Y-joints // Journal Energy Res.. Technol., 1985. Vol. 7 – P. 107.
- 92.Corum J.M., Greensreet W.L. Experimental elastic stress analysis of cylinder-to-cylinder shell models comparisons with theoretical predictions // Prepr. International Conference Structure Mechanical Reactor Technology. – Berlin, 1971. – Vol. 3 – Part G.
- 93.Crandall S. H., Dahi N. C. The influence of pressure on the bending of curved tubes. (Acts IX Congr. Internat. Mecan appl.). V. 6. Univ. Bruxelles, 1957.
- 94.Gibstein M.B. Parametrical stress analysis of T-joint // Evr. Offshore Steels Res. Seminar. – Cambtidge, 1978.

95. Leik R.D., Rotvin A.B. Automated mesh generation generation for tubular joint stress analysis // International Journal Computer Structure, 1977. – Vol. 7 – № 1. – P. 73 – 93.
96. Lekkerkerker I.G. The determination of elastic stresses near cylinder-to-cylinder intersections // Nuclear engineering and design, 1972. – № 20. – P. 57 – 84.
97. Skopinsky V.N. Berkov N.A. Stress analysis of ellipsoidal shell with nozzle under internal pressure loading // Transactions of the ASME. Journal of Pressure Vessel Technology, 1994. – Vol. 116. – №3. – P. 431 – 436.
98. Skopinsky V.N. Numerical stress analysis in interesting cylindrical shells // Transactions of the ASME. Journal of Pressure Vessel Technology, 1993. – Vol. 115. – №3. – P. 275 – 282.
99. Steele C.R., Steele M.L. Stress analysis of nozzles in cylindrical vessels with external load // Transactions of the ASME. Journal of Pressure Vessel Technology, 1983. – Vol. 105. – №9. – P. 191 – 200.
100. Xie D.-S., Lu Y.-G. Prediction of stress concentration factors for cylindrical pressure vessels with nozzles // International Journal Pressure Vessel and Piping, 1985. – Vol. 21. – P. 1 – 20.