

**УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи



Пак Алексей Львович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
СОХРАНЯЕМОСТИ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
ПОКРЫТИЙ ТРУБ В АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОГО
КЛИМАТА**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук,
профессор, Заслуженный работник
Республики Коми И. Ю. Быков

Ухта 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАНЯЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ТРУБ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ХРАНЕНИИ.....	12
1.1. Виды полимерных покрытий и их сохраняемость в атмосферных условиях северного климата.....	12
1.1.1 Понятие о сохраняемости.....	12
1.1.2 Конструкция антикоррозионных защитных покрытий.....	13
1.1.3 Влияние северного климата на полимерный материал защитных покрытий труб.....	19
1.2. Существующие методики оценки параметров сохраняемости полимерных материалов.....	27
1.3. Изменение сохраняемости свойств полимерных покрытий в условиях атмосферных воздействий.....	30
1.4. Существующие методы прогнозной оценки сроков сохраняемости полимерных покрытий.....	35
1.5. Существующие методы обеспечения сроков сохраняемости полимерных покрытий в атмосферных условиях северного климата.....	47
1.6. Цель и задачи исследований.....	49
Выводы.....	50
2. КОМПЛЕКС МЕТОДИК ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ.....	53
2.1. Методика испытаний на растяжение.....	53
2.1.1 Цель испытаний и определяемые параметры.....	53
2.1.2 Подготовка образцов для испытаний на растяжение.....	56
2.1.3. Аппаратура для проведения исследований.....	58
2.1.4. Проведение испытаний.....	59

2.1.5 Обработка результатов.....	62
2.2 Методика определения твердости полимерных покрытий.....	64
2.2.1 Определение твердости по Шору.....	64
2.2.2 Определение твердости по Бринеллю (метод вдавливания стального шарика).....	68
2.3 Определение прочности адгезии.....	76
2.3.1 Сущность метода.....	76
2.3.2. Оборудование и материалы.....	76
2.3.3. Образцы для проведения исследований.....	77
2.3.4. Проведение исследований.....	78
2.3.5 Обработка результатов исследований.....	79
2.4. Изменение внутренних напряжений многослойных полимерных покрытий при низких температурах.....	80
Выводы.....	83
3. ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ.....	85
3.1. Изменение прочностных свойств полиэтиленовых покрытий под влиянием низких атмосферных температур	85
3.1.1 Экспериментальные исследования влияния низких температур на механические свойства полимерных покрытий	85
3.1.2. Изменение механических свойств исправных покрытий при длительном атмосферном хранении	93
3.2. Изменение адгезионной прочности полимерных покрытий во времени.....	99
3.2.1. Классификация механизмов деформации и разрушения адгезионных связей покрытия с металлом трубы	99

3.2.2 Расчетная модель адгезионной прочности с использованием работы адгезии и отрыва покрытия	102
3.3. Распределение температурных напряжений в полимерных покрытиях при низких температурах	111
3.3.1. Характер распределения напряжений в покрытии при хранении в условиях низких температур	111
3.3.2 Разработка расчетной деформационной модели трехслойного полиэтиленового покрытия труб	113
3.3.3 Результаты расчета температурных напряжений в покрытии трубы при низких температурах.....	118
3.4. Прочностные свойства трехслойных полимерных покрытий при низкой температуре.....	120
3.4.1 Влияние температурного фактора на изменение прочности полимерных покрытий.....	120
3.4.2 Сопоставление результатов расчета температурных напряжений с допустимыми значениями	123
3.4.3 Характер изменения напряжений полимерных покрытий труб при вероятной температуре их хранения (+20÷-60°C).....	125
Выводы.....	128
4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКОВ СОХРАНЯЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОГО КЛИМАТА	130
4.1 Методика прогнозирования сроков сохраняемости полимерных покрытий труб.....	130
4.2 Определение взаимосвязи контролируемых параметров с прочностными свойствами полимерного материала.....	132
4.3 Определение прогнозных сроков предельного хранения защитного покрытия.....	136

4.3.1	Определение прогнозного срока сохраняемости по контролируемому параметру твердости	137
4.3.2	Определение прогнозного срока сохраняемости по контролируемому параметру затуханию УЗ-волн.....	140
4.3.3	Определение прогнозного времени сохраняемости защитного полимерного покрытия труб по контролируемому параметру адгезионной прочности.....	147
	Выводы.....	150
5.	СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАНЯЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ТРУБ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....	151
5.1.	Факторы, влияющие на сохраняемость физико-механических свойств полимерных покрытий.....	151
5.2.	Оценка технического состояния защитных покрытий труб для отбора в состав аварийных запасов.....	154
5.2.1.	Контроль геометрических характеристик внешней поверхности защитного покрытия.....	155
5.2.2.	Контроль протяженности поверхностных трещин	157
5.2.3.	Контроль состояния кромок защитного покрытия	159
5.2.4.	Контроль состояния клеевого слоя с выявлением отслоений	164
5.2.5.	Критерии оценки технического состояния защитного покрытия труб для отбора в состав аварийных запасов	164
5.3.	Мониторинг технического состояния защитных покрытий труб при длительном хранении	166
5.3.1.	Методы контроля защитных покрытий	166
5.3.2.	Оценка результатов контроля покрытия для отбраковки из состава аварийных запасов	168

5.4. Разработка стандарта организации для обеспечения сохраняемости полимерных покрытий труб при атмосферном хранении.....	171
Выводы.....	175
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	178
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	182
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Стандарты ООО «Газпром трансгаз Ухта». Сроки хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях с использованием средств защитного укрытия. СТО 2014, Ухта / Титульный лист, предисловие, содержание, введение со списком разработчиков.	

Введение

Актуальность темы

Для обеспечения непрерывных производственных процессов на объектах нефтяной и газовой отрасли формируют резервные запасы материалов и оборудования, используемых для оперативного устранения повреждений и неполадок. Наиболее многочисленными в резервных запасах являются трубные изделия, часть из которых имеют защитные трехслойные полиэтиленовые покрытия заводского нанесения (ТПП ЗН). Хранение осуществляется на открытых площадках, как правило, без средств защиты от воздействия неблагоприятных атмосферных факторов, к которым, прежде всего, относятся солнечное излучение, влага и периодические колебания температуры воздуха. Влияние этих факторов приводит к ухудшению физико-механических характеристик материала покрытий, их растрескиванию и к снижению адгезии с поверхностью металла труб.

Производитель, согласно техническим условиям на трубные изделия с наружными полиэтиленовыми покрытиями, гарантирует их сохраняемость в течение 2-х лет при условии хранения на открытой площадке. Других норм сроков сохраняемости, имеющих научное обоснование, для защитных покрытий труб пока не разработано.

Учитывая массивность изделий, их негабаритность и механическую ранимость полимерных покрытий, операции по замене труб с ЗПП на новые являются организационно сложными, экономически затратными и длительными по исполнению. Между тем, установленный производителем гарантийный срок защитных покрытий является коммерческим показателем и не характеризует фактического состояния полимерных покрытий после его окончания. В то же время процесс продления сроков хранения, отслуживших гарантийный срок защитных покрытий, методически недостаточно систематизирован.

В связи с этим постановка научных исследований по совершенствованию методов обеспечения сроков сохраняемости защитных полимерных покрытий труб в атмосферных условиях северного климата является актуальной.

Идея работы

Исключение необоснованных затрат на обновление аварийных запасов из-за необоснованных сроков сохраняемости защитных покрытий.

Степень разработанности темы

Вопросы изучения механизма развития и образования повреждений трехслойных полиэтиленовых покрытий труб заводского нанесения изложены в работах Ю. А. Теплинского и его сотрудников, проблемы технологии диагностирования покрытий труб с учетом того, что степень развития дефектности зависит от сверхнормативного хранения, рассмотрены в работах И. И. Меркурьевой и Ф. А. Новоселова, вопросы прогнозирования изменения защитных свойств и определения срока службы изоляционных покрытий представлены в работах Ф. М. Мустафина и А. И. Слуцкого. Однако до настоящего времени не разработан системный методический комплекс по обеспечению сохраняемости антикоррозионных полимерных покрытий труб в условиях северного климата.

Цели и задачи работы

Цель работы - выявление закономерностей изменения структурно-механических свойств защитных покрытий труб аварийных запасов и оценка сроков их сохраняемости в условиях северного климата для обоснованного принятия решения о прекращении хранения.

Основные задачи исследований:

1. Анализ методов обеспечения сохраняемости полимерных покрытий труб при атмосферном хранении.
2. Обоснование комплекса методик для оценки физико-механических свойств полимерных покрытий.
3. Оценка изменений механических свойств полимерных покрытий под воздействием северных климатических факторов.
4. Прогнозирование сроков сохраняемости полимерных покрытий труб при длительном хранении в условиях северного климата.

5. Совершенствование методов обеспечения сохраняемости полимерных покрытий труб в условиях атмосферных воздействий.

Научная новизна

1. Найдено значение температурного поправочного коэффициента в виде экспоненциальной функции от времени $k_t = 0,6 \cdot e^{0,5t}$ для определения истинной силы адгезии контрольной полосы трехслойных полиэтиленовых покрытий заводского нанесения (ТПП ЗН) с учетом температуры в момент отрыва.

2. Определена линейная зависимость $HV = f(\sigma_T)$ между измеренным значением твердости HV и пределом текучести σ_T ТПП ЗН для оценки динамики деградации их пластичных свойств в процессе длительного хранения.

3. Предложено математическое выражение $F_{отр}^* = \frac{F[\Delta L + L(1 - \cos \alpha)]}{L \cdot b}$
 $-1,67 \cdot k_p \cdot a \cdot b \cdot \Delta L \cdot e^{-0,5t} \left\{ \frac{b}{(1 - \cos \alpha)} \right.$ для расчета истинного усилия отрыва контрольной полосы при оценке адгезионной прочности защитного ТПП ЗН с учётом разных температур при отборе образцов и лабораторных испытаниях.

4. Найдены критерии балльной оценки эксплуатационного состояния трехслойных защитных покрытий труб для принятия обоснованного решения о выводе их из состава аварийных запасов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в получении закономерностей, обуславливающих возможность научного обоснования сроков хранения,кратно превышающих гарантийные обязательства изготовителя.

Практическая значимость заключается в том, что:

1. Предложены расчётные модели для оценки адгезионной прочности и температурных напряжений в защитных полимерных покрытиях при их длительном хранении в условиях северного климата.

2. Обоснован метод оценки сроков сохраняемости полимерных покрытий труб аварийных запасов при хранении в условиях северного климата.

3. Разработан алгоритм обеспечения сохраняемости защитных покрытий труб при длительном хранении в составе аварийных запасов.

4. Основные положения диссертационной работы нашли отражение в СТО ООО «Газпром Трансгаз Ухта» «Сроки хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях с использованием средств защитного укрытия».

Методология и методы исследования

В работе использованы комплекс методик для оценки механических свойств полимерных покрытий, визуально-измерительного контроля, аналитические, волновые и экспериментальные исследования качества полимерных покрытий на лабораторных, стендовых и натуральных объектов.

Положения, выносимые на защиту

1. Предложенный метод оценки изменения механических свойств трехслойных защитных полиэтиленовых покрытий труб аварийных запасов, устанавливающий закономерности деградационных явлений в условиях атмосферных воздействий северного климата и позволяющий обеспечить увеличение установленного срока хранения,кратно превышающего гарантийные обязательства изготовителя.

2. Разработанный метод прогнозирования предельных сроков сохраняемости трехслойных полиэтиленовых покрытий труб заводского нанесения, основанный на результатах регулярного мониторинга контролируемых параметров в разных климатических зонах.

3. Представленный методический комплекс на основе разработанного алгоритма организационно - технических мероприятий, основные положения которого включены в стандарт ООО «Газпром Трансгаз Ухта» «Сроки хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях с использованием средств защитного укрытия» (СТО 74.30-00159025-21-009-2014).

Степень достоверности и апробация работы

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные

в работе, базируются на экспериментальных данных, полученных с применением современных теоретических и феноменологических методов исследований, математического моделирования с использованием современных программных вычислительных комплексов и измерительной техники, научно-исследовательского оборудования и компьютерного обеспечения.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- XI-XIII Межрегиональных научно-практических конференциях «Современные проблемы нефтепромыслов и буровой механики» (УГТУ, февраль 2014, 2015, 2016 гг., г. Ухта);

- научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников УГТУ (УГТУ, 22-25 апреля 2014 г.);

- научно-техническом семинаре ООО «Ухтанефтегазмонтаж» (г. Ухта, 21.10.2014 г. ООО УНГМ)

- научно-техническом совете Газэнергосервис-Ямал (г. Ухта, ГЭС-Ямал, 10.04.2015г).

Соответствие паспорту специальности

Работа соответствует п. п. 6 и 7 паспорта специальности 25.00.19:

1. п.6. Разработка и усовершенствование методов эксплуатации и технической диагностики линейной части трубопроводов и методов защиты их от коррозии;

2. п.7. Исследования в области ресурса трубопроводных конструкций, в том числе прогнозируемого при проектировании и остаточного при их эксплуатации.

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 8 работах, из них 6 - в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 150 наименований, содержит 199 стр. текста, включая 51 рисунок и 27 таблицы. Общий объем работы составляет 199 стр.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАНЯЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ТРУБ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ХРАНЕНИИ

1.1 Виды полимерных покрытий и их сохраняемость в условиях северного климата

1.1.1 Понятие о сохраняемости

Сохраняемость в соответствии с ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике» [122] представляет один из показателей надежности изделия или материала, характеризующий их качество.

Сохраняемость – это свойство сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения или транспортирования.

Иначе говоря, сохраняемость является величиной статистической, оценивается вероятностью и характеризуется сроком, в течение которого изделие или материал должны сохранять все допустимые значения параметров, установленные нормативной документацией [121]. Математическое ожидание срока сохраняемости представляет собой *средний срок сохраняемости*.

Применительно к антикоррозионным защитным покрытиям (АЗП) показатель сохраняемости обеспечивается сохранностью физико-химических свойств композиционных материалов, входящих в состав полимерных защитных покрытий. Эти свойства в соответствии с нормативными документами [120, 123] регламентируются конкретной номенклатурой параметров, основными из которых являются (для полимерных покрытий заводского нанесения):

Толщина покрытий, мм	2,5...3,5
Адгезия к стали при $t=20^{\circ}\text{C}$, Н/см:	$\geq 50 \dots 70$
- в воздухе	$\geq 50 \dots 70$
- в воде	$\geq 35 \dots 50$
Прочность при разрыве, МПа	12

Площадь отслаивания при катодной поляризации, см ² :	
- при t=20 ⁰ С,	5
- при t=40 ⁰ С,	8
Грибостойкость, баллы	≥2
Стойкость к растрескиванию под напряжением	
при t=50 ⁰ С, ч	≥1000
Стойкость к воздействию УФ-радиации (600кВт·ч/м)	
при t=50 ⁰ С,	≥500
Сопротивление пенетрации (вдавливанию)	
при t=20 ⁰ С, мм	≤0,2
Относительное удлинение при разрыве, %:	
при t=20 ⁰ С,	>200
при t=-40 ⁰ С,	>100
Ударная прочность при t=20 ⁰ С, Дж/мм	8...10
Диэлектрическая сплошность, кВт/мм	5
Сопротивление изоляции при t=0 ⁰ С, Ом·м ²	>5·10 ⁵

Эти параметры в отношении труб нефтегазового сортамента характеризуют способность полимерных покрытий выполнять главную требуемую функцию - защиту их от наружной коррозии, а сохраняемость этих параметров в течение заданного времени обеспечивает надежность антикоррозионных защитных свойств полимерных покрытий.

1.1.2 Конструкция антикоррозионных защитных покрытий

В структуре нефтегазового оборудования трубы различного назначения являются важнейшим звеном, объединяющим отдельные технологические цепочки в единый производственный комплекс с помощью трубных систем разных конфигураций. Эти системы могут быть локальными, обеспечивающими функционирование отдельных производств, например, головных сооружений нефтяных и газовых промыслов, установок комплексной подготовки нефти и газа, систем поддер-

жания пластового давления, закачки пара в пласт и т.д., а также протяженными, обеспечивающими магистральный транспорт нефти, газа, воды и других продуктов и веществ (например, углепроводы, метанолопроводы, трубопроводы для перекачки природных рассолов и др.).

Как видно, условия эксплуатации труб многообразны; многообразны и факторы, влияющие на техническое состояние трубных изделий в процессе их транспортировки, хранения и эксплуатации. Одним из наиболее существенных факторов разрушающего воздействия на трубы является коррозия. При этом коррозионному разрушению подвергается не только внутренняя поверхность труб под воздействием перекачиваемых агрессивных сред, но и внешняя – под воздействием факторов окружающей среды: атмосферных осадков, дневных и ночных температур, солнечной радиации, грунтовой влаги и т.п.

Коррозия приводит к значительным потерям. В США ущерб от коррозии в целом и затраты на борьбу с ней оцениваются в 3,1 % ВВП (276 млрд.долл), в Германии этот ущерб оценён в 2,8 % от ВВП (107 млрд.долл.); убытки только из-за коррозии газопроводов и нефтепроводов в США ежегодно достигают 600 млн.долл.

В России также существует разветвленная сеть нефтегазопроводов и совместно с водоводами протяженность этой сети составляет 17 млн. км. При этом статистика свидетельствует, что аварии трубопроводных систем в 22-25% случаев возникают по причине коррозии металла труб. При этом, в частности, аварии нефтепроводов сопровождаются большими потерями природных ресурсов и широкомасштабными загрязнениями окружающей среды. Например, по данным Совета безопасности РФ, потери нефти в России в результате аварий ежегодно составляют 1,2 % от ее добычи, т.е. не менее 3 млн.т в год; только на Самотлорском месторождении ежегодно происходит 200-400 разрывов [117] внутрипромысловых трубопроводов, в результате чего более 20 тыс. кв. км территории загрязнено нефтью.

Федеральный закон № 116 ФЗ «О промышленной безопасности опасных промышленных объектов» [124] содержит требования по предупреждению коррозионных аварий систем, представленных стальными трубами различных размеров. Одним из основных является требование обеспечения защиты труб от внутренней и наружной коррозии.

В настоящей работе рассматривается проблема защиты трубных изделий преимущественно газонефтепроводного назначения от наружной коррозии, возникающей под влиянием внешних факторов окружающей среды.

ГОСТ Р 51164-98 [123] устанавливает общие требования к защите от подземной и атмосферной коррозии наружной поверхности стальных магистральных нефтегазопроводов, трубопроводов компрессорных, газораспределительных, перекачивающих и насосных станций, а также нефтебаз, головных сооружений нефтегазопромысловых, установок комплексной подготовки нефти и газа, трубопроводов теплоэлектростанций, соединенных с магистральными трубопроводами подземной, подводной (с заглублением в дно), наземной (в насыпи) и надземной прокладками, а также трубопроводов на территории других аналогичных промышленных площадок.

Как видно, область использования стальных труб, требующих защиты нагруженных поверхностей от коррозии, весьма обширна. ГОСТ Р 51164-98 устанавливает два типа антикоррозионных защитных покрытий (АЗП):

- нормальный;
- усиленный.

Нормальным называют тип АЗП, сформировавшийся в период начала массового строительства нефтегазопроводов преимущественно в 60-е годы прошлого столетия. ГОСТ Р 51164-98 регламентирует применение нормального типа антикоррозионной изоляции для труб диаметром менее 820 мм, которая представляет собой покрытие трассового исполнения:

- мастичное (грунтовка битумно-полимерная, затем слой мастики битумной изоляционной, покрытый рулонным армирующим материалом и мастикой изоляционной; верхний слой – обертка защитная);
- ленточное (полимерная или битумно-полимерная грунтовка под полимерную липкую ленту в 1-2 слоя с последующей защитой оберткой полимерной);
- ленточное полимерно-битумное (грунтовка битумно-полимерная под ленту полимерно-битумную с защитой полимерной оберткой).

На практике нормальный тип АЗП широко применяется и для труб диаметром 1020 – 1420 мм. Еще в начале 2000-х гг. 25% труб изолировалось битумным покрытием и около 70% - ленточным [118].

При этом срок службы битумных покрытий не превышал 5-7 лет из-за потери адгезии к металлу под действием катодной защиты, значительной деформации слоя битума под воздействием грунта и повышенных температур.

Основным недостатком полимерных лент является их эластичность и низкая устойчивость к сдвиговым деформациям. Наблюдаются образование задирав лент в нахлестах, сморщивание, возникновение гофров и складок на ленте, телескопические сдвиги слоев, сквозные и поверхностные растрескивания. Срок службы ленточных покрытий не превышает 12 – 15 лет.

Низкая защитная способность битумных покрытий и полимерных лент трасового исполнения породили проблему разработки усиленных типов АЗП, срок службы которых был бы соизмерим со сроком амортизации труб, условные значения которого принято равным не менее 33 лет.

Усиленный (УС) тип защитных покрытий был регламентирован ГОСТ Р 51164-98. В соответствии с этой регламентацией усиленный тип защиты (АЗП УС) следует применять для труб 820 мм и более.

Особенностью изготовления АЗП УС является их заводское или базовое нанесение на поверхность труб. При этом в качестве изолирующего материала применяются экструдированные полимеры (экструзия – продавливание расплава

через формующее отверстие в экструдере). Наибольшее распространение получили двух- и трехслойные полимерные покрытия:

- двухслойное полимерное покрытие: термопластичный полимерный подслои толщиной 250-400 мкм и наружный защитный слой на основе экструдированного полиолефина толщиной до 3 мм. Перед нанесением полимерного покрытия очищенная поверхность труб подвергается обработке (пассивации) раствором хромата для повышения устойчивости полимерной композиции и воздействию воды и стойкости к катодному отслаиванию. Такая конструкция АЗП УС способна обеспечить защиту трубопроводов от коррозии до 30 лет и более [118].

- трехслойное полимерное покрытие: грунтовка на основе терморезистивных смол толщиной 80 – 200 мкм; термопластичный полимерный подслои толщиной до 400 мкм и наружный защитный слой на основе экструзионного полиолефина толщиной соответственно не менее 3 мм для труб диаметром 1020 мм и выше.

Трехслойное полимерное покрытие отвечает самым современным техническим требованиям и способно обеспечить эффективную защиту труб от коррозии на срок не менее 40 лет [119], что превышает условно установленный срок их амортизации (33 года).

В 2007 году введен в действие ГОСТ 6.602-2005 [120]. Этот ГОСТ вводит понятие (п.5.2) защитных покрытий весьма усиленного (ВУС) типа.

Весьма усиленный тип антикоррозионных защитных покрытий (АЗП ВУС) применяют независимо от коррозионной агрессивности грунта для антикоррозионной защиты стальных трубопроводов прокладываемых непосредственно в земле в пределах территорий городов, населенных пунктов и промышленных предприятий, прокладываемых вне их территории.

Конструктивно защитные покрытия типа ВУС не отличаются от покрытий типа УС: они так же содержат наружный защитный слой экструдированного полиолефина с термопластичным полимерным подслоем, размещенным непосредственно на очищенной наружной поверхности труб – для двухслойной конструкции; трехслойная конструкция содержит дополнительно в качестве праймслоя грун-

товку на основе терморезистивных смол, которая наносится на предварительно нагретую, очищенную и пассивированную хроматом поверхность стальных труб. При этом согласно ГОСТ 9.602-2005 покрытия ВУС отличаются повышенной толщиной наружного слоя (3,5 мм) наносятся на трубы диаметром от 530 мм и больше, при этом сопротивляемость пенетрации (вдавливанию) не должна превышать 0,2 мм при температуре 20 °С. Срок службы такого покрытия при температуре прокачиваемого продукта до 60 °С оценивается в 50 лет.

Как видно, полимерные антикоррозионные защитные покрытия заводского нанесения постоянно совершенствуются, а качество их изготовления повышается. При этом показатель сохраняемости в жизненном цикле полимерных покрытий труб является ключевым. Известно, что массивность изделий, их перемещение, погрузо-разгрузочные работы и транспортировка с заводского конвейера к месту трассового монтажа порождают факторы риска, связанные с механическим разрушением защитного слоя. В то же время влияние внешних природных факторов, связанных с перепадом температур, осадками, солнечной инсоляцией, ультрафиолетовым воздействием и т.п., приводят к запуску механизма старения с момента изготовления полимерного материала. Это сопровождается химической деструкцией с образованием трещин и физическим перерождением (релаксацией) макромолекулярных связей с возникновением локальных механических напряжений. Все это вместе приводит к изменению механических свойств, плотности и объема, к снижению адгезионных связей между макромолекулами и их структурной перестройке из-за процессов кристаллизации.

Иначе говоря, динамика физико-химического старения полимерных защитных покрытий определяет скорость изменения их качества и надежности. Существующая нормативная документация регламентирует требования к этим показателям, но не содержит методологических рекомендаций по прогнозированию и управлению процессами сохраняемости этих параметров во времени. Особенно это важно при необходимости длительного хранения трубных изделий с полимерными защитными оболочками при создании аварийных или резервных запасов на

площадках северных территорий страны. Это означает, что проблема совершенствования методов прогнозирования и обеспечения сохранности полимерных покрытий труб в атмосферных условиях северного климата является актуальной.

1.1.3 Влияние северного климата на полимерный материал защитных покрытий труб

Для Северо-Востока европейской части России, примыкающей к шельфу Ледового океана, климат можно характеризовать в соответствии с ГОСТ 16350-80 [130] как:

- холодный, I₂;
- умеренно холодный, II₄;
- умеренный, II₅.

Именно эти территории российского Севера, включающего Республику Коми, Ненецкий Автономный округ и Вологодскую область, отличаются повышенной активностью нефтегазового комплекса, характеризующие бурением скважин, добычей нефти и газа, транспортировкой их в южные районы и за рубежи страны.

Для каждого района имеются усредненные климатические показатели, в частности для температуры воздуха статистические характеристики представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Статические характеристики распределения температуры воздуха

Климатический район	Статистические характеристики распределения температуры воздуха			
	Средняя годовая температура, °С	Стандартное отклонение, °С	Коэффициент асимметрии	Коэффициент эксцесса
Холодный I ₂	-5,7	15,1	-0,25	-0,85
Умеренно холодный II ₄	1,7	14,0	-0,39	-0,75
Умеренный II ₅	4,6	11,6	-0,35	-0,52

При анализе влияния температуры воздуха на полимерный материал покрытия труб в процессе их атмосферного хранения покрытия влияют следующие температурные параметры:

- максимальная, минимальная и средняя годовая температура, соответственно t_{\max} , t_{\min} , $t_{\text{ср}}$, $^{\circ}\text{C}$;

- коэффициент вариации температуры воздуха (характеризует наличие температурных перепадов), V , %;

- число суток с переходом температуры через 0°C , N .

При этом допустимые значения коэффициента вариации для каждой из зон следующие:

$$V_{I_2} = \frac{15,1}{5,7} \cdot 100\% = 264,91\% ;$$

$$V_{II_4} = \frac{14,0}{1,7} \cdot 100\% = 823,53\% ;$$

$$V_{II_5} = \frac{11,6}{4,6} \cdot 100\% = 252,17\% .$$

Исходные данные для анализа температуры воздуха получены с электронного ресурса www.gismeteo.ru.

В таблице 1.2 представлены характеристики температуры воздуха в соответствии с ГОСТ 16350-80 [130] для рассматриваемых (I_2 , II_4 , II_5) климатических районов.

Таблица 1.2 – Статические характеристики распределения температуры воздуха по климатическим районам в соответствии с ГОСТ 16350-80.

Климатический район	Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$		Абсолютный максимум на почве, $^{\circ}\text{C}$	Предельное значение температуры воздуха, $^{\circ}\text{C}$							
	Абсолютный минимум	Абсолютный максимум		При вероятности							
				0,05	0,1	0,3	0,5	0,05	0,1	0,35	0,5
				Годовой минимум				Годовой максимум			
Холодный I_2	-54	31	46	-51	-49	-47	-44	30	29	28	27
Умеренно холодный II_4	-50	39	50	-46	-44	-42	-39	37	36	35	34
Умеренный II_5	-41	37	56	-39	-37	-34	-31	36	35	34	32

Эта таблица позволяет определить период времени, в течение которого возможны указанные в ней значения годовых минимумов (максимумов). Так, например, при вероятности 0,1 соответствующие значения годовой минимальной (максимальной) температуры возможны в среднем 1 раз в 10 лет; за этот период значения выше (ниже) указаны в таблице не ожидаются.

Характеристика средней суточной температуры воздуха представлена числом дней в году по интервалам значений в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Распределение средней суточной температуры воздуха с числом дней в году

Климатический район	Число дней в году со средней суточной температурой воздуха, сут.									
	Средняя суточная температура воздуха, °С									
	от -49,9 до -40,0	от -39,9 до -30	от -29,9 до -20	от -19,9 до -10	от -9,9 до -0	от 0,1 до 10	от 10,1 до 20	от 20,1 до 30	от 30,1 до 40	Ито- го, сут
Холодный I ₂	2,5	20,3	53,9	73,4	71	87,4	52	4,5	-	365,5
Умеренно хо- лодный II ₄	0,2	4,6	23,4	60	75,8	77,3	94,2	29,4	0,15	365,5
Умеренный II ₅	-	0,3	6,2	43,2	121,7	135	55	3,6	0,5	365,5

Распределение суточных перепадов температуры, а так же их максимальные значения приведены в таблице 1.4

Таблица 1.4 – Распределение суточных перепадов температуры

Климатический район	Максимальный суточный перепад, °С	Число дней в году со средней суточной температурой воздуха, сут.								
		Средняя суточная температура воздуха, °С								
		от 1 до 3,9	от 4 до 6,9	от 7 до 9,9	от 10 до 12,9	от 13 до 15,9	от 16 до 18,9	от 19 до 21,9	от 22 до 24,9	от 25 до 27,9
Холодный I ₂	29,1	10,9	32,9	30,2	16,8	6,7	1,7	0,5	0,2	0,1
Умеренно холодный II ₄	29,2	7,1	21,2	26,6	22,2	13,7	6,7	1,9	0,5	0,1
Умеренный II ₅	21,2	24,9	38,2	21,7	10,2	3,7	1,1	0,2	-	-

Как видно из этой таблицы, для климатических зон I₂ и II₄ характерно наличие резких температурных перепадов, причем максимальные суточные перепады могут достигать почти 30 °С. Даже кратковременное воздействие температурного

перепада такого уровня может послужить причиной невосстанавливаемых повреждений полимерных покрытий труб.

Климатическая зона Π_5 умеренного климата характеризуется отсутствием резких температурных перепадов и является более благоприятной для сохраняемости свойств полимерных покрытий в атмосферных условиях.

Наконец, очень важным климатическим параметром, который необходимо учитывать для обеспечения сохраняемости защитных полимерных покрытий в условиях северного климата, является число дней с переходом температуры через нулевое значение. Распределение такого параметра по месяцам года в рассматриваемых климатических зонах представлено в таблице 1.5.

Как видно из этой таблицы, наименьшее количество дней с нулевым переходом отмечается в холодной климатической зоне I_2 . Этот показатель составляет здесь суммарно 52,6 сут со стандартными отклонением 13,7 сут ($14 \pm 3,64\%$). При этом самыми интенсивными по числу нулевых переходов (15,2 и 13,3 суток в месяц) являются май и октябрь. Это самые опасные месяцы для хранения изделий с полимерными покрытиями, т.к. атмосферная влага или атмосферный конденсат, затекающие в несовершенства и дефекты защитной изоляции, претерпевают фазовые переходы, превращаясь в лед. Кристаллизация воды сопровождается увеличением ее объема на 9%, а это означает, что дефект или другое полостное несовершенство полимерной защитной оболочки, подвергается разрыву или отслоению. Самым безопасным месяцем в этом отношении здесь является февраль.

Наибольшее число дней с нулевым переходом приходится на умеренно холодную Π_4 климатическую зону (89,6 сут со стандартным отклонением 18,5 сут или $24,5 \pm 5,07\%$). При этом наиболее насыщенными (более 25 сут в месяц) являются апрель и октябрь месяцы; средняя интенсивность (более 10 случаев в месяц) нулевых переходов отличается в марте и мае. И лишь июль месяц здесь безопасен с точки зрения фазовых разрушений.

Таблица 1.5 – Число дней с переходом температуры через нулевое значение

Климатический район	Число дней с переходом температуры через нулевое значение по месяцам, сут												Сумма за год, сут	Стандартное отклонение, сут	Доля дней с нулевым переходом температуры в %
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII			
Холодный, I ₂	0,2	-	0,8	9,2	15,2	4,2	0,2	0,2	6,5	13,3	2,3	0,7	52,6	13,7	14±3,64
Умеренно холодный, II ₄	-	0,1	10,7	25,7	13,8	0,9	-	0,2	8,9	25,1	4,1	0,1	89,6	18,5	24,5±5,07
Умеренный, II ₅	3,6	2,3	6,7	12,3	14,0	1,7	-	-	2,4	11,6	10,1	5,7	70,4	14,4	19,3±2,95

Число дней с нулевым переходом температуры в умеренной П₅ климатической зоне суммарно составляет 70,4 сут со стандартным отклонением 14,4 сут. При этом два месяца – июль и август в этой зоне неопасны с точки зрения циклического промерзания влаги, а наиболее интенсивными (более 10 случаев в месяц) являются апрель-май и октябрь-ноябрь. В общей сложности число нулевых переходов температур в этой зоне составляет $19,3 \pm 2,95\%$ от общегодового баланса.

Еще одним важным климатическим параметром, который необходимо учитывать для предотвращения разрушения полимерных АЗП, является солнечная радиация.

Солнечная радиация представляет собой электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца. Корпускулярная часть солнечной радиации (так называемый «солнечный ветер» - поток протонов, достигающий Земли со скоростью 300-1500 км/с) энергетически невелик по сравнению с электромагнитной составляющей солнечной радиацией.

Электромагнитная составляющая солнечной радиации распространяется со скоростью света и проникает в земную атмосферу в виде *прямого* и *рассеянного* излучения.

Прямая радиация – это прямое воздействие солнечных лучей; рассеянная солнечная радиация – это часть лучей, отклоняющихся от прямого пути из-за молекул газа и примесей, входящих в состав атмосферы. Рассеянная радиация создает дневной свет и придает цвет небу.

Совокупность прямой и рассеянной радиации составляет *суммарную солнечную радиацию*, которая приводит к фотолитическому и фотоокислительному воздействию на полимерный материал.

Фотолитическое воздействие характеризуется избирательным поглощением солнечных лучей – фотонов. Фотоны, внедряясь в структуру полимера, разрывают молекулярные связи, нарушают первоначальную структуру вещества – полимер изменяет цвет, теряет прочность, становится хрупким.

Фотоокислительное воздействие солнечного излучения приводит к перегреву полимерного материала, следствием чего является разрушение химических связей и химическое перерождение вещества, его деградация с потерей всех первоначально заданных свойств.

Радиационная активность рассматриваемых территорий, характеризующаяся энергетической экспозицией прямого S и суммарного Q солнечного излучения, а также его помесечный и годовой баланс B представлены в таблице 1.6.

Как видно из таблицы 1.6, годовой баланс солнечного излучения возрастает по мере перехода из зоны холодного климата I_2 в умеренно холодную II_4 и зону умеренного II_5 климата. При этом отрицательный радиационный баланс в зонах I_2 и II_4 приурочен к октябрю-марту, а в климатической зоне II_5 – к ноябрю-февралю. Максимальная экспозиция прямого солнечного излучения наблюдается в июле для зоны I_2 , а для зон II_4 и II_5 – в июне месяце. Но более системный вред для полимерных покрытий может нанести суммарное солнечное излучение, максимум которого (3600 МДж/м^2) для зоны I_2 наблюдается в июне-июле, для зоны II_4 – в мае-июне ($>500 \text{ МДж/м}^2$) и для зоны II_5 – в мае-августе ($>400 \text{ МДж/м}^2$).

Таким образом, при разработке мер по обеспечению сохраняемости полимерных покрытий труб при длительном хранении их в условиях северного климата необходимо учитывать особенности климатических условий, факторы влияния которых оказывают непосредственное воздействие на техническое состояние и антикоррозионные свойства защитных покрытий.

Таблица 1.6 – Активность солнечного излучения в северных климатических районах

Климатический район	Вид излучения	Энергетическая экспозиция прямого S, суммарного Q и баланс В солнечного излучения по месяцам и за год, МДж/м ²												
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Холодный, I ₂	S	8,4	100,6	339,1	368,7	469,3	544,7	636,9	356,2	159,2	83,8	37,7	0	3101,9
	Q	8,4	62,8	234,6	439,9	561,5	607,6	607,6	393,9	184,4	83,8	20,9	0	3205,4
	B	-41,9	-31,7	-33,5	4,2	234,6	335,2	326,8	196,6	71,2	-20,9	-46,1	-46,1	942,7
Умеренно холодный, II ₄	S	0	71,2	364,5	402,2	519,0	502,8	435,8	222,1	176,0	117,3	4,2	0	2815,7
	Q	0	46,1	217,9	439,9	636,9	653,6	515,4	322,6	180,2	71,2	8,4	0	3092,2
	B	-58,5	-35,7	-25,1	67,0	209,5	456,7	372,9	213,7	62,8	-33,5	-50,3	67,0	1102,1
Умеренный, II ₅	S	33,5	108,9	272,1	356,2	502,8	532,1	494,4	402,2	268,2	268,2	96,4	37,7	3243,1
	Q	58,7	125,7	289,1	356,2	578,2	595,0	595,0	469,3	301,7	301,7	67,0	41,9	3674,6
	B	-29,3	-25,1	16,8	184,4	276,5	284,9	280,7	209,5	117,3	117,3	-25,1	-33,5	1286,4

1.2 Существующие методики оценки параметров сохраняемости полимерных материалов

Как отмечалось, контроль качества антикоррозионных покрытий нефтегазопроводных труб должен сочетать разрушающие и неразрушающие методы испытаний, что позволяет осуществлять непрерывный мониторинг технического состояния изделий на всех этапах их жизненного цикла. Эти методы принципиально различны по физической сути, но взаимодополняемы и аддитивно значимы. При этом основными параметрами, определяющими техническое состояние защитного антикоррозионного покрытия, являются: твердость и номинально допустимая толщина, сплошность и механическая прочность полиэтиленовой оболочки, температурные напряжения и качество ее адгезионного сцепления с поверхностью трубы. Все эти параметры контролируются на стадиях изготовления изделий, приемно-сдаточных операций и длительного хранения.

Для контроля этих параметров существуют стандартные методики, основными из которых являются:

А). Методика определения напряженности полимерного покрытия.

Методика предназначена для проведения испытаний полиэтиленового трехслойного покрытия заводского нанесения с целью определения величины его внутренних напряжений в условиях изменяющейся температуры при атмосферном хранении и производстве сварочных работ.

Сущность метода испытаний.

Сущность метода оценки внутренних напряжений в покрытии заключается в измерении усадки полосы покрытия, отслоенной от трубы, в определении модуля упругости этой полосы и в расчете по этим данным внутренних напряжений.

Испытания проводят при температуре окружающего воздуха минус 40°C, минус 20°C, 0°C, 20°C;

Б). Определение прочности адгезии методом отрыва.

Работоспособность полимерного покрытия, т.е. сохранение функциональных адгезионных свойств в течение срока эксплуатации, зависит не только от возможности прогнозирования или своевременного обнаружения механических дефектов

в конструкции покрытия, но и от качества его адгезионного сцепления с поверхностью трубы. Вне сомнения, адгезионные параметры покрытия являются определяющими и характеризуют качество заводской изоляции в целом. Однако универсального способа определения этого параметра в разных производственных условиях также не существует. В связи с этим разработано несколько способов измерения прочности адгезии полимерных покрытий, в частности механический способ, реализуемый путём отрыва стандартной полосы от поверхности трубы.

Механический способ определения адгезионной прочности полимерных покрытий является стандартным и может быть применён в лабораторных, заводских, складских и трассовых условиях. Его результаты считаются истинными, если выполнены по стандартной методике сертифицированными приборами и квалифицированными специалистами. Недостатком метода является необходимость разрушения конструкции полимерного покрытия при выполнении измерений, что предопределяет его выборочное использование в целях серийного контроля или выявления истинного значения адгезионной прочности в арбитражных, аварийных и других нестандартных ситуациях.

Сущность метода испытаний.

Испытания на прочность адгезии выполняют вырезкой и отслаиванием полосы покрытия от поверхности трубы с фиксацией нагрузки отрыва при постоянном контроле этого процесса [81, 124];

В). Методика механических испытаний.

Для характеристики механической прочности полимерных покрытий используют метод испытаний на разрыв. Порядок испытаний регламентируется ГОСТ 11262 и основан на растяжении образцов защитного полиэтиленового покрытия с установленной скоростью деформирования. Испытания позволяют определить механические характеристики материала покрытия в зависимости от внешних факторов воздействия, срока хранения, пространственной ориентации.

Сущность метода испытаний.

Сущность метода испытаний заключается в подготовке образца из фрагментов защитного покрытия, форма и размеры которого соответствуют требованиям

ГОСТ 11262. Фрагмент покрытия для изготовления образца отслаивается механическим образом от металла трубного изделия в соответствии с разработанными требованиями. Далее образцы испытываются на разрыв в специальной разрывной машине с постоянной скоростью раздвижения зажимов, установленной нормативной документацией в зависимости от типа покрытия (нормальное Н; теплоустойчивое Т; специальное С). По результатам испытаний вычисляют значения прочности при растяжении σ_k , предел текучести при растяжении σ_T , условный предел текучести $\sigma_{рту}$, а также значения относительного удлинения при максимальной нагрузке $\epsilon_{рм}$, при разрыве $\epsilon_{рр}$ и при пределе текучести $\epsilon_{рт}$;

Г). Методика определения твердости по Шору или Бринеллю.

Как известно, твердость эластичных материалов определяется по методу Шора или Бринелля

Сущность метода Шора

Испытания проводятся по ГОСТ 24621. Метод заключается в измерении глубины вдавливания в эластичный материал стального индентора, выполненного в виде угольчатого стержня, под действием силы в заданных условиях. Твердость при вдавливании обратно пропорциональна глубине вдавливания и зависит от модуля упругости и вязкоэластичных свойств материала. На получаемые результаты влияет форма индентора и прилагаемая к нему сила, поэтому между результатами, получаемыми при испытаниях на твердомерах Шора разных типов или других приборах для измерения твердости, прямой зависимости не наблюдается.

Сущность метода Бринелля

В связи с ограниченностью метода Шора для определения твердости полимерных покрытий используют известный метод Бринелля, предназначенный для испытаний твердости пластмасс.

Сущность метода

Исследования проводятся по ГОСТ 4670. Метод основан на вдавливании шарика под действием заданной нагрузки в поверхность образца для испытания. Глубина вдавливания измеряется под нагрузкой. Площадь поверхности отпечатка

рассчитывается по его глубине. Твердость при вдавливании шарика рассчитывается по соотношению

$$HB = \frac{F}{S_{от}}, \quad (1.1)$$

где F – приложенная нагрузка, Н;

$S_{от}$ – площадь поверхности отпечатка, мм².

Все эти методики являются стандартными и необходимыми для выполнения исследований по совершенствованию методов обеспечения сохраняемости свойств полимерных покрытий в атмосферных условиях северного климата и должны быть включены в методологический комплекс диссертационной работы.

1.3. Изменение сохраняемости свойств полимерных покрытий в условиях атмосферных воздействий

К основным атмосферным факторам, которые влияют на прочностные свойства защитного покрытия, относятся воздействия температуры, света, кислорода и влаги. Поскольку все эти факторы действуют периодически (зональная, суточная и сезонная периодичность), то атмосферное старение носит ярко выраженный циклический характер. Это означает, что в защитных покрытиях возникают циклические температурно-влажностные напряжения, которые приводят к развитию процессов усталости в теле покрытия и клеевом шве.

Качество защитного покрытия заводского нанесения оценивают исходя из анализа совокупности трех прочностных показателей: характеристик механических свойств, величины внутренних напряжений и прочности адгезии покрытия с металлом труб. От того, в какой пропорции будут находиться эти показатели, будет зависеть дальнейшее эксплуатационное поведение защитного покрытия.

Если внутренние сжимающие напряжения в покрытии будут сопровождаться недостаточными характеристиками пластических свойств материала покрытия, то сдерживаемая деформация может привести к растрескиванию покрытия. Если растягивающие напряжения превысят прочность адгезии покрытия, то может произойти отслаивание покрытия от металла трубы. Ориентация остаточных

напряжений в значительной степени зависит от общего направления движения материала покрытия при нанесении.

Очевидно, что остаточные напряжения в покрытии играют и положительную роль, в том случае, если остаточные напряжения совпадают по направлению с внешней нагрузкой, их величина должна быть вычтена из величины допустимого напряжения. Если же остаточные напряжения направлены противоположно внешней нагрузке, то величина допустимых напряжений не изменяется, а при снятии остаточных напряжений прочность покрытия будет повышаться.

Полиэтиленовые изоляционные покрытия в заводских условиях наносятся методом экструзии на стальные трубы с температурой 180-240 °С. После нанесения покрытие быстро охлаждается водой до температуры 40-50 °С.

В связи с тем, что коэффициент термического расширения полиэтилена на два порядка превышает коэффициент термического расширения стали, при охлаждении трубы в покрытии возникают внутренние сжимающие напряжения как результат искусственного сдерживания процесса усадки, при этом возникающие напряжения носят объемный характер. Так как охлаждение покрытия выполняется с наружной его поверхности, то происходит образование твердой кристаллической наружной оболочки покрытия раньше, чем полностью затвердеет вся масса по сечению покрытия. Образование твердого поверхностного слоя, также в свою очередь, препятствует тому, чтобы изменения в объеме покрытия протекали свободно, без затруднений.

Растрескивание покрытий наступает тогда, когда величина внутренних напряжений становится больше или равной прочности покрытия при разрыве, то есть $\sigma_{вн} \geq [\sigma]$.

Термические внутренние напряжения в любой точке объема полимерного покрытия определяются известным уравнением [118]:

$$\sigma_{вн} = E_{пэ} \cdot (\alpha_{пэ} - \alpha_{ст}) \cdot \Delta T / (1 - \mu), \quad (1.2)$$

где $E_{пэ}$ – модуль упругости покрытия,

$\alpha_{\text{ПЭ}}$ и $\alpha_{\text{СТ}}$ – коэффициенты линейного термического расширения полиэтилена и стали, соответственно;

μ – коэффициент Пуассона для полиэтилена;

ΔT – интервал температур, для которого рассчитываются внутренние напряжения.

По собственным оценкам расчетная величина внутренних напряжений в покрытии в интервале температур $\Delta T = 50$ °С составляет не более 3 МПа. Эта величина в три раза меньше нормированной по ГОСТ 16337-77 [1] (предел текучести полиэтилена при растяжении составляет $\sigma_T=9,3$ МПа), что дает значительный запас прочности полиэтиленовых покрытий в нормальных условиях.

Следует заметить, что распределение напряжений по границе контакта покрытия с металлом трубы может быть крайне неоднородно и концентрироваться на ограниченной протяженности, что способствует иницированию разрушения соединения в данной области покрытия.

Активное развитие процессов увеличения внутренних напряжений в покрытиях начинается в области температур ниже минус 20 °С [127], одновременно при этом полиэтиленовое покрытие становится хрупким из-за перехода аморфной фазы полиэтилена в стеклообразное состояние.

Так, под воздействием низкой температуры воздуха и вследствие особых свойств используемого для изоляции полиэтилена высокой плотности при складировании и зимнем атмосферном хранении труб наблюдалось массовое растрескивание покрытия на концах труб (рисунок 1.1).

Было установлено, что трещины в покрытии иницируются с его края при температурах, близких к температуре стеклования (для полиэтилена менее минус 40 °С), краевые деформации приводят к возникновению в материале хрупких трещин, направление развития которых было ориентировано преимущественно вдоль оси трубы.

Очевидно, что на трубах с заводским покрытием именно состояние краевой зоны характеризует качество нанесения покрытия. Это обусловлено наличием

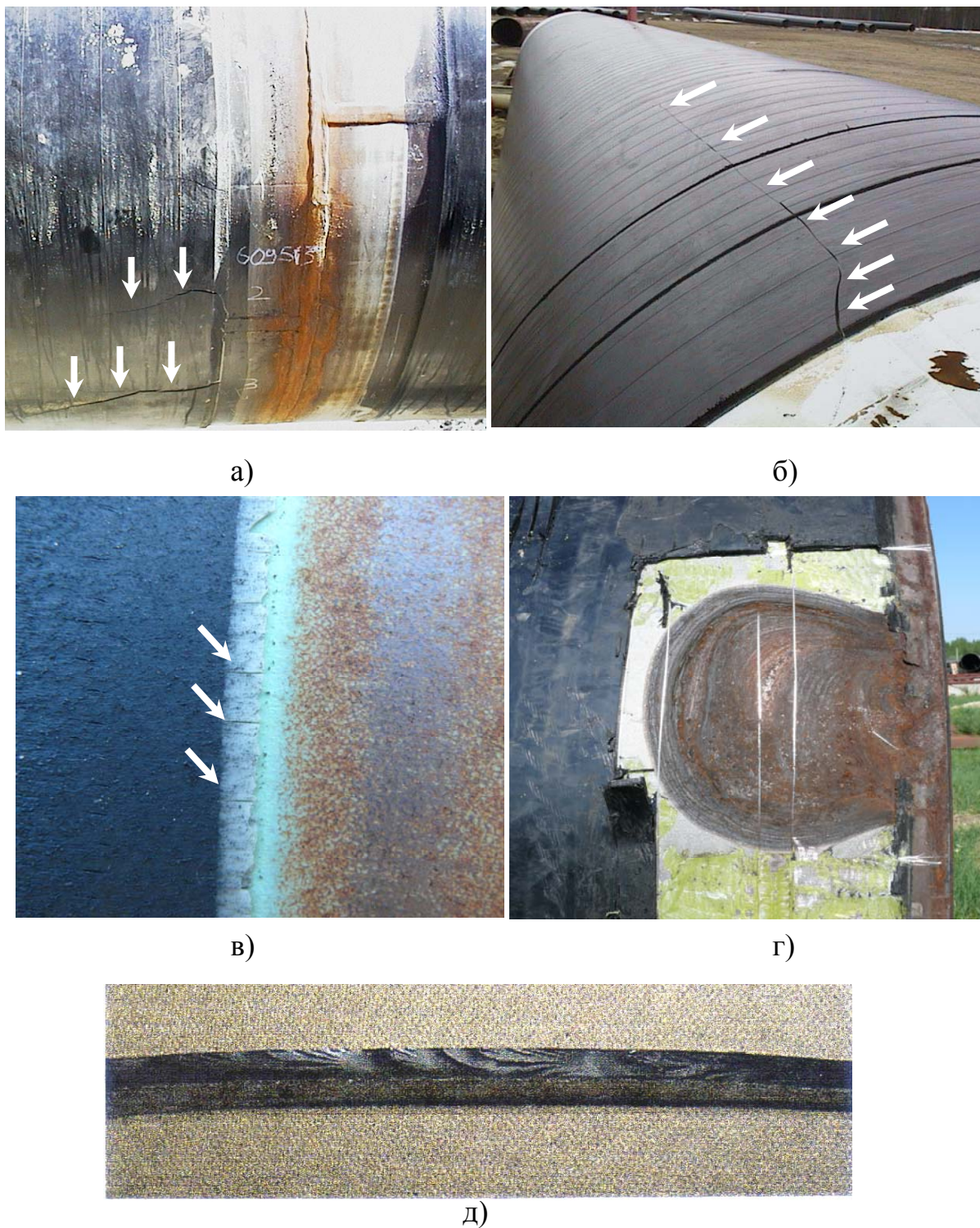


Рисунок 1.1 – Общий вид трещин в полиэтиленовом покрытии заводского нанесения (а-в), отслаивание покрытия на кромке (г) и хрупкий излом по толщине покрытия (д)

границы контакта покрытия с металлом трубы, которая в отсутствие диффузионного барьера, который обеспечивает полиэтиленовый слой, напрямую контактирует с внешней средой, содержащей воду и кислород. Здесь также расположена

зона концентрации внутренних напряжений в полимерном покрытии, что создает дополнительную механическую напряженность в адгезионном соединении.

При достаточности пластических свойств материала покрытий, растрескивание локализуется в области кромки покрытия и обусловлено воздействием солнечного ультрафиолетового излучения, которое вызывает процессы фотохимической деструкции (фотолиз) полимеров.

Причем замечено, что фотолиз полиуретанов и полиэтиленов на поверхности раздела с твердым телом происходит интенсивнее, чем в свободной пленке. Следствием фотолиза является изменение цвета материала покрытия (выцветание), а также изменение его механических свойств - материал становится хрупким и растрескивается, даже без внешней механической нагрузки. Следует заметить, что при больших сроках хранения труб с покрытиями в атмосферных условиях, выцветание и изменение свойств покрытий может происходить, несмотря на вводимый в состав полиэтиленовых покрытий краситель на основе сажи, который является хорошим УФ – стабилизатором.

Из этого анализа следует, что основные атмосферные факторы воздействия (температура, свет, кислород и влага) оказывают разрушительное влияние на эксплуатационные характеристики защитных покрытий.

При этом проявлению разрушительных дефектов предшествуют сложные макромолекулярные и физико-химические процессы, ослабляющие прочностные, пенетрационные и адгезионные свойства покрытий. Эти процессы предразрушения формируются латентно (скрытно) или практически мгновенно (например, при критических температурах), но закономерности их развития применительно к антикоррозионным полимерным покрытиям изучены пока в недостаточной мере.

Между тем, по текущему состоянию указанных прочностных характеристик (прочность, твердость, адгезия) можно судить об остаточном сроке сохраняемости защитных покрытий в конкретных атмосферных условиях. Это важно для выбора оптимального времени обновления хранящихся запасов труб с полимерной антикоррозионной защитой.

1.4. Существующие методы прогнозной оценки сроков сохраняемости полимерных покрытий

В соответствии с ГОСТ Р 52568-2006 [128] трехслойные полиэтиленовые покрытия (ЗЭП) для труб диаметром 1420 мм включительно предназначены для подземных трубопроводов с температурой продукта менее 60⁰С (вид покрытия – нормальный Н) или более 60⁰С (вид покрытия – теплостойкий Т), а также для участков трубопроводов, прокладываемых методом наклонно-направленного бурения и протаскивания (вид покрытия – специальный С). ГОСТом [128] регламентирована температура эксплуатации этих покрытий в диапазонах:

- тип Н: от минус 40⁰С до плюс 60⁰С;
- тип Т: от минус 50⁰С до плюс 80⁰С;
- тип С: от минус 60⁰С до плюс 60⁰С.

В ГОСТе [128] регламентированы также требования к трехслойным полимерным покрытиям, состоящие в том, что они должны включать (п.4.3.1):

- адгезионный подслоу на основе эпоксидных порошковых (толщина не менее 60 мкм) или жидких (толщина не менее 20 мкм) красок;
- клеящий подслоу на основе термоплавких полимерных композиций толщиной не менее 150 мкм при порошковом нанесении и не менее 200 мкм – при нанесении методом экструзии;
- наружный слой на основе экструзионного полиэтилена.

Однако никаких указаний на сроки сохраняемости или методы их прогнозирования в отношении послойных материалов трехслойного покрытия в нормативном документе [123] не содержится. При этом регламентированы технические требования к наружному покрытию труб, включающую качественную и количественную оценку (см. п.п. 1.1) по 16 оценочным параметрам, в том числе по внешнему состоянию покрытия, его толщина и диэлектрической сплошности, прочности адгезии к стали в воздухе и в воде, величина катодного отслаивания, переходному сопротивлению в 3%-ном растворе соли, значению пенетрации при разных температурах, стойкости к растрескиванию, воздействию ультрафиолето-

вой радиации, термоциклированию, относительному удлинению, термостабильности и прочности при разрыве и ударе.

Из анализа этих требований можно заключить, что до тех пор, пока количественные значения параметров не выходят за пределы границ, установленные в таблице 3 ГОСТ Р 52568-2006 [128], полимерное покрытие считается работоспособным, но время сохраняемости этих параметров в процессе жизненного цикла покрытия не регламентируется. Существуют лишь экспертные оценки, заключающиеся в том, что срок эксплуатации таких покрытий может превышать 30 лет [125] и достигать 50-ти [126], но никаких научных обоснований или методик прогнозирования сроков сохраняемости существующая нормативная документация не содержит.

Между тем, существует ряд исследований, результаты которых позволяют оценить вероятные сроки сохраняемости свойств полимерных материалов под воздействием внешних атмосферных факторов.

Сохраняемость параметров полимерных материалов по существующим в настоящее время представлениям можно оценивать по изменению их физико-механических свойств в процессе атмосферных воздействий в конкретных климатических условиях. Количественным показателем изменения свойств полимеров в этом случае является коэффициент сохраняемости K_t

$$K_t = \frac{x_t}{x_0} \quad (1.3)$$

где x_0 , x_t – соответственно значение параметра до и после испытания.

Однако вследствие разброса физико-механических характеристик полимерных материалов в процессе старения и выбор показателей, характеризующих работоспособность изделий и в то же время достаточно чувствительных к изменению свойств, является в ряде случаев весьма затрудненным. Кроме того, нет однозначности в том, что следует считать критерием устойчивости коэффициента сохраняемости. В работах [5, 4, 13] предложено в качестве такого критерия выбрать 50 % x_0 (см. выражение (1.1)). Естественно, что такие предложения основаны на субъективных предпосылках, не имеющих в основе физической сущности.

Так, если в качестве показателя изменчивости свойств выбрать относительное удлинение при разрыве ε_p , то для эластичных материалов оно может меняться от 30 до 1000%, а критическое значение этого параметра при коэффициенте сохранения 0,5 будет меняться от 15 до 500 %. Очевидно, что при $\varepsilon_p = 500$ % материал будет работоспособным. Если же в качестве показателя старения выбрать разрушающее напряжение при растяжении, то при достижении σ_p половины первоначального значения, полиэтилен становится абсолютно хрупким [14, 15].

Следовательно, неоднозначность изменения физико-механических свойств полимеров в процессе старения требует более деликатного подхода к определению показателя сохраняемости материалов в части выбора характерного параметра, ответственного за работоспособность материала и достаточно чувствительного к изменению свойств, а также определения критерия его сохраняемости.

Решение этой задачи осложняется еще и тем, что используемые в настоящее время существующие оценки сохраняемости отражают совокупность как необратимых процессов деструкции и структурирования макромолекул, сопровождающихся изменением молекулярной, надмолекулярной и фазовой структур полимеров, так и обратимых, связанных с рекристаллизацией или ускорением (замедлением) релаксационных процессов вследствие влияния факторов окружающей среды. Это приводит к тому, что некоторые характеристики пластмасс в процессе испытания не меняются либо меняются немонотонно. Поэтому решение этой довольно сложной задачи может быть достигнуто только на основе комплексного изучения изменения релаксационных, деформационно-прочностных свойств, а также структуры материала в различных эксплуатационных условиях.

Так, изучение изменения структуры и физико-механических свойств полиэтилена показало [15], что предел текучести σ_t и удлинение при пределе текучести ε_t вплоть до хрупкого разрушения образцов при климатических испытаниях в Якутске практически остаются неизменными, а разрушающее напряжение при растяжении σ_p и относительное удлинение при разрыве ε_p уменьшаются соответственно до предела текучести и до удлинения при пределе текучести (рисунок 1.2). После этого наблюдается катастрофическое снижение прочности.

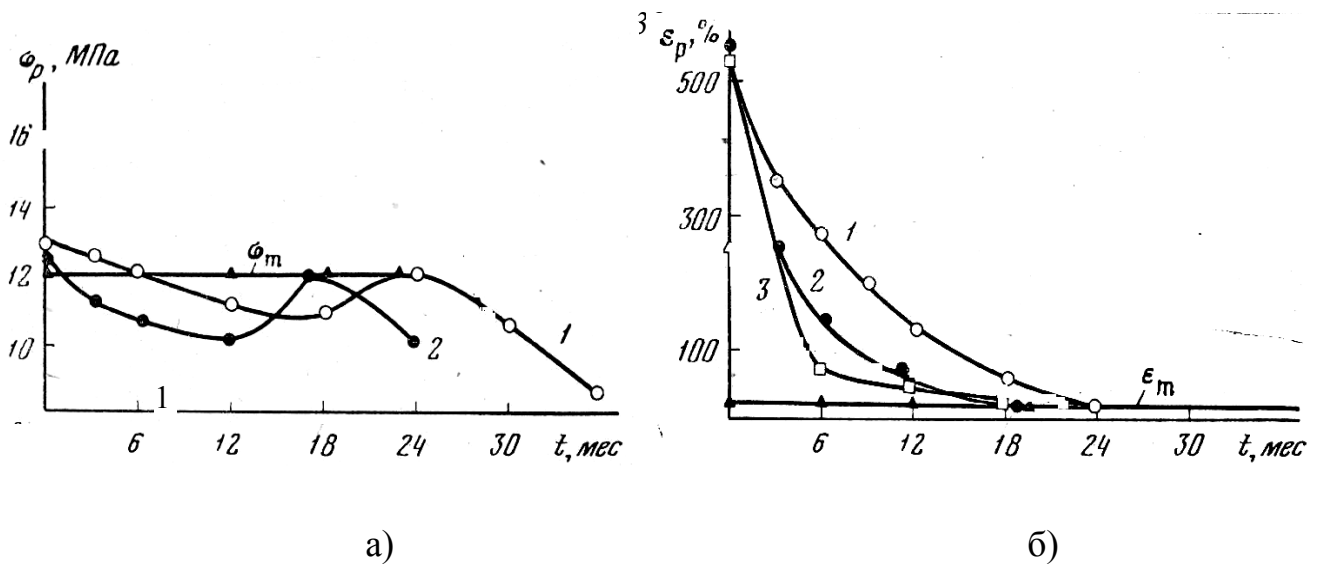
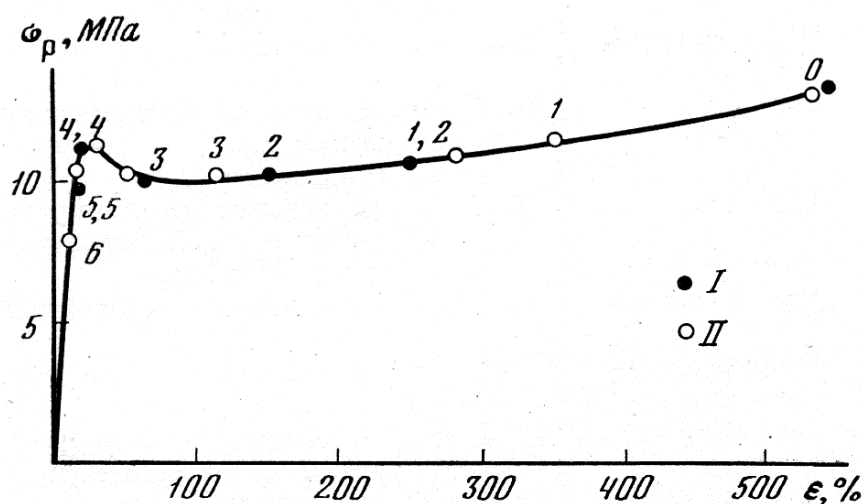


Рисунок 1.2 – Изменение σ_p (а) и ε_p (б) полиэтилена 16802-070 от времени испытания в климатических условиях: 1 – Якутск, 2 – Батуми, 3 – Ташкент (по данным И.С. Филатова.)

На основании этих исследований [16] было предложено для материалов, находящихся в высокоэластическом состоянии, выбрать в качестве характерного параметра относительное удлинение при разрыве, а в качестве критерия сохраняемости – удлинение при пределе текучести. Тогда процесс изменения свойств можно характеризовать уменьшением ε_p до ε_t , что наглядно иллюстрируется изменением деформационной кривой от времени испытания (рисунок 1.3).



Точки испытания: 1 – 3 месяца; 2 – 6 месяцев; 3 – 12 месяцев; 4 – 24 месяца;
5 – 30 месяцев; 6 – 36 месяцев

Рисунок 1.3 – Изменение диаграммы деформирования полиэтилена низкой плотности 16802-070 в климатических условиях Якутска (I) и Батуми (II), (по данным И.С. Филатова)

Известно, что удлинение при пределе текучести практически не зависит от температуры и скорости испытания, степени кристалличности и характера надмолекулярной структуры материала, условий воздействия окружающей среды (рисунок 1.4), в то время как предел текучести, разрушающее напряжение при растяжении и относительное удлинение при разрыве заметно изменяются [17-39]. Все

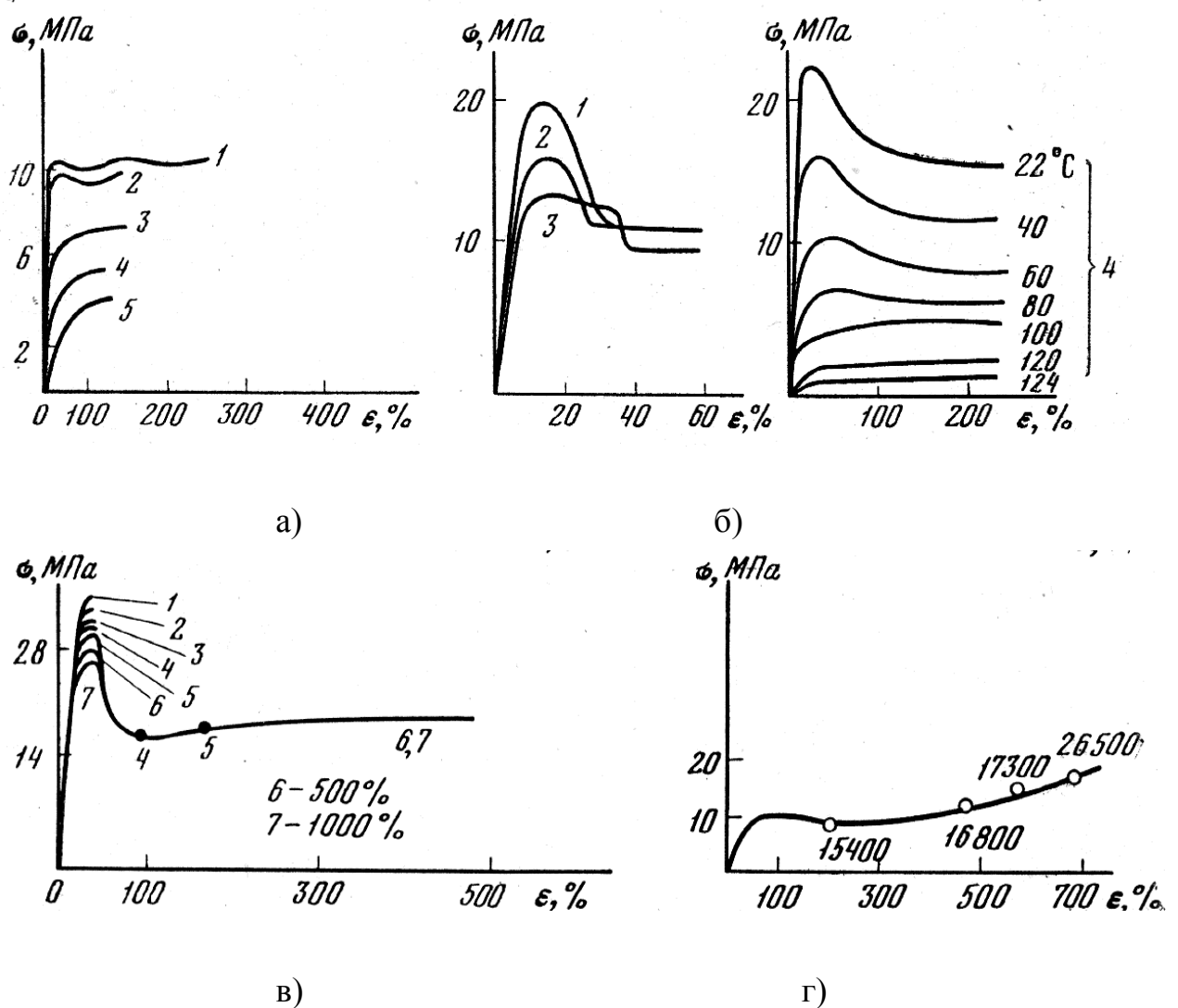


Рисунок 1.4 – Деформационные кривые полиэтиленовых материалов: а) ПЭВД (1 – молекулярная масса 18000 – 25000 (при 22°C), 2 – 5 молекулярная масса 25000 – 35000 (при 20, 40, 61, 80°C соответственно), скорость испытания 48 мм/мин); б) ПЭВД (1-4 – 50; 5; 0,5 (при 20 °C) и 50 мм/мин соответственно); в) ПЭВД (1 – 7 – плотность 0,9705; 0,9663; 0,9642; 0,9635; 0,9605; 0,9570 и 0,9563 г/см³ соответственно при скорости испытания 1,27 мм/мин); г) ПЭНП (скорость испытания 1,27 мм/мин) (по данным И.С. Филатова.)

это свидетельствует об универсальности данного параметра и о правильности выбора его как критерия сохраняемости полимерных материалов, так как при уменьшении удлинения при разрыве в результате воздействия окружающей среды до значения, равного или меньшего удлинения при пределе текучести, материал становится хрупким.

Таким образом, для полимерных материалов в качестве характерного параметра при оценке их климатической сохраняемости целесообразно выбрать относительное удлинение $\varepsilon(t)$ при разрыве, а в качестве критерия сохраняемости – относительное удлинение при пределе текучести. Удлинение при пределе текучести всегда можно определить, изменяя скорость и температуру испытания или частично состав материала.

Тогда с учетом (1.1) показатель климатической сохраняемости $\alpha(t)$ для полимерных материалов можно представить в виде относительного параметра:

$$\alpha(t) = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_t}{\varepsilon_0 - \varepsilon_t}, \quad (1.4)$$

где $\varepsilon(t)$ – относительное удлинение испытуемого материала в момент времени

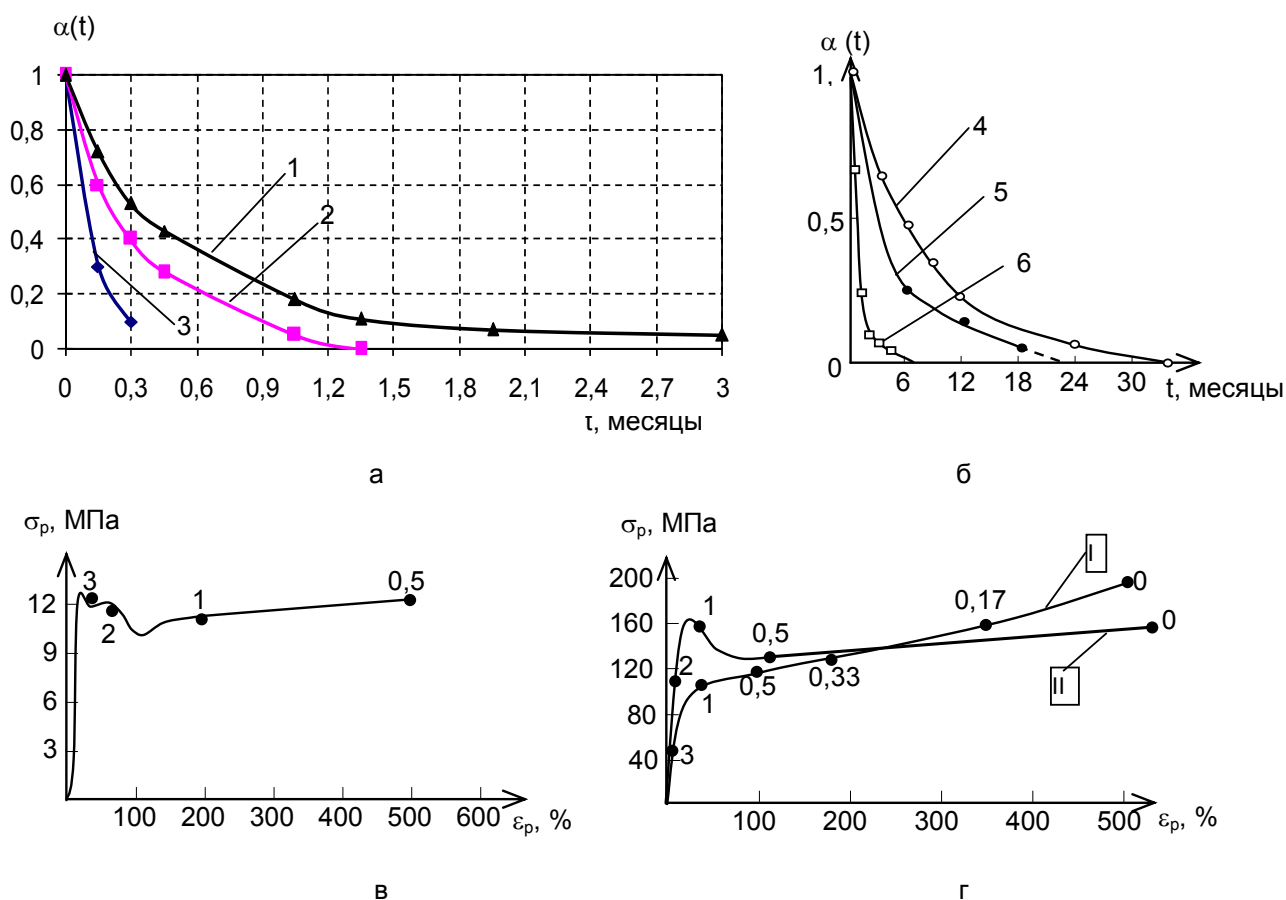
t – испытания образцов, ед.; ε_0 – начальное значение относительного удлинения образцов, ед.;

ε_t – удлинение при пределе текучести, ед.

Введение относительного показателя климатической сохраняемости позволяет, с одной стороны, сравнивать климатическую устойчивость различных полимерных материалов по величине $\alpha(t)$ при одном времени испытания в различных климатических условиях, с другой – прогнозировать время работоспособности или сохраняемости их свойств из решения уравнения $\alpha(t) = 0$.

Пример использования относительного показателя $\alpha(t)$ для прогнозной оценки сохраняемости свойств полимерных покрытий можно проиллюстрировать на результатах исследований по старению полиэтилена под воздействием ультрафиолетового и окислительного воздействия (рисунок 1.5).

На рисунке 1.5 представлены результаты оценки старения полиэтиленов в зависимости от толщины образцов под воздействием климатических факторов и солнечной радиации.



1 – 0,2 мм; 2 – 0,1 мм; 3 – 0,03 мм; 4 – резкоконтинентальный климат; 5 – умеренный климат; 6 – в камере солнечной радиации

Рисунок 1.5 – Старение полиэтиленов низкой плотности: а) влияние толщины образца на старение полиэтилена 16802-070; б) влияние различных климатических условий на старение полиэтилена 16802-070 ; в) деформационная кривая для полиэтилена 11502-070; г) деформационные кривые для полиэтилена 10812-20 (I) и 16802-70 (II) в камере солнечной радиации (цифры на кривых – длительность испытаний, месяцы)

В полимерных защитных покрытиях под действием светового излучения и кислорода накапливаются изменения в их структуре и физико-химических свойствах, называемые общим термином – старение. При этом физико-механические и диэлектрические свойства материалов ухудшаются. Изменение молекулярной структуры приводит к изменениям в свойствах полиэтиленового покрытия: теряется эластичность, повышается жесткость и хрупкость, снижается механическая

прочность, ухудшаются диэлектрические показатели. В процессе старения у полиэтиленов изменяется внешний вид. Наблюдается потеря блеска, изменяется цвет, гладкая поверхность становится шероховатой, появляется сетчатая трещиноватость.

Главная причина старения полиэтилена – окисление молекулярным кислородом, которое особенно быстро протекает при повышенных температурах. Окисление часто ускоряется и форсируется ультрафиолетовым (световым) излучением, примесями металлов переменной валентности, которые могут присутствовать в покрытии из-за коррозии труб или неполного удаления катализатора из него после окончания синтеза. По типу активатора и основного агента, вызывающих разрушение полиэтилена, различают следующие виды старения:

- тепловое;
- термоокислительное;
- световое;
- атмосферное (озонное).

Чаще всего старение связано с распадами макромолекулярных цепей, приводящими к образованию значительного количества низкомолекулярных фракций, что ведет к снижению средней молекулярной массы и расширению молекулярно-массового распределения. В большинстве случаев комбинации нескольких из перечисленных процессов протекают в материале одновременно. В итоге полиэтиленовые покрытия теряют свои важные эксплуатационные характеристики.

Как видно из рисунка 1.5, сохраняемость свойств испытанных материалов оценивается параметром $\alpha(t)$ во времени. Это означает, что существует принципиальная возможность временного прогнозирования динамики потери свойств полимеров под влиянием атмосферных факторов.

Существенное влияние на устойчивость полиэтиленового покрытия к старению оказывают резкие суточные колебания температуры, особенно в зоне холодного климата, где при достаточно низких температурах (от -40 до -5°C) возможен перепад температур в покрытии до $50 - 60^{\circ}\text{C}$ [40, 44, 46]. Скорость роста нежела-

тельных изменений структуры полиэтиленовых покрытий увеличивается при приложении к ним неразрушающих механических напряжений, приводящих к развитию деформаций, особенно при циклическом изменении нагрузки.

Для процессов старения, на основании большого количества экспериментальных данных, установлены некоторые закономерности и найдена определенная корреляция в изменении свойств полимерных материалов в атмосферных и лабораторных условиях [47 – 50, 5, 13, 14, 51 – 56]. Установлено, что свойства полимеров при старении изменяются по закону [15]:

$$x = A \exp[B(t - C)], \quad (1.5)$$

где x – выбранное свойство;

A, B – параметры старения;

C – константа;

t – время старения, годы.

Существует общая зависимость [15]

$$x = C + A \exp(-Bt^n), \quad (1.6)$$

где A, B, C, n – константы.

Анализ процессов старения показывает, что в общем виде изменение эксплуатационных свойств, которые однозначно связаны с процессами деструкции, диффузии, структурирования и сорбции, должно происходить по экспоненциальному закону. Зная константы A, B, C и n решая уравнение (1.6) относительно t , можно получить выражение для прогнозной оценки времени сохраняемости эксплуатационных свойств полимерных материалов в условиях резких суточных колебаний температуры.

Существуют исследования по оценке атмосферостойкости полимерных материалов во времени.

Согласно ГОСТ 13518 [59] за стойкость полиэтилена к растрескиванию принимают время в часах от начала испытания до появления трещин у 50% образцов. При этом срок сохраняемости свойств полимерного материала составит:

$$t_{ср} = \ln \alpha(t) / K. \quad (1.7)$$

Для сравнения качества полимерных материалов по их атмосферостойкости используют категории климатической устойчивости. Эти категории оценивают относительным показателем сохраняемости $\alpha(t)$, уровень которого, для высокой, средней и низкой категорий, соответственно равен $> 0,5$; $0,2 - 0,5$; $< 0,2$ [60].

Сравнение данных по старению в атмосферных условиях какого-либо климата и в искусственном климате, моделирующем тот же самый климат, при одинаковом значении относительного показателя $\alpha(t)$ дает возможность установить ускорение старения в искусственном климате:

$$t_a = qt_i, \quad (1.8)$$

где t_a и t_i – долговечность в атмосферных и искусственных условиях соответственно;

q – показатель ускорения.

При этом необходимо учитывать, что полностью имитировать любые длительные погодные условия в лабораторной практике не представляется возможным, так как невозможно практически воспроизвести мгновенные и суточные изменения спектрального состава и интенсивности солнечного облучения, колебания влажности на поверхности изделия, которая в сильной степени зависит от характера облучения [61]. В лучшем случае удастся воспроизводить мгновенные и суточные колебания температуры воздуха, на основе чего и созданы надежные методы прогнозирования старения при складском хранении [62-73].

Следует также упомянуть о возможной оценке времени фотохимической деструкции полимерных материалов.

Фотохимическая деструкция представляет собой разрушение макромолекул под влиянием света. Особенно глубокая деструкция полиэтилена происходит под влиянием ультрафиолетовых (УФ) лучей, характеризующихся длиной волны не менее 400 нм. Энергия кванта УФ-излучения превышает энергию С–С-связи макромолекулы и не зависит от температуры. Поэтому фотодеструкция может развиваться даже при относительно низких температурах, ускоряясь и углубляясь в присутствии кислорода. Фотохимическая деструкция является радикально-цепным процессом и, в силу малой проникающей способности УФ-излучения,

происходит преимущественно в поверхностных слоях полиэтилена. При этом происходит охрупчивание полиэтилена вследствие уменьшения молекулярной массы.

Более тщательное изучение процессов фотодеструкции полиэтилена показывает, что возникающие в процессе деструкции свободные радикалы, являясь активными центрами инициирования процесса разрыва макроцепей, способствуют лавинообразному разрушению полиэтилена в более глубоком слое образца. При низких температурах, когда способность рекомбинации свободных радикалов резко снижается [42], процессы деструкции полиэтилена под действием свободных радикалов проходят значительно глубже. Все это приводит к резкому уменьшению молекулярной массы, появлению хрупкости и быстрому ухудшению эксплуатационных свойств.

Полиэтилен высокого давления характеризуется в целом высокой стойкостью при температурах до 60°C. Однако подвержен старению и окислительному разрушению под действием активной части солнечной радиации, ионизирующего излучения. После облучения этот полимер полностью теряет способность растворяться в органических растворителях, приобретает упругость, причем модуль упругости может увеличиться на 200-250% с нарастанием его хрупкости. Эти изменения свойств отражают образование поперечных связей, хотя в кристаллизованном полиэтилене между цепями молекул всегда действуют слабые ван-дер-ваальсовы силы.

Согласно [45] процесс фотодеструкции описывается следующим выражением:

$$\frac{1}{P_t} - \frac{1}{P_0} = \frac{KI_0t}{ml}(1 - el) \quad (1.4)$$

где P_t , P_0 – соответственно начальная средняя и средняя в момент времени t степень полимеризации;

K – константа скорости процесса, c^{-1} ;

I_0 – интенсивность УФ-излучения, Вт/м²; m – доля мономера в единице объема образца, $m = 0,8$;

l – толщина слоя покрытия, м; a – коэффициент поглощения полиэтиленового покрытия, $a = 0,8$.

Преобразовав (1.4), получим выражение для определения времени сохраняемости t_c свойств полимера при изменении его состояния от P_t до P_0 :

$$t_c = \frac{\left(\frac{1}{P_t} - \frac{1}{P_0} \right) ml}{kI_0(1 - e^{-al})}. \quad (1.5)$$

При соответствующей постановке задачи выражение (1.5) может служить для оценки сроков сохраняемости полимерного покрытия и его остаточного ресурса.

Однако для полимерных материалов практически невозможно в настоящее время оценить срок сохраняемости свойств, так как сложные процессы длительного атмосферного старения и разрушения полимеров еще полностью не изучены, а обратимые изменения свойств практически не исследованы. Срок сохраняемости полимерного материала представляет собой сложную функцию начальных значений, скорости изменения и критических (предельных) значений характерных параметров, условий окружающей среды и приложенных нагрузок:

$$t_c = \left(\bar{x}, \bar{\sigma}, \bar{x}_{кр}, \bar{\sigma}_{кр}, \frac{\partial \bar{x}}{\partial t}, \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t}, P, T, \phi, \nu, \delta \right), \quad (1.9)$$

где \bar{x} – среднее значение характерного параметра, (для данного случая – относительное удлинение испытываемого материала ед.);

$\bar{\sigma}$ – дисперсия характерного параметра, ед.²;

$\bar{x}_{кр}, \bar{\sigma}_{кр}$ – критические значения характерного параметра и его дисперсии, ед., ед.²;

$\frac{\partial \bar{x}}{\partial t}, \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t}$ – скорость изменения характерного параметра и его дисперсии соответственно, ед./с, ед.²/с;

T – температура, К;

ϕ – влажность, ед.;

ν – облучение, Вт/м²;

δ – коэффициент диффузии активно-химической среды, м²/с;

P – нагрузка, Па.

Между тем, в условиях длительного атмосферного хранения проблема сохранения параметров полимерных покрытий в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52568-2006 [128] является актуальной не только в техническом, но и в экономическом аспектах, так как существуют значительные резервные запасы труб с полиэтиленовым покрытием, сроки хранения которых установлены экспертно и не имеют пока научного обоснования.

Разработка методики прогнозирования сроков сохранения полимерных покрытий при атмосферном хранении в условиях северного климата является одной из задач диссертационной работы.

1.5. Существующие методы обеспечения сроков сохранения полимерных покрытий в атмосферных условиях северного климата

В работе [118] установлено, что сохранение свойств полимерных покрытий в условиях атмосферных воздействий может быть обеспечена только при оптимальном температурном режиме хранения. Это видно из статистической зависимости внутренних напряжений полимерного покрытия в функции температурных воздействий $\sigma_{вн} = f(T)$, приведенной на рисунке 1.6.

Как видно, значения внутренних напряжений $\sigma_{вн}$ в зависимости от температуры T внешней среды изменяются с доверительной вероятностью $R^2 = 0,9$ в соответствии с уравнением, Н/мм²:

$$\sigma_{вн} = -8 \cdot 10^{-6} T^3 + 1,9 \cdot 10^{-3} T^2 - 3,5 \cdot 10^{-2} T + 1,28. \quad (1.10)$$

При этом прочность адгезионного сцепления G определяется по формуле, Н/см:

$$G = -12,397 \sigma_{вн} + 112,03 \quad (1.11)$$

Подставив в (1.11) нижнее допустимое значение адгезионной прочности, равной в соответствии с ГОСТ 6.902-2005 [129] не менее $G^{дон} = 70$ Н/см, можно рассчитать максимально допустимое значение внутренних напряжений $\sigma_{вн}^{дон}$ при которых полимерные покрытия остаются работоспособным:

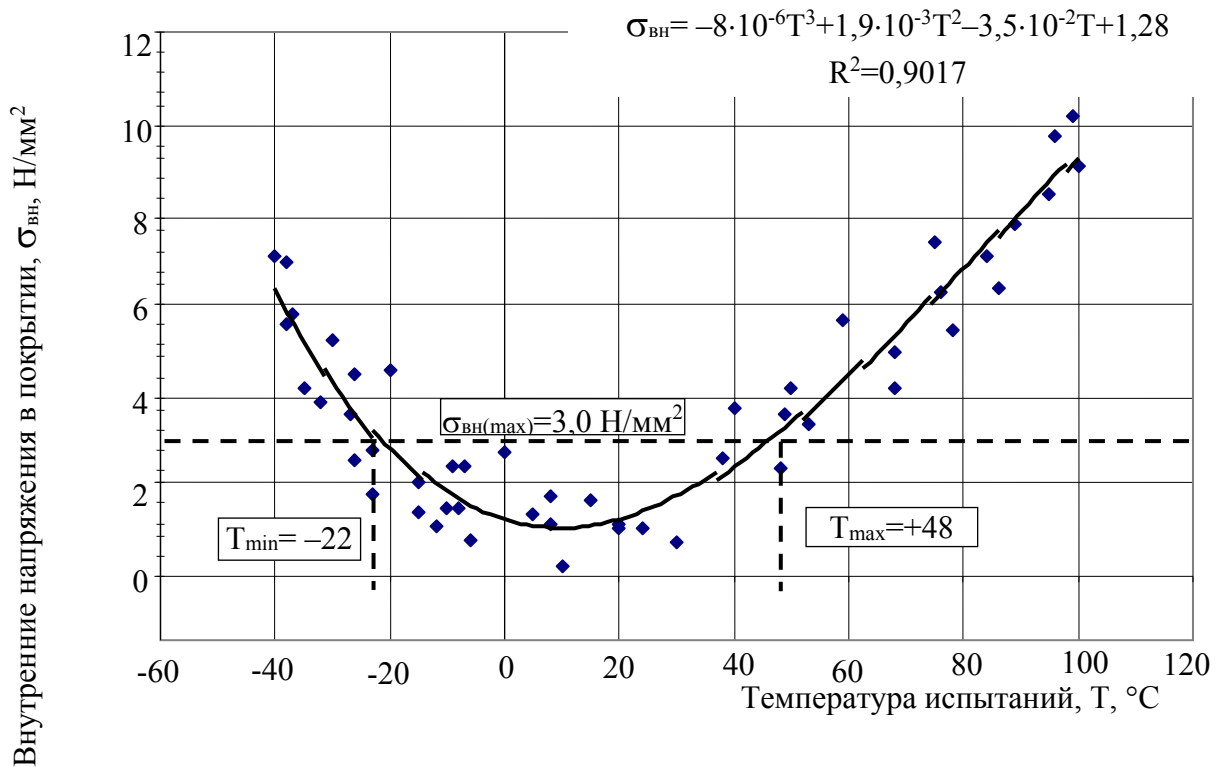


Рисунок 1.6 – Зависимости адгезионной прочности G от температуры испытания T

$$\sigma_{вн}^{\text{доп}} = -\frac{G^{\text{доп}} - 112,03}{12,397} = 3,39 \text{ Н/мм}^2$$

Подставив полученное значение $\sigma_{вн}^{\text{доп}} = 3,39 \text{ Н/мм}^2$ в уравнение (1) и решив кубический полином относительно T , получим предельные значения безопасных температур хранения полимерных покрытий в атмосферных условиях северного климата. Эти значения составят диапазон от $T_{\text{min}} = -22^\circ\text{C}$ до $T_{\text{max}} = +48^\circ\text{C}$, что хорошо иллюстрируется рисунком 1.6. Исходя из этого рисунка и выражений (1) и (2), можно видеть, что в области отрицательных температур при понижении их от минус 22°C до минус 40°C происходит увеличение внутренних напряжений в 1,84 раза (от 3,99 до 6,23 Н/мм^2) и уменьшение адгезионной прочности сцепления в 33 раза от допустимого значения (от 70 до 2,14 Н/см). Это означает, что в области отрицательных температур с приростом величины внутренних напряжений на одну единицу снижение адгезионной прочности пропорционально примерно кратности 18. Такой темп ухудшения контактного сцепления можно характеризовать как стремительный.

В области положительных температур с повышением нагрева трубы от 48 до 100⁰С значение внутренних напряжений возрастает от 3,39 до 9,3 Н/мм², а адгезионная прочность уменьшается от 70 до 12 Н/см. Это означает, что в исследованном температурном диапазоне параметр внутренних напряжений возрастает в 3,1 раза, а адгезионная прочность снижается в 5,83 раза. Иначе говоря, прирост единицы показателя внутренних напряжений пропорционален почти двухкратному снижению адгезионной прочности. Сравнивая эти два показателя (18 и 2), видим, что темп снижения адгезионной прочности в области отрицательных температур в 9 раз интенсивней по сравнению с областью положительных температур.

Эти соображения позволили авторам [118] рекомендовать для сохранения работоспособности полимерного покрытия обустройство площадок хранения труб теплозащитными укрытиями, обеспечивающими температуру хранения полимерных покрытий в зимнее время не ниже минус 22⁰С, а в летнее время – радиационное затенение для предотвращения их прогрева солнечным излучением свыше 48⁰С.

Однако эти рекомендации до настоящего времени не получили нормативного развития. Разработка такого документа, регламентирующего хранение труб с защитными полимерными покрытиями в атмосферных условиях северного климата с использованием средств защитных укрытий, является главной задачей диссертационной работы.

1.6 Цель и задачи исследований

Целью диссертационной работы является совершенствование методов обеспечения сохраняемости антикоррозионных полимерных покрытий труб в атмосферных условиях северного климата.

Основными задачами исследования являются:

- 1) Анализ существующих методов обеспечения сохраняемости полимерных покрытий труб при атмосферном хранении;
- 2) Формирование комплекса методик для оценки механических свойств полимерных покрытий;

3) Оценка сохраняемости свойств полимерных покрытий по результатам механических испытаний;

4) Прогнозирование сроков сохраняемости полимерных покрытий в условиях северного климата;

5) Совершенствование методов обеспечения сохраняемости полимерных покрытий труб в условиях атмосферных воздействий.

Выводы

1. Коррозия труб, используемых в технологических и магистральных системах, является опасной с технической (разрушение труб), технологической (сбой режимов), экологической (загрязнение окружающей среды при авариях) и экономической (уничтожение металлов, затраты на восстановление, утерянная и недополученная продукция, сокращение продаж) точек зрения. В связи с этим разработка мер по предотвращению коррозии труб применительно к нефтегазовым и транспортным трубопроводным системам является актуальной и направлена на создание защитных покрытий, обеспечивающих сохраняемость антикоррозионных свойств в течение всего эксплуатационного срока трубных изделий.

В результате анализа выявлено:

а) сохраняемость свойств является количественным показателем эксплуатационной надежности и применительно к антикоррозионным защитным покрытиям труб характеризует способность объекта выполнять в течение длительного хранения требуемые функции, надежность которых регламентируется нормативной номенклатурой параметров, обеспечивающих работоспособность антикоррозионных защитных покрытий;

б) наиболее совершенный тип защитных покрытий для труб нефтегазовых и магистральных трубопроводов конструктивно представляет трехслойную полимерную композицию заводского нанесения, состоящую из грунтовочного слоя терморезистивных смол (0,08-0,2 мм), термопластичного клеевого подслоя (до 0,4 мм) и наружного слоя экструзионного полиолефина толщиной 3-3,5 мм;

в) сохраняемость свойств защитных полимерных покрытий определяется климатическими особенностями северных территорий России, наиболее насыщенных трубопроводными трассами и площадками хранения аварийных запасов труб; эти территории характеризуются холодным I_2 (t_{\min} ниже -50 °C), умеренно холодным II_4 (t_{\min} до -50 °C) и умеренным II_5 (t_{\min} до -40 °C) климатом, при этом для климатических зон I_2 и II_4 характерны суточные перепады температур до 30 °C; безопасным временем хранения являются июль в зоне II_4 и июль-август в зоне II_5 ; максимум нулевых переходов (до 90 в год) приурочен к климатической зоне II_4 ; в зоне II_5 таких переходов 70 , а в зоне холодного климата II_2 нулевые переходы отличаются не более 53 раз; максимум солнечного излучения приходится на июнь-июль в зоне I_2 , май-июнь в зоне II_4 и май-август в зоне II_5 .

Таким образом, одной из задач диссертационной работы является аналитическая систематизация приоритетов и степени опасности воздействия атмосферных факторов с целью совершенствования методов обеспечения сохраняемости полимерных покрытий труб при длительном хранении в условиях северного климата.

2. Оценка сохраняемости полимерных материалов под действием климатических факторов регламентируется нормативными документами и использует методы параллельного проведения испытаний в лабораторных и атмосферных условиях, при этом изучаются изменение физико-механических свойств и структуры материалов под воздействием температур, кислорода, влаги и солнечной радиации. Эти испытания основаны на использовании стандартных методик, позволяющих измерять механические свойства, твердость, прочность адгезии в многослойных полимерных покрытиях. Обоснование комплекса таких методик является задачей диссертационной работы.

3. Сохраняемость свойств защитных покрытий оценивают исходя из анализа трех прочностных показателей: характеристик механических свойств, величины внутренних напряжений и прочности адгезии покрытия с металлом труб. От того, в какой пропорции находятся эти показатели, зависит дальнейшее эксплуатационное поведение защитного покрытия. Процессы изменения этих пропорций, связанные с макромолекулярными и физико-химическими превращениями, форми-

руются латентно (скрытно) или практически мгновенно, но закономерности их развития изучены пока в недостаточной мере. Изучение этих закономерностей является исходной задачей диссертационного исследования.

4. Существующие нормативные документы не содержат методик по оценке времени сохраняемости полимерных покрытий в процессе их длительного хранения в атмосферных условиях северного климата. Между тем, существуют значительные резервные запасы труб с полиэтиленовыми покрытиями, сроки хранения которых установлены экспертно и не имеют научного обоснования. Разработку методики прогнозирования сроков сохраняемости полимерных покрытий при атмосферном хранении в условиях северного климата следует считать основной задачей диссертационного исследования.

5. Как показал анализ, работоспособность полимерных покрытий труб может быть сохранена при условии комфортных температур хранения, радиационного затенения и влагозащиты, но до настоящего времени эти положения научно не сформулированы и не получили нормативного развития. Разработка нормативного документа, регламентирующего сроки хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях с использованием средств защитного укрытия является главной задачей диссертационной работы.

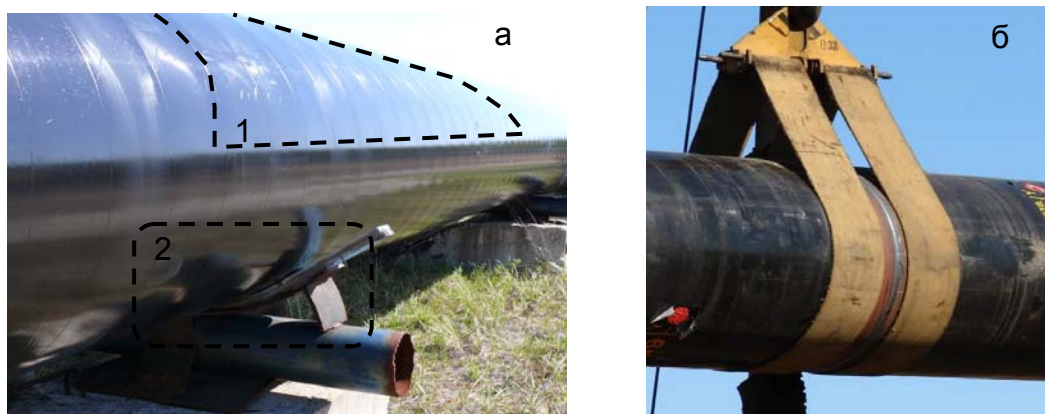
2. КОМПЛЕКС МЕТОДИК ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

2.1. Методика испытаний на растяжение

2.1.1 Цель испытаний и определяемые параметры

Испытания проводятся по ГОСТ 11262. Метод основан на растяжении образцов защитного полиэтиленового покрытия труб с установленной скоростью деформирования. Цель испытаний – определение механических характеристик материала покрытия, а также зависимость этих характеристик от следующих факторов:

- срока хранения труб;
- пространственной ориентации участка внешней поверхности трубы, с которого выполнен отбор образцов защитного покрытия;
- интенсивности внешних воздействий на покрытие (ударных нагрузок при транспортировке, погрузке и разгрузке, статических нагрузок, действующих в местах контакта покрытия с опорными элементами, грунтом, поверхностью соседних труб в штабелях);
- интенсивности температурных воздействий в летний и зимний периоды;
- интенсивности воздействия солнечного ультрафиолетового излучения (рисунок 2.1).



1 – участок интенсивного воздействия ультрафиолетового солнечного излучения; 2 – участок контакта покрытия и опорного элемента

Рисунок 2.1 – Статические и динамические воздействия на защитное покрытие труб при хранении (а) и погрузке (б)

При проведении измерений определяются значения следующих контрольных параметров:

- толщина образца (d , мм) – среднее арифметическое не менее трех измерений в пределах расчетной длины (L_0) образца перед испытанием;
- ширина образца (b , мм) – среднее арифметическое не менее трех измерений в пределах расчетной длины (L_0) образца перед испытанием;
- начальное поперечное сечение (A_0 , мм²) – произведение толщины (d) на ширину (b);
- растягивающая нагрузка (F_p , Н) – нагрузка, действующая на образец в любой момент испытания;
- удлинение (Δl_0 , мм) – измеренное изменение расчетной длины (L_0) образца в любой момент испытания;
- графическая зависимость между удлинением и растягивающей нагрузкой (запись испытательной машины)
- предел текучести (S) – точка на кривой «нагрузка - удлинение», при котором происходит первое увеличение деформации образца без увеличения растягивающей нагрузки
или в момент образования на образце местного сужения шейки;
- условный предел текучести (S_x) – определяется в тех случаях, когда испытуемый материал не имеет явного предела текучести;
- прочность при растяжении (σ_{pm} , МПа) – максимальная нагрузка (F_{pm}) при испытании на растяжение, отнесенная к площади начального поперечного сечения образца (A_0);
- прочность при разрыве (σ_{pp} , МПа) – нагрузка (F_{pp}), при которой разрушился образец, отнесенная к площади начального поперечного сечения (A_0) образца;
- предел текучести при растяжении (σ_{pt} , МПа) – растягивающая нагрузка (F_{pt}), у предела текучести (S) отнесенная к площади начального поперечного сечения (A_0) образца

- прочность при условном пределе текучести ($\sigma_{pту}$, МПа) – растягивающая нагрузка ($F_{pту}$) у условного предела текучести (S_x), отнесенная к площади начального поперечного сечения (A_0) образца;

- относительное удлинение при максимальной нагрузке (ϵ_{pm} , %) – изменение расчетной длины в момент достижения максимальной нагрузки (F_{pm}), отнесенное к начальной расчетной длине (L_0) образца при испытании на растяжение;

- относительное удлинение при разрыве (ϵ_{pp} , %) – изменение расчетной длины (Δl_{op}) образца при испытании на растяжение в момент разрыва, отнесенное к начальной расчетной длине (L_0) образца

- относительное удлинение при пределе текучести (ϵ_{pt} , %) – изменение расчетной длины (Δl_{op}) образца, измеренное в момент достижения предела текучести (S), отнесенное к начальной расчетной длине (L_0) образца при испытании на растяжение

- скорость раздвижения зажимов испытательной машины (V , мм/мин).

2.1.2 Подготовка образцов для испытаний на растяжение

Внешний вид и основные геометрические размеры образцов для испытаний на растяжение приведены на рисунке 2.2 и в таблице 2.1.

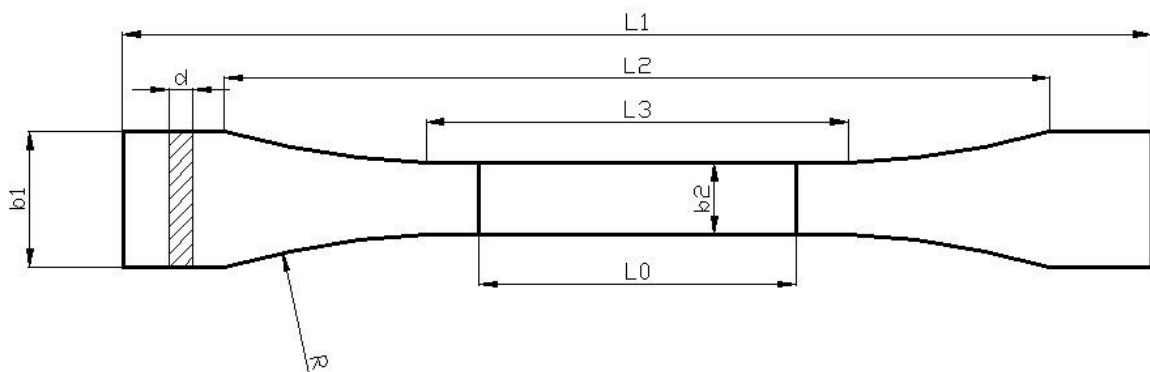


Рисунок 2.2 – Форма и размеры испытательного образца защитного покрытия для испытаний на растяжение

Таблица 2.1 – Размеры испытательного образца защитного покрытия для испытаний на растяжение

Параметр	Значение
Общая длина (L1), не менее, мм	150
Расстояние между метками, определяющими положение кромок зажимов на образце (L2), мм	115 ± 5
Длина рабочей части (L3), мм	$60 \pm 0,5$
Расчетная длина (L0), мм	$50 \pm 0,5$
Ширина головки (b1), мм	$20 \pm 0,5$
Ширина рабочей части (b2), мм	$10 \pm 0,5$
Толщина (D), мм	$4 \pm 0,4$
Радиус закругления (R), мм	60

Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность, без вздутий, сколов, трещин, раковин и других видимых дефектов.

Образцы для испытаний на растяжение изготавливаются из фрагментов защитного покрытия, отслаиваемых с предварительно определенных участков внешней поверхности трубы.

Порядок подготовки образцов следующий:

- по определенным признакам (пространственная ориентация, участок механического взаимодействия с трубами в штабеле, взаимодействие с опорными элементами) назначается прямоугольный фрагмент покрытия протяженностью не менее 300 мм и шириной не менее 200 мм (рекомендуется, чтобы сторона с большей протяженностью была ориентирована по оси трубы);
- границы фрагмента обозначаются водостойким маркером;
- на фрагменте водостойким маркером обозначается дата отбора, порядковый номер, характеристики трубы и покрытия по данным сертификата, срок хранения, признак, по которому выполнено назначение фрагмента;
- на границе обозначенного фрагмента выполняется удаление защитного покрытия;

- для удаления покрытия на границе фрагмента может использоваться механизированный или ручной инструмент. Удаление покрытия механизированным способом выполняется с помощью угловой шлифовальной машины, оснащенной дисковой проволочной щеткой. В этом случае по периметру назначенного фрагмента дисковой щеткой удаляется полоса покрытия шириной не более 30 мм. В качестве ручного инструмента могут использоваться специальные ножи, с помощью которых в покрытии по периметру назначенного фрагмента выполняются прорезы шириной не более 2 мм;

- фрагмент покрытия рекомендуется отслаивать вручную с постепенным разрушением клеевого подслоя между внешним полиэтиленовым слоем и эпоксидным грунтовочным слоем с помощью режущего инструмента;

- при отслаивании фрагментов покрытия не допускается выполнять нагрев металла трубы или самого покрытия;

- образцы для испытаний изготавливаются с помощью вырубных прессов с механическим, пневматическим, гидравлическим или электрическим приводом (рисунок 2.3);



Рисунок 2.3 – Вырубной пневматический пресс (а) и вырубная матрица с выталкивателем (б)

- формирование образца в вырубном прессе выполняется с помощью вырубной матрицы, обеспечивающей необходимое качество кромок испытательного образца;

- изготавливать образцы для испытаний любым другим способом не допускается. При использовании механизированного режущего инструмента (фрезерных станков) на кромках образцов возможно формирование микроконцентраторов напряжений, что впоследствии может привести к искажению экспериментальных данных;

- перед проведением исследований образцы кондиционируют не менее 16 ч по ГОСТ 12423 при температуре 23 ± 2 °С и относительной влажности 50 ± 5 %, если в нормативно-технической документации на материал нет других указаний;

- время от окончания изготовления формованных образцов до их испытания должно составлять не менее 16 ч, включая и время на их кондиционирование.

2.1.3. Аппаратура для проведения исследований

Испытание проводят на машине, которая при растяжении образца должна обеспечивать измерение нагрузки с погрешностью не более 1 % от измеряемой величины и постоянную скорость раздвижения зажимов в пределах, определяемых в соответствии с таблицей 2.2.

Зажимы машины должны обеспечивать надежное крепление образцов и совпадение продольной оси образца с направлением растяжения и не должны вызывать разрушений образцов в месте крепления.

Прибор для измерения удлинения в процессе испытания должен иметь погрешность измерения не более 1 %, если в нормативно-технической документации на материал нет иных указаний.

Для измерения удлинения допускается использовать:

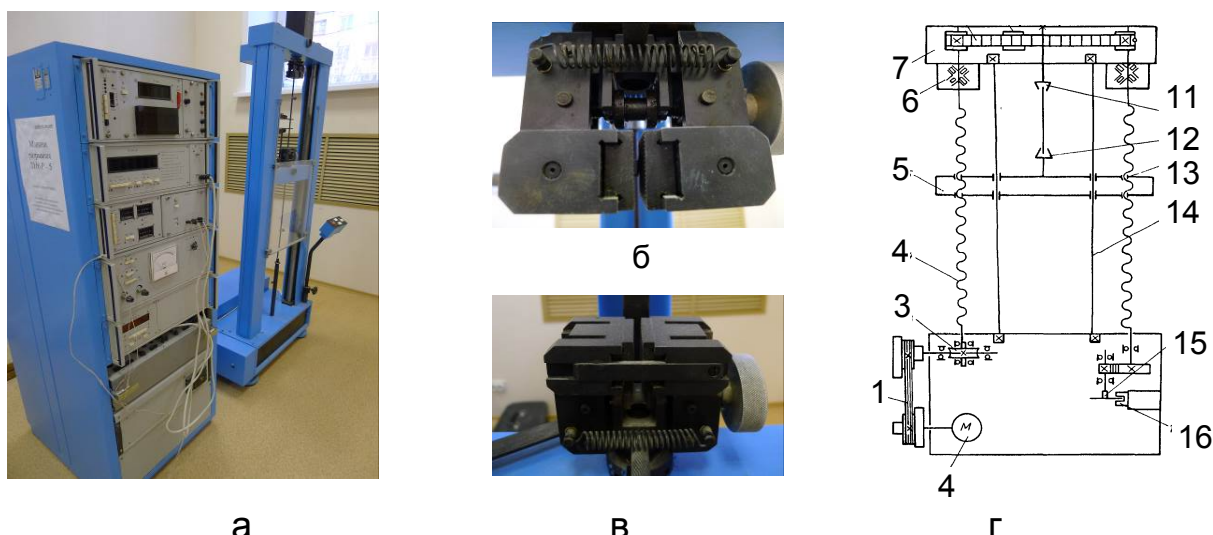
- приборы, закрепляемые непосредственно на образце; при этом масса прибора и способ его крепления не должны оказывать существенного влияния на величины определяемых показателей и поведение образца при испытании;

- приборы, не закрепляемые на образце и позволяющие производить измерение изменения расчетной длины образца, ограниченной метками, с помощью оптических или других систем измерения.

При удлинении свыше 25 мм допускается измерение удлинения по меткам с помощью масштабной линейки с ценой деления не более 1 мм.

Прибор для измерения ширины и толщины образцов должен обеспечивать измерение с погрешностью не более 0,01 мм. При измерении толщины образцов прибор должен оказывать давление на образец до 0,03 МПа.

Внешний вид и кинематическая схема разрывной машины, предназначенной для испытания пластмасс на растяжение, показана на рисунке 2.4.



- 1 – электродвигатель; 2 – клиноременная передача; 3 – редуктор червячный;
 4 – винт ходовой; 5 – подвижная траверса; 6 – подшипниковый узел; 7 – неподвижная траверса;
 8 – ремень плосkozубчатый; 9 – натяжной ролик; 10 – датчик силы;
 11 – пассивный захват; 12 – активный захват; 13 – ходовая гайка; 14 – колонна;
 15 – зубчатый диск; 16 – датчик хода траверсы

Рисунок 2.4 – Внешний вид (а), зажимы для образцов (в, г) и кинематическая схема (б) машины для испытания пластмасс на растяжение

2.1.4. Проведение испытаний

Перед испытанием на образцы наносят необходимые метки в соответствии с

таблицей 2.1 и рисунком 2.2. Метки не должны ухудшать качество образцов или вызывать разрыв образцов в местах меток.

Толщину и ширину образцов измеряют в трех местах, в середине и на расстоянии 5 мм от меток. Из полученных значений вычисляют средние арифметические величины, по которым вычисляют начальное поперечное сечение A_0 .

Образцы, у которых минимальное и максимальное значения толщины или ширины различаются более чем на 0,2 мм, не испытывают.

Образцы закрепляют в зажимы испытательной машины по меткам, определяющим положение кромок зажимов таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой и направлениям движения подвижного зажима. Зажимы равномерно затягивают, чтобы исключалось скольжение образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушения в месте закрепления.

Механические характеристики материала покрытия определяются при температуре плюс 20 °С, минус 20 °С и минус 45 °С.

Испытания проводят при скорости раздвижения зажимов испытательной машины, предусмотренной в нормативно-технической документации в зависимости от типа покрытия, регламентированного ГОСТ Р 52568-2006: нормальное Н, теплостойкое Т, специальное С.

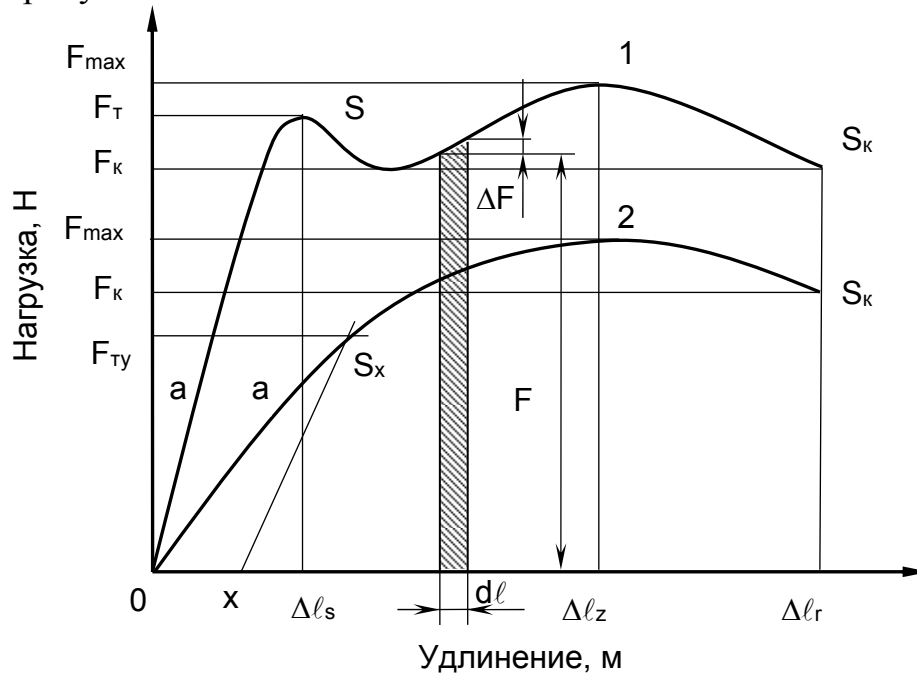
При этом выбирают максимальную из приведенных в таблице 2.2 скорость так, чтобы время от момента приложения нагрузки к образцу до его разрушения составляло не менее 1 мин.

Таблица 2.2 – Рекомендуемые скорости движения захватов разрывной машины

Скорость, мм/мин	Допускаемая погрешность, мм/мин
1	± 0,5
2 (2,5)	± 0,4
5	± 1,0
10	± 1,0
20 (25)	± 2,0
50	± 5,0
100	± 10,0
200 (250)	± 20,0
500	± 50,0

При испытании измеряют нагрузку и удлинение образца непрерывно или в момент достижения предела текучести, максимальной нагрузки, в момент разрушения образца.

При записи кривой «нагрузка-удлинение» определяют характеристики в соответствии с рисунком 2.5.



1 – материал имеет предел текучести; 2 – материал не имеет предела текучести;
 а – участки прямолинейного направления кривой в начале кривой «нагрузка-удлинение»; S – предел текучести; x – отрезок на оси удлинения для определения условного предела текучести;
 S_x – условный предел текучести; S_k – предел прочности при разрыве

Рисунок 2.5 – Диаграмма растяжения образца

Образцы, которые в процессе испытания разрушаются за пределами рабочей части (L_3), или у которых в процессе испытания обнаружены дефекты (пузыри, инородные для материала включения, внутренние трещины и т.п.), в расчет не принимают.

Для образцов, удлиняющихся с образованием шейки, следует учитывать также результаты, полученные на образцах, у которых шейка распространилась за пределы рабочей части образца, но разрушение его произошло не в месте соприкосновения зажима с образцом.

2.1.5 Обработка результатов

Значение прочности (σ) в МПа (Н/мм²) вычисляют по следующим выражениям:

1). Прочность при растяжении (временное сопротивление) (σ_b)

$$\sigma_b = \frac{F_{\max}}{S_0}; \quad (2.1)$$

где F_{\max} – максимальная нагрузка при испытании на растяжение, Н;

S_0 – начальное поперечное сечение образца, мм²;

2). Прочность при разрыве (напряжение в момент разрыва) (σ_k)

$$\sigma_k = \frac{F_k}{S_0}; \quad (2.2)$$

где F_k – нагрузка, при которой образец разрушился, Н;

3). Предел текучести при растяжении (σ_T);

$$\sigma_T = \frac{F_T}{S_0}; \quad (2.3)$$

где $F_{рТ}$ – растягивающая нагрузка при достижении предела текучести, Н;

4). Условный предел текучести ($\sigma_{рту}$)

$$\sigma_{рту} = \frac{F_{ту}}{S_0}, \quad (2.4)$$

где $F_{рту}$ – растягивающая нагрузка при достижении условного предела текучести, Н;

5). Удлинение (ε) в процентах вычисляют по формулам:

- Относительное удлинение при максимальной нагрузке ($\varepsilon_{рм}$)

$$\varepsilon_{рм} = \frac{\Delta l_{ом}}{l_0} \cdot 100; \quad (2.5)$$

где $\Delta l_{ом}$ – изменение расчетной длины образца в момент достижения максимальной нагрузки, мм;

l_0 – начальная расчетная длина образца, мм;

- Относительное удлинение при разрыве (ε_{pp})

$$\varepsilon_{pp} = \frac{\Delta l_{op}}{l_0} \cdot 100; \quad (2.6)$$

где Δl_{op} – изменение расчетной длины образца в момент разрыва, мм;

- Относительное удлинение при пределе текучести (ε_{pt})

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\Delta l_{от}}{l_0} \cdot 100, \quad (2.7)$$

где $l_{от}$ – изменение расчетной длины образца в момент достижения предела текучести, мм.

6). Условный предел текучести (S_x) определяют графически (см. рисунок 2.5), в точке пересечения кривой «нагрузка-удлинение» с прямой, проведенной параллельно прямолинейному начальному участку кривой «нагрузка-удлинение» и отсекающей от оси абсциссы участок удлинения, отвечающий относительному удлинению, величина которого должна быть указана в нормативно-технической документации на материал.

7). Площадь диаграммы растяжения (см. рисунок 2.5) определяет работу, затраченную на растяжение образца при испытаниях

$$A = \int_0^{\Delta l} (F + dF) dl \approx \int_0^{\Delta l} F dl, \quad (2.8)$$

где F – нагрузка, Н;

Δl – удлинение образца, м.

8). Удельная работа деформации образца (работа деформации единичного объема) определяется по выражению

$$A_{уд} = \frac{A}{S_0 \cdot l_0}. \quad (2.9)$$

2.2 Методика определения твердости полимерных покрытий

Для определения твердости низкомолекулярных материалов – полимеров используют методы Шора (метод внедрения стального стержня) и Бриннеля (метод вдавливания стального шарика).

2.2.1 Определение твердости по Шору

Цель испытаний и определяемые параметры

Испытания проводятся по ГОСТ 263-75. Стандарт распространяется на резину и резиновые изделия. Устанавливает метод определения твердости от 0 до 100 ед по Шору А. Цель испытаний заключается в измерении сопротивления резины погружению в нее индентора в виде стального стержня.

Методика включает выбор приборов и оборудования, подготовку к образцов для испытаний, проведение исследований и обработку их результатов.

Приборы и оборудование

Испытания проводятся с помощью твердомеров по Шору, тип А и D. Конструктивно прибор состоит из следующих элементов:

- опорной поверхности с отверстием диаметром от 2,5 до 3,5 мм, центр которого находится на расстоянии не менее 6 мм от любого края опоры; - индентора в виде закаленного стального стержня диаметром 1,10 - 1,40 мм, форма и размеры которого для твердомеров по Шору типа А показаны на рисунке 2.6 (а), для твердомеров по Шору типа D – на рисунке 2.6 (б).

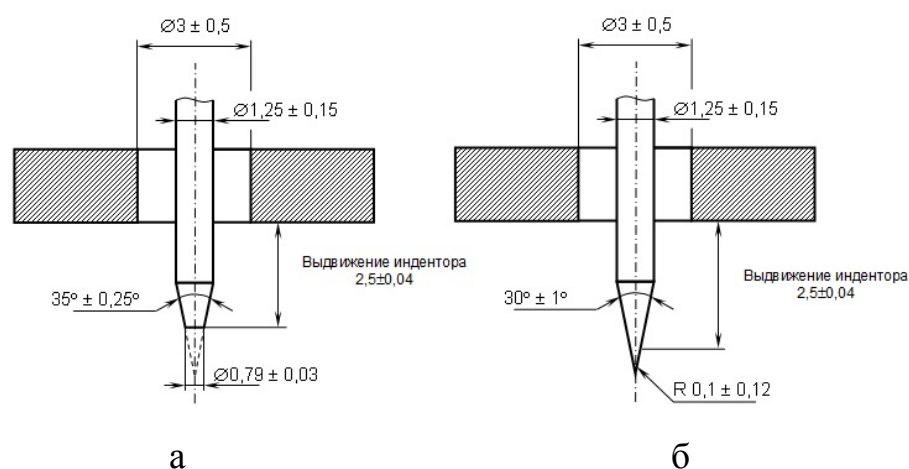


Рисунок 2.6 – Размеры основных элементов твердомеров по Шору: а) тип А; б) тип D

- индикаторного устройства, показывающего степень выдвижения кончика индентора за пределы опорной поверхности. Степень выдвижения может быть измерена непосредственно в условных единицах в диапазоне от 0, для полного выдвижения кончика индентора, равного $2,50 + 0,04$ мм, до 100 при отсутствии какого-либо выдвижения, что происходит, например, в том случае, когда опорную поверхность индентора плотно прижимают к поверхности твердого материала;

- калиброванной пружины для приложения к индентору определенного усилия.

Усилие, создаваемое сжатой пружиной, может быть рассчитано по следующим выражениям

$$\begin{aligned} F_A &= 550 - 75 \cdot H_A \\ F_D &= 475 \cdot H_D \end{aligned} \quad (2.10)$$

где F_A , F_D – прилагаемая сила, мН; H_A – твердость, определенная твердомером по Шору, тип А; H_D – твердость, определенная твердомером по Шору, тип D.

Тип используемого прибора определяется в зависимости от твердости материала, которая может изменяться в следующих диапазонах:

- 10 – 90 при измерениях прибором типа А;
- 20 – 90 при измерениях прибором типа D.

Если при измерениях, число твердости больше или меньше указанного диапазона, необходимо использовать прибор другого типа.

При проведении исследований на площадках хранения труб рекомендуется использовать портативные измерители твердости по Шору (рисунок 2.7). В лабораторных условиях рекомендуется использовать специальные.

Образцы для испытаний

Для проведения лабораторных исследований используются образцы прямоугольной формы (не менее 100 мм в длину и не менее 80 мм в ширину), изготовленные из фрагментов защитного полиэтиленового покрытия, отслоенных с поверхности труб.

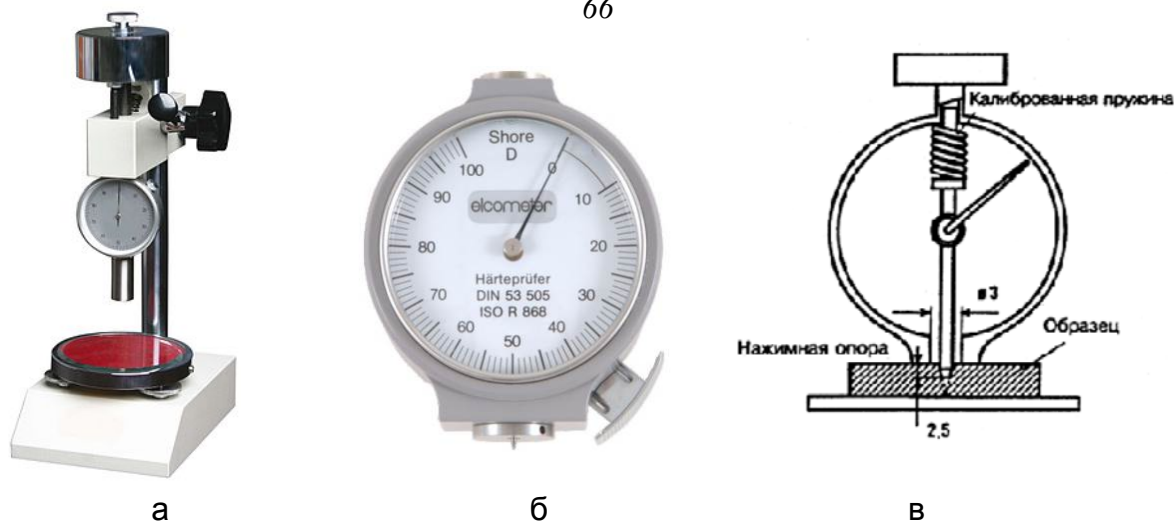


Рисунок 2.7 – Оборудование для определения твердости по Шору:
 а) стойка для размещения твердомера при лабораторных исследованиях; б) общий вид твердометра; в) схема прибора

Порядок подготовки образцов следующий:

- назначение по определенным признакам участка поверхности защитного покрытия трубы;
- отслаивание с поверхности трубы в пределах назначенного участка фрагмента защитного покрытия;
- изготовление из фрагмента покрытия образцов для лабораторных исследований.

При проведении исследований на площадках хранения труб, измерения проводятся непосредственно на поверхности назначенных по определенным признакам участках защитного покрытия.

Проведение исследований

Порядок проведения измерений следующий:

- образец для испытания помещают на твердую горизонтальную ровную поверхность;
- твердомер устанавливают в вертикальном положении так, чтобы кончик индентора находился на расстоянии не менее 12 мм от любого края образца;
- опорную поверхность твердомера прижимают к образцу;

- к опорной поверхности прилагают давление, достаточное для обеспечения надежного контакта с образцом;

- через 15 + 1 с фиксируют показания индикаторного устройства;

- если необходимо произвести мгновенное измерение, то показание снимают в течение одной секунды после прижатия опорной поверхности к образцу. В этом случае записывают максимальное значение, которое покажет индикатор твердомера;

- проводят пять измерений твердости в разных местах поверхности образца, но на расстоянии не менее 6 мм от точки предыдущего измерения, и определяют среднее значение.

Для обеспечения отрицательной температуры эксперимента, перед проведением исследований, образцы выдерживают в криокамере. В этом случае рекомендуется использовать металлический массивный опорный элемент, на котором размещается образец и который вместе с образцом помещается в криокамеру. Опорный элемент выступает в качестве аккумулятора холода и обеспечивает поддержание низкой температуры образца в течение времени, необходимого для проведения серии замеров.

При проведении измерений на площадках хранения, твердомер последовательно перемещают между точками контроля в пределах назначенного участка поверхности защитного покрытия трубы. Расстояние между точками контроля составляет не менее 6 мм.

Результаты измерения заносятся в протокол, в котором также указывается следующая информация:

- тип прибора;

- признаки назначения участка покрытия, на котором выполнены измерения, или с которого выполнен отбор фрагментов для изготовления лабораторных образцов;

- срок хранения трубы;

- данные сертификата на трубу и защитное покрытие.

2.2.2 Определение твердости по Бринеллю (метод вдавливания стального шарика)

Исследования проводятся по ГОСТ 4670-91 «Пласт массы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика».

Сущность метода заключается во вдавливании шарика (стального или твердого сплава) в образец (изделие) под действием усилия, приложенного перпендикулярно поверхности образца в течение определенного времени, и измерении диаметра отпечатка после снятия усилия.

Основные принципы адаптированной методики состоят в следующем.

Оборудование и материалы

Аппаратура для испытания включает:

- корпус, несущий подъемную платформу с рабочим столом;
- индентор с соответствующими крепежными деталями и устройствами для плавного (без толчка) приложения нагрузки;
- устройство для измерения глубины вдавливания индентора.

Деформация корпуса при максимальной нагрузке, измеряющаяся вдоль основной оси приложения силы, не должна превышать 0,05 мм.

Шариковый индентор изготавливается из закаленной стали и полируется. На шарике не должно быть каких-либо признаков деформации или повреждения после испытаний. Диаметр шарика для испытаний принимается равным $5,0 \pm 0,05$ мм.

Предварительная нагрузка F_0 (допуск ± 1 %) составляет не более 9,8 Н.

Испытательная нагрузка F_m (допуск ± 1 %) допускает одно из следующих значений: 49; 132; 358; 961 Н. Допускается испытательная нагрузка 1470 Н.

Предельная измеренная глубина вдавливания принимается равной не более 0,4 мм и измеряется с точностью $\pm 0,005$ мм.

Время выдержки образца под нагрузкой определяется с помощью секундомера, имеющего точность не менее $\pm 0,5$ с.

Образцы для проведения испытаний

Для проведения исследований используются образцы прямоугольной или квадратной формы, изготовленные из фрагментов защитного полиэтиленового покрытия, отслоенных с поверхности труб.

Порядок подготовки образцов следующий:

- выбор и назначение по определенным признакам участка поверхности защитного покрытия трубы;
- отслаивание с поверхности трубы в пределах назначенного участка фрагмента защитного покрытия;
- изготовление из фрагмента покрытия образцов для лабораторных исследований.

Проведение исследований

Порядок проведения исследований следующий:

- образец для испытания целиком помещается на рабочий стол прибора. Поверхности образца должны быть перпендикулярными к направлению приложенной нагрузки;
- в течение пяти секунд прилагают предварительную нагрузку F_0 так, чтобы точка контакта индентора находилась на расстоянии не менее 10 мм от края образца;
- устанавливают устройство, отсчитывающее глубину вдавливания h_1 , на нулевую отметку и дополнительно прикладывают испытательную нагрузку F_m в течение двух-трех секунд без удара;
- выбирают значение испытательной нагрузки F_m из установленных значений (см. выше) так, чтобы получить глубину вдавливания шарика от 0,15 до 0,35 мм. Если через 30 с глубина вдавливания h_1 находится вне указанного интервала (или вся серия измерений, или отдельное значение), то следует величину нагрузки F_m при испытании изменять таким образом, чтобы получить корректную глубину вдавливания. Число измерений при испытании, которые не дают корректной глубины вдавливания, следует указать в протоколе;

- проводят испытания таким образом, чтобы пузырьки или трещины в испытуемых образцах не смогли оказать влияния на результаты. Если на одном и том же образце проводят несколько определений, испытание следует проводить в точках, расположенных на расстоянии не менее 10 мм друг от друга и от краев образца;

- после приложения испытательной нагрузки F_m через 30 с измеряют глубину вдавливания h_1 под нагрузкой F_{m1} ;

- проводят десять испытаний, результаты которых являются действительными на одном или нескольких образцах;

- определяют деформацию корпуса прибора h_2 в миллиметрах: помещают мягкий медный блок (не менее 6 мм толщиной) на рабочий стол и прилагают предварительную нагрузку F_0 . Устанавливают устройство для измерения глубины на нулевую отметку и прилагают испытательную нагрузку F_m . Выдерживают испытательную нагрузку до тех пор, пока показание на указателе глубины вдавливания не станет стационарным. Отмечают это значение, снимают нагрузку и снова устанавливают индикатор глубины вдавливания на нулевую отметку;

- повторяют вышеуказанные операции до тех пор, пока показание индикатора глубины не будет постоянным после каждого приложения испытательной нагрузки. Это является указанием на то, что достигнуто положение, при котором нет дальнейшего вдавливания в медный блок, и поэтому показание постоянной глубины – это перемещение индикатора глубины, вызванное деформацией корпуса прибора. Записывают это постоянное значение как h_2 .

Для измерения твердости материала защитного покрытия в условиях низких температур, лабораторные образцы, расположенные на металлическом массивном основании, помещаются в криокамеру, где выдерживаются в течение времени, необходимого для достижения образцом нужной температуры. После завершения охлаждения, образец с металлическим основанием размещается на рабочем столе измерительной машины для выполнения. Количество измерений определяется скоростью нагрева образца. Контроль температуры поверхности образца выпол-

няется контактным электронным термометром с точностью измерения не менее 0,1 °С.

Обработка результатов исследований

Порядок обработки результатов исследований следующий.

Уменьшенное значение нагрузки F_r вычисляют по формуле:

$$F_r = F_m \cdot \frac{0,21}{(h - h_r) + 0,21}, \quad (2.12)$$

где F_m – нагрузка на индентор при испытании, Н;

h_r – уменьшенная глубина вдавливания (0,25 мм);

$h = h_1 - h_2$ – глубина вдавливания после внесения поправки на деформацию корпуса прибора, мм

h_1 – глубина вдавливания индентора под испытательной нагрузкой, мм;

h_2 – деформация корпуса прибора под испытательной нагрузкой, мм;

0,21 – коэффициент приведения нагрузки к глубине вдавливания h_r , равной 0,25 мм.

Твердость НВ при вдавливании шарика вычисляют по выражению:

$$HB = \frac{1}{5 \cdot \pi} \cdot \frac{F_r}{h_r}, \quad (2.13)$$

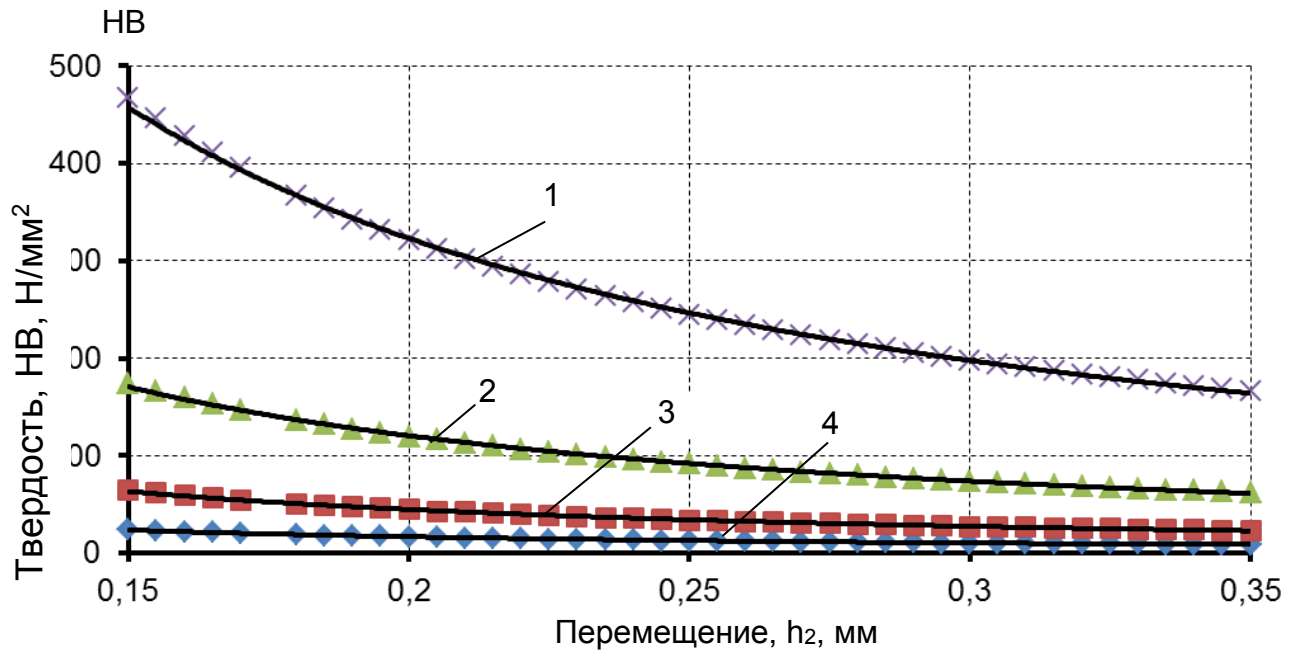
где НВ – твердость при вдавливании шарика, Н/мм²;

F_r – уменьшенная нагрузка при испытании, Н;

h_r – уменьшенная глубина вдавливания, мм.

Значения НВ менее 250 Н/мм² округляют до 1 Н/мм² (целых чисел). Значения НВ более 250 Н/мм² округляют до значений, кратных 10 Н/мм² (десяти).

Характер распределения чисел твердости НВ для стандартного ряда нагрузок в зависимости от величины перемещения h_2 показан на рисунке 2.8.



1 – 961 Н; 2 – 358 Н; 3 – 132 Н; 4 – 49 Н

Рисунок 2.8 – Соотношение величины перемещения индентора и значения твердости для стандартного ряда нагрузок

Определение характеристик покрытия по диаграмме «нагрузка-перемещение»

Исследования проводятся с помощью универсального измерительного комплекса для определения механических характеристик металлов, а также неметаллических материалов ПИМ-ДВ-1 (рисунок 2.9). Принцип работы прибора основан



а



б

Рисунок 2.9 – Прибор для определения механических характеристик материалов ПИМ-ДВ-1: а) общий вид; б) блок управления

на регистрации в реальном масштабе времени процесса упругопластического контактного деформирования материала в виде диаграмм в координатах нагрузка-перемещение, нагрузка-время и перемещение-время при непрерывном вдавливании сферического индентора (твердосплавного шарика).

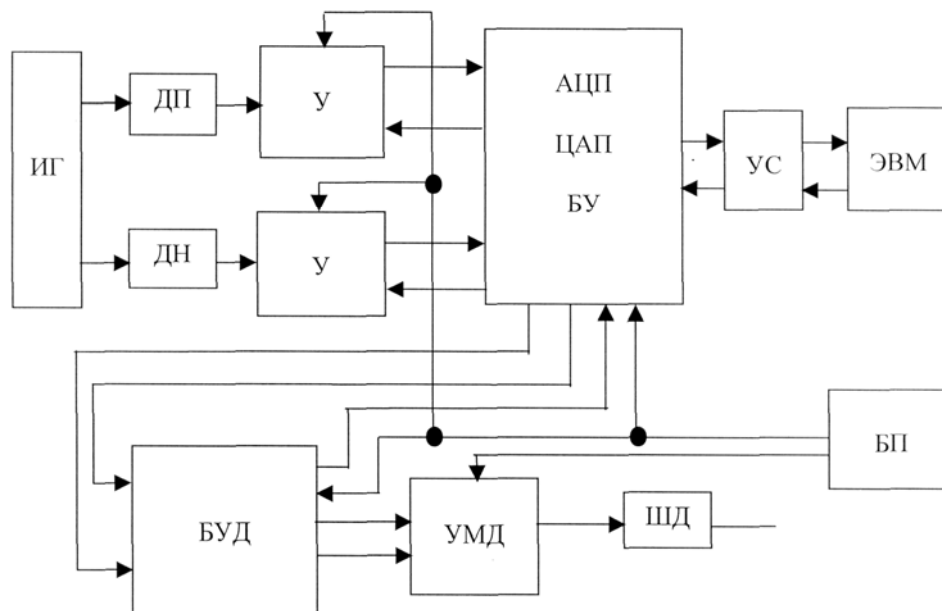
Прибор состоит из испытательного модуля, лабораторной двухколонной рамы с рабочим столом, электронного блока и персонального компьютера. Испытательный модуль включает подвижную часть и пустотелый винт с трапецеидальной резьбой, закрепленный на верхней поперечине (траверсе) лабораторной рамы. Его подвижная часть состоит из механизма нагружения и расположенных соосно винту силоизмерительного узла и узла измерения перемещения индентора.

Механизм нагружения при помощи двигателя, зубчатой и червячной передач, обеспечивает поступательное движение подвижной части испытательного модуля относительно траверсы, скользящей вдоль вертикального паза у основания модуля. Максимальный ход модуля определяется высотой паза и составляет ± 10 мм от среднего положения траверсы внутри паза.

Силоизмерительный узел имеет плоскую пружину, силовой шток, взаимодействующий с ней и передающий плавное усилие на индентор, датчик, а также индикатор часового типа для дополнительного визуального контроля нагрузки. Электрический сигнал с датчика нагрузки, чувствительным элементом которого является плоская пружина, пропорционален усилию на индентор.

Узел измерения перемещения индентора (глубины вдавливания) состоит из корпуса, жестко закрепленного на штоке, плоской пружины, кинематически связанной с испытуемой поверхностью, и датчика. При этом прогиб пружины, равный линейному перемещению индентора, вызывает пропорциональный электрический сигнал с датчика перемещения. Напряжения с датчиков усиливаются и подаются на вход электронного блока.

Структурная схема прибора приведена на рисунке 2.10.



ИГ – испытательная головка; ДП – датчик перемещения; ДН – датчик нагрузки; У – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; УС – устройство связи с ЭВМ; БУ – буферный усилитель; БП – блок питания; ШД – шаговый двигатель; БУД – блок управления двигателем; УМД – усилитель мощности двигателя

Рисунок 2.10 – Структурная схема прибора ПИМ-ДВ-1

По результатам исследований формируется диаграмма (рисунок 2.11), определяющая зависимость глубины вдавливания индентора в покрытие при различной нагрузке. Диаметр индентора составляет 2,5 мм, максимальное усилие вдавливания – 200 Н (20,5 кг), максимальная глубина вдавливания – 0,54 мм.

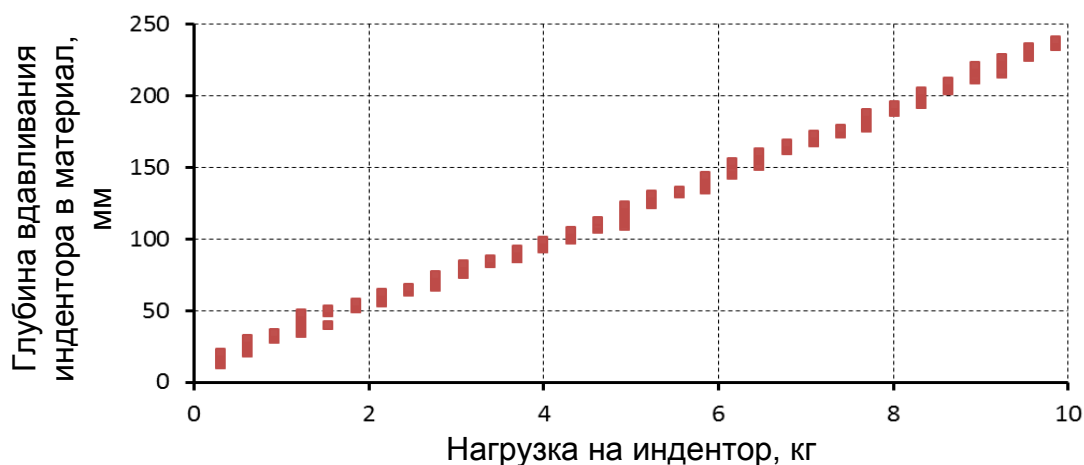


Рисунок 2.11 – Диаграмма «нагрузка-перемещение», полученная при испытаниях образца защитного полиэтиленового покрытия

Анализ диаграммы позволяет определить особенности пластического деформирования материала защитного покрытия в зависимости от различных факторов.

Твердость по Бринеллю для любых значений нагрузки-перемещения в диапазоне нагрузок от 5 до 20 кг может быть рассчитана по формуле:

$$HB = \frac{F}{S_{от}}, \quad (2.14)$$

где F – приложенная нагрузка, Н;

$S_{от}$ – площадь поверхности отпечатка, мм².

Площадь отпечатка рассчитывается из выражения:

$$S_{от} = \pi \cdot D \cdot h, \quad (2.15)$$

где D – диаметр шарика, мм;

h – глубина вдавливания шарика, мм

Особенности пластической деформации приповерхностного слоя материала защитного покрытия могут быть определены по диаграмме «нагрузка-твердость» (рисунок 2.12).

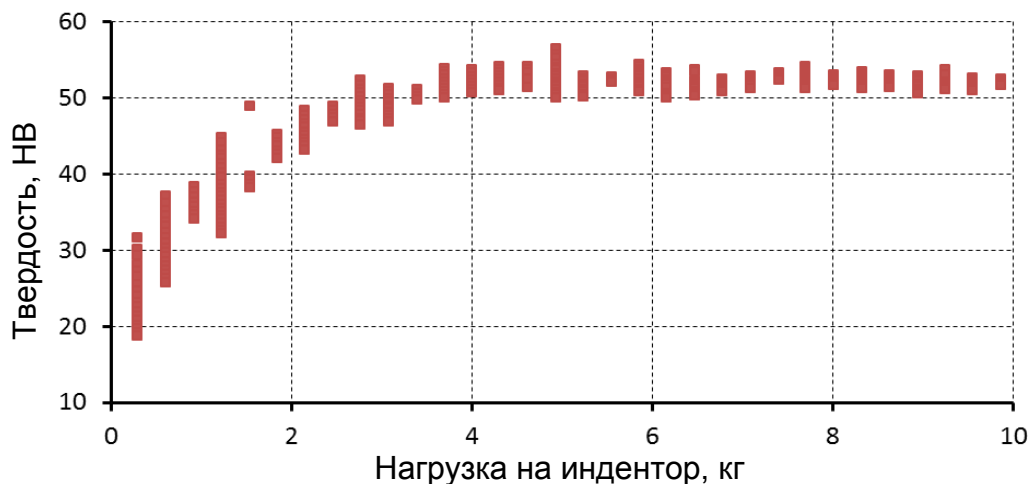


Рисунок 2.12 – Диаграмма «нагрузка-твердость», в диапазоне нагрузок от 0,3 до 10 кг

При испытаниях в условиях низких температур, образец покрытия помещается в криокамеру, где выдерживается необходимое для обеспечения заданной температуры время. Для исключения быстрого нагрева, рекомендуется использовать металлическое массивное основание, на котором размещается и фиксируется

образец покрытия. Металлическое основание охлаждается вместе с образцом и впоследствии позволяет обеспечить требуемую температуру образца в течение времени, необходимого для проведения одного измерения.

2.3 Определение прочности адгезии

2.3.1 Сущность метода

Испытания проводятся по ГОСТ Р 51164. Метод заключается в определении усилия отслаивания полосы защитного полиэтиленового покрытия с поверхности трубы. Адгезия покрытия определяется по выражению

$$A = \frac{F}{b} \quad (2.16)$$

где F – усилие отслаивания, Н;

b – ширина отслаиваемой полосы, см.

По результатам исследований определяется адгезия защитного покрытия в зависимости от следующих факторов:

- срока хранения трубы;
- циклических температурных воздействий (вследствие суточных колебаний температуры окружающей среды;
- воздействия на покрытия статических нагрузок;
- воздействия динамических нагрузок;
- воздействия ультрафиолетового излучения.

2.3.2. Оборудование и материалы

При проведении исследований используется следующее оборудование:

- устройство для контроля адгезии защитных покрытий (адгезиметр), обеспечивающее погрешность не более 0,1 Н/см (0,01 кгс/см);
- универсальный захват или зажим, для закрепления полосы отслаиваемого покрытия;
- стальная линейка длиной не менее 50 см (ГОСТ 427-75);

- акустический дефектоскоп для оценки состояния клеевого подслоя покрытия в месте проведения измерений;
- толщиномер магнитный, для определения толщины покрытия;
- водостойкий маркер для обозначения границ полосы отслаиваемого покрытия;
- специальный нож для резки покрытия на границах отслаиваемой полосы.

Применяемый захват или зажим должен обеспечивать надежную фиксацию полосы покрытия и исключать ее проскальзывание или разрушение в месте закрепления при проведении измерений.

2.3.3. Образцы для проведения исследований

Образцами для контроля являются трубы с защитным трехслойным полиэтиленовым покрытием заводского нанесения. Исследования проводятся на участках защитного покрытия трубы, назначаемых в соответствии с определенными признаками.

Порядок подготовки образцов следующий:

- выполняется визуальная оценка состояния поверхности защитного покрытия. Поверхность отслаиваемой полосы не должна иметь механических повреждений (царапин, трещин), а также дефектов нанесения (пузырей, оплавлений);
- акустическим дефектом определяется целостность клеевого подслоя. На участках с отслоившимся покрытием исследования не проводятся;
- выполняется оценка толщины покрытия. В пределах отслаиваемой полосы покрытие должно иметь стабильную толщину с допустимым отклонением не превышающим 10 % от номинального значения, указанного в сертификате на покрытие;
- в пределах назначенного участка защитного покрытия водостойким маркером наносятся линии, определяющие границы полос покрытия, отслаиваемых в процессе проведения исследований;
- на обозначенных маркером границах, в защитном покрытии специальным ножом выполняются надрезы до металла трубы;

- один конец полосы с помощью стамески или аналогичного приспособления отслаивается от поверхности трубы.

Отслаиваемые полосы покрытия ориентируются по оси трубы и перпендикулярно оси трубы. Ширина полос составляет не менее 10 мм, длина – не менее 200 мм.

Количество отслаиваемых полос в пределах одного участка покрытия составляет не менее 10.

Шаг распределения полос в пределах назначенного участка определяется условиями эксперимента. В случае, если необходимо получить более полную информацию по распределению параметра, полос располагаются на минимально возможном расстоянии друг от друга и их количество определяется размерами участка покрытия, назначенного по определенным признакам.

2.3.4. Проведение исследований

Исследования проводятся в следующей последовательности:

- отслоенный конец полосы защитного покрытия заправляется и закрепляется в универсальном захвате;

- при использовании электронных адгезиметров, выполняется их настройка, которая заключается в установке порогового усилия срабатывания прибора и времени отслаивания полосы (для полиэтиленового покрытия порог срабатывания прибора составляет 50 Н, время отслаивания – не менее 10 с);

- универсальный зажим с закрепленной полосой покрытия присоединяется к адгезиметру;

- отслаивание полос покрытия производится равномерно под углом 180° к поверхности трубы на длину 50-100 мм, позволяющую определить устойчивое усилие отслаивания;

- характер разрушения клеевого подслоя определяется визуально, при этом выделяются следующие варианты разрушения: адгезионный (обнажение до ме-

талла); когезионный (отслаивание по подклеивающему слою или по грунтовке); смешанный (совмещение адгезионного и когезионного характеров разрушения).

Порядок определения прочности адгезии защитного покрытия показаны на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Электронный адгезиметр АМЦ2-20 с универсальным захватом (а) и подготовленные к отслаиванию полосы защитного покрытия (б)

2.3.5 Обработка результатов исследований

Получаемые в результате исследований данные заносятся в протокол, в котором также указывается:

- срок хранения трубы;
- признаки, по которым выполнено назначение участка защитного покрытия, в пределах которого производилось определение адгезии;
- характер разрушения клеевого подслоя.

При большем объеме полученных данных, результаты определения адгезии рекомендуется представлять в виде поверхностных диаграмм. Поверхностная диаграмма, характеризующая распределение адгезии в пределах контрольной поверхности, показана на рисунке 2.14, а. Дополнительно, может быть проведен статистический анализ полученных данных (рисунок 2.14, б), на основании которого, по характеру распределения значений адгезии в пределах назначенных диапазо-

нов, могут быть выявлены дополнительные признаки, определяющие зависимости состояния защитного покрытия от срока хранения труб.

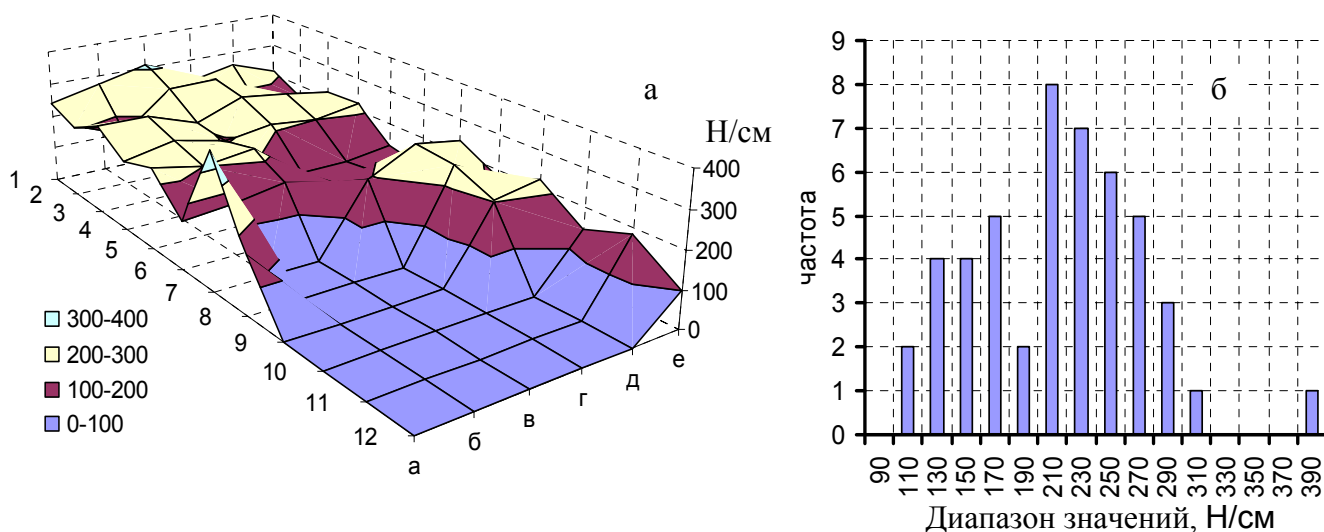


Рисунок 2.14 – Результаты определения адгезии защитного покрытия в пределах назначенного участка контроля: а) поверхностная диаграмма; б) гистограмма

2.4. Изменение внутренних напряжений многослойных полимерных покрытий при низких температурах

При хранении труб на открытых площадках вследствие сезонных и суточных колебаний температуры окружающей среды происходит периодический нагрев и охлаждение (и соответственно, изменение объема), как металла трубы, так и слоя полимерного покрытия. В силу ряда специфических свойств пластических масс (низкий коэффициент температуропроводности, гетерогенность и гетерофазность и т. д.) изменение объема материала по толщине стенки изделия происходит неравномерно. Так, вследствие низкого коэффициента температуропроводности по толщине стенки нагреваемого или охлаждаемого изделия возникает значительный температурный градиент, приводящий к неравномерному изменению объема материала. Поскольку скорость процесса охлаждения или нагревания пластических масс определяется температурой, то при наличии температурного градиента скорость этих процессов различна по толщине стенки изделия, следовательно, по-разному изменяется объем в отдельных слоях материала.

Порядок расчета температурных напряжений следующий. Температуропроводность материала ($\text{м}^2/\text{с}$) может быть определена по выражению

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} = \frac{\pi \cdot D_n \cdot \delta}{\Delta t} \quad (2.17)$$

где k – коэффициент теплопроводности, Вт/м К;

ρ – плотность полиэтилена, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c – удельная теплоемкость, Дж/кг·К;

D_n – наружный диаметр трубы, м;

Δt – время, за которое будет происходить изменение температуры в слое, с;

δ – толщина слоя, м.

Толщина слоя, температура которого снижается до уровня, соответствующего температуре окружающей среды за период времени, равный Δt , может быть определена по выражению

$$\delta_c = \frac{k \cdot \Delta t}{\pi \cdot D_n \cdot \rho \cdot c} \quad (2.18)$$

Механизм охлаждения материала покрытия имеет следующие особенности. В первый момент слой материала, соприкасающийся с холодной средой, резко охлаждается, в то время как температура средних слоев еще достаточно высока. Поверхностные слои материала сжимаются в соответствии с коэффициентом термического расширения данного материала, чему препятствуют внутренние горячие слои.

Поскольку задача решается для условий экстремально низких температур, то можно полагать, что величина напряжений (σ) определяется в предположении, что напряжения, возникающие в покрытии, связаны с величиной относительной деформации в соответствующем направлении (ε) линейной зависимостью:

$$\sigma = E_n \varepsilon$$

где E_n – Модуль упругости материала, Па;

Термические напряжения в этих условиях в рассматриваемом слое материала, если предположить, что материал деформируется упруго, могут быть рассчитаны исходя из условия

$$\sigma_{xT} = \sigma_{yT} = E \cdot \beta (T_{\text{охл}} - T_{\text{экс}}) \quad (2.19)$$

где σ_{xT} – термические напряжения в плоскости слоя в направлении оси X, МПа;

σ_{yT} – термические напряжения в плоскости слоя в направлении оси Y, МПа;

E – модуль упругости материала покрытия, МПа;

β – коэффициент температурного расширения материала покрытия, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

$T_{\text{охл}}$ – температура охлаждения трубы при нанесении покрытия, при которой были сформированы остаточные температурные напряжения, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{\text{охл}}$ – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

Дальнейшее охлаждение покрытия происходит также послойно. Однако при хранении, можно полагать, что охлаждение покрытия происходит равномерно с двух сторон. При этом решение такой задачи в подобной постановке усложняется. Колебания температуры при хранении происходят довольно плавно, в связи с чем, в каждый отдельный момент времени распределение температурного поля по толщине покрытия можно считать равномерным. Таким образом, в грубом приближении можно считать, что задача формирования температурных деформаций, возникающих в покрытии труб при хранении, носит осесимметричный характер. В этом случае ось симметрии для распределения температуры совпадает с осью трубы, тогда соответствующие напряжения и деформации распределятся симметрично относительно той же оси и дифференциальные уравнения равновесия будут иметь простые решения.

Таким образом, упрощенная методика может быть предложена в допущении, что температура, в силу малой толщины покрытия, распределяется по всей его толщине равномерно. Тогда решение задачи теплопроводности отпадает, остаются только температурные напряжения, вызванные перепадом температуры и разницей значений коэффициентов температурного расширения полимера и металла.

Пусть T обозначает переменную температуру, отсчитываемую от некоторого начального состояния тела, и β – постоянный коэффициент линейного расши-

рения материала. В таком случае вследствие нагревания до температуры T_2 каждый элемент тела при условии свободного расширения получил бы равномерное удлинение по всем направлениям $\varepsilon = \varepsilon_{rr} = \varepsilon_{zz} = \beta \cdot \Delta T$, $\varepsilon_{rz} = 0$.

Свободному расширению покрытия при нагревании ничего не препятствует, однако, в ходе его охлаждения, деформациям сжатия в покрытии препятствует металл трубы, который при охлаждении получает деформации сжатия значительно меньшие по величине в сравнении с деформациями материала покрытия. Это условие поясняет причину формирования при низких температурах напряжений растяжения в покрытии, величина которых приближенно может быть определена по выражению

$$\sigma_{\Delta\beta} = (\beta_{\text{п}} - \beta_{\text{м}}) \cdot (T_{\text{с}} - T_{\text{хр}}) \cdot E \quad (2.20)$$

где $\beta_{\text{п}}$ – коэффициент линейного расширения материала покрытия, 1/град;

$\beta_{\text{м}}$ – коэффициент линейного расширения металла, 1/град;

$E_{\text{п}}$ – модуль упругости материала покрытия, Н/м²;

$T_{\text{с}}$ – температура нанесения покрытия;

$T_{\text{хр}}$ – температура хранения.

Выводы:

1. Сформирован комплекс методик для оценки изменения механических свойств полимерных покрытий труб при длительном хранении в условиях северного климата, включающий методики испытаний; на растяжение твердости, прочность адгезии и внутренние напряжения тепловой природы.

2. В основу методики испытания полимерных покрытий на растяжение положен ГОСТ 11262 «Пластмассы. Метод испытаний на растяжение». Испытания выполняются на испытательной машине, обеспечивающей постоянную стандартизированную скорость растяжения стандартных испытательных образцов, полученных с помощью вырубной матрицы. По результатам измерений выстраивается график «нагрузка-удлинение» и определяются показатели: прочность при растяжении и разрыве, предел и условный предел текучести, относительные удлинения и удельная работа деформации.

3. Для исследования твердости эластичных материалов (резины, пластмас-

сы) используют методы вдавливания стальных стержней по ГОСТ 263-75 (метод Шора) или стальных сфер по ГОСТ 4670-91 (метод Бринелля). Твердость по Шору НА определяется от 0 до 100 единиц, при этом 0 соответствует максимальному проникновению стержневого индентора (2,54 см), а 100 – нулевому проникновению. Твердость по Бринеллю НВ – определяется как отношение нагрузки F на сферический индентор (шарик) к площади поверхности его отпечатка $S_{от}$ на испытуемом материале ($НВ=F/S_{от}$).

4. Методика определения прочности адгезии регламентируется ГОСТ Р 51164. Метод заключается в определении усилия F отслаивания полосы шириной b (10-40мм) от поверхности трубы и расчета величины адгезии A как отношения измеренных показателей: $A=F/b$.

5. Величина внутренних напряжений в теле полимерных покрытий формируется под воздействием перепада температур и разности коэффициентов линейного расширения с учетом температуры нанесения покрытия на поверхность трубы и модуля его упругости.

3. ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

3.1. Изменение прочностных свойств полиэтиленовых покрытий под влиянием низких атмосферных температур

3.1.1. Экспериментальные исследования влияния низких температур на механические свойства полимерных покрытий

Оценка влияния низких температур на механические характеристики материала покрытий труб выполнена по результатам испытаний на растяжение образцов, изготовленных из фрагментов трехслойного защитного покрытия заводского нанесения, отобранных с труб производства ОАО «Выксунский металлургический завод», имеющих сроки хранения от четырех до одиннадцати лет на открытых площадках в условиях умеренной II₅ климатической зоны (см. таблица 1).

Таблица 1 – Характеристика образцов

№ фрагмента	Геометрические размеры трубы, мм (диаметр × толщина стенки)	Продолжительность хранения, лет	Количество изготовленных образцов для испытаний
1	1020×16	4	27
2	1220×14	7	27
3	1020×10	11	27

Испытания проводились в соответствии с методикой, изложенной в подразделе 2.1 и в соответствии с ГОСТ 11262-80 «Пластмассы. Метод испытаний на растяжение» [22]. Выбор обоснован тем, что полиэтиленовые материалы являются термопластичными полимерами и представляют собой высокомолекулярные соединения.

Условия испытания образцов на растяжение следующие:

- испытания выполнены с использованием разрывной машины фирмы Zwick/Roell (Германия), оснащенной термостатирующей ячейкой для обеспечения заданной температуры испытания;

- температура испытания – плюс 20° С, минус 20° С, минус 45° С;
- форма образца – в соответствии с ГОСТ 11262, тип 5 (см. рисунок 2.2);
- исходная длина деформируемой части образца – 25 мм (см. таблицу 2.1);
- скорость растяжения – в соответствии с рекомендациями таблицы 2.2.

Образцы, изготовленные из каждого отобранного фрагмента защитного покрытия, сориентированы вдоль оси труб и подразделены на три группы, каждая из которых испытывалась при заданной температуре. Общее количество групп образцов – 9, количество образцов в группе – 3. В качестве результата испытаний принималось среднеарифметическое значение из 3-х измерений.

Вид кривых деформирования образцов при растяжении в зависимости от температуры и сроков хранения представлен на рисунке 3.1.

Как видно из рисунка, формы кривых деформации экструзионного термопласта несколько отличается от стандартного типа кривой 1-го типа (см рисунок 2.5) и имеют два выпуклых экстремума, соответствующих пределу текучести при растяжении $\sigma_{рт}$ и прочности при разрыве $\sigma_{рр}$ (рисунок 3.1, а).

На полученных кривых деформации независимо от срока хранения до 11 лет включительно экстремальные точки, соответствующие пределу текучести при растяжении $\sigma_{рт}$ и прочности при разрыве $\sigma_{рр}$, фиксируются соответственно на удалении 10-15 и 90-95% от общей длины кривых относительного удлинения $\epsilon_{рр}$.

Из конфигурации кривых видно также, что независимо от срока хранения в течение 11 лет со снижением температуры от +20 до -45°С значения относительного удлинения $\epsilon_{рр}$ уменьшаются, а расстояния между экстремальными точками $\sigma_{рт}$ и $\sigma_{рр}$ сближаются до условия $\sigma_{рт} \approx \sigma_{рр}$ (рисунок 3.1, б).

Кроме того, можно констатировать, что при снижении температур из области положительных (+20 °С) в область отрицательных значений (до -45 °С), вся конфигурация кривых относительного удлинения независимо от диапазона 11-летнего срока хранения сдвигается влево с увеличением упругого участка деформирования и с практически неизменным углом его наклона к оси ординат, при этом показатели $\sigma_{рт}$ и $\sigma_{рр}$ возрастают (рисунок 3.1, в).

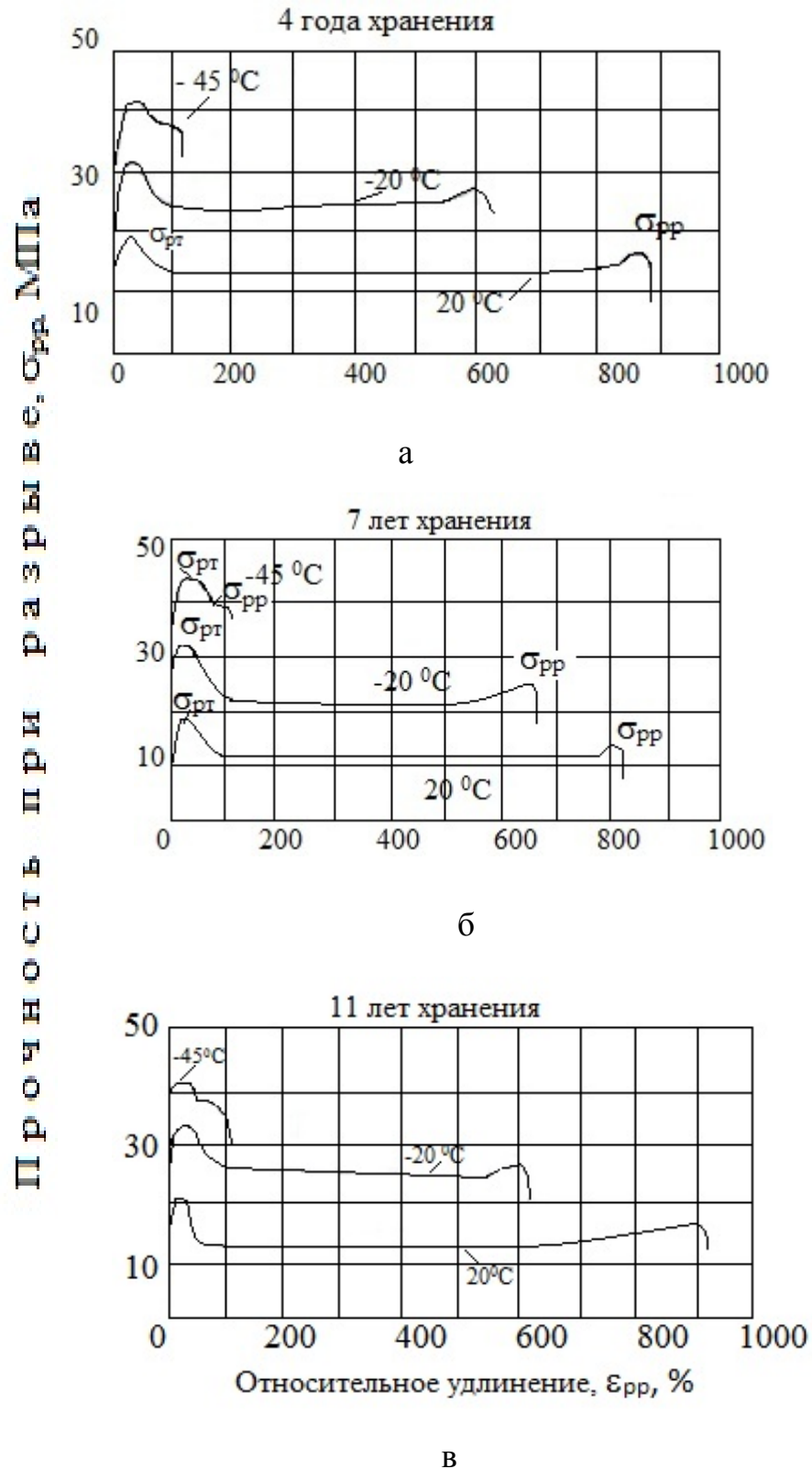


Рисунок 3.1. Кривые деформирования образцов полимерных покрытий при растяжении

Это хорошо видно из таблицы 3.2, в которой обобщены результаты рассматриваемых испытаний.

Таблица 3.2 – Результаты испытания образцов на растяжение и разрыв при разных температурах

Температура испытаний, $t, ^\circ\text{C}$	Срок хранения, годы			Среднее значение параметра	Однородность выборки, %	Примечание
	4	7	11			
<u>а. Предел текучести при растяжении, $\sigma_{\text{рт}}$, МПа</u>						
+20	19,4	18,9	20,5	19,6	8,2	
-20	32,1	31,6	34,3	32,7	8,3	
-45	42,6	44,7	40,5	42,6	9,9	
<u>б. Прочность при разрыве, $\sigma_{\text{рр}}$, МПа</u>						
+20	15,0	14,5	15,9	15,1	9,3	
-20	27,5	25,0	25,5	26,2	9,5	
-45	37,6	41,0	38,0	38,9	7,7	
<u>в. Относительное удлинение при разрыве, $\epsilon_{\text{рр}}$, %</u>						
+20	879	819	935	877,7	13,2	
-20	600	650	570	606,7	13,2	
-45	115	108	101	112,0	12,5	

Здесь следует обратить внимание на однородность полученных выборок.

Так, для прочностных показателей $\sigma_{\text{рт}}$ и $\sigma_{\text{рр}}$ однородность выборок составляет 8-10%, а для показателя относительного удлинения не превышает 12-13%. Это свидетельствует о том, что в процессе 4-х, 7-ми и 11-летнего хранения на открытых площадках испытанные образцы сохраняют свои механические свойства во времени практически неизменными. Иллюстрация полученного вывода для наглядности представлена в виде столбчатых диаграмм на рисунке 3.2.

Из диаграмм видно, что предел текучести $\sigma_{\text{рт}}$ (см. рисунок 3.2, а) и прочность при разрыве $\sigma_{\text{рр}}$ (см. рисунок 3.2, б) возрастают со снижением температуры от +20 до -45 °С. Это связано с уменьшением подвижности мономерной структуры полимеров, последовательным её твердением вплоть до предельного состояния и хрупкого разрушения, которое достигается при более низкой температуре и возникновения условия:

$$\sigma_{\text{рт}} \approx \sigma_{\text{рр}} \quad (3.1)$$

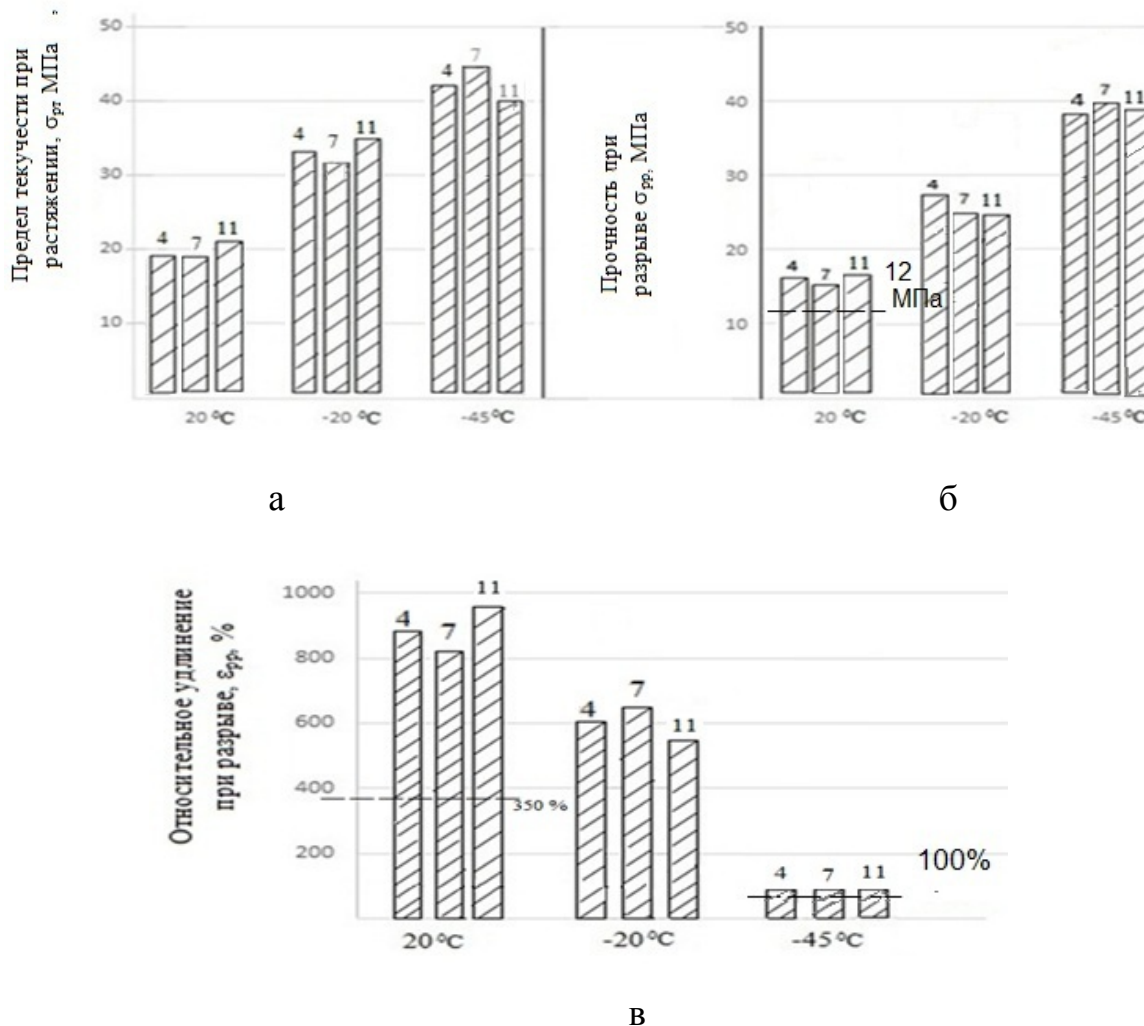


Рисунок 3.2. Результаты испытания образцов полимерных покрытий на растяжение и разрыв при разных температурах: 12 МПа, 350%, 100% - допустимый уровень (не менее) параметров при соответствующих температурах

Подтвердить этот тезис можно следующим образом, имея в виду, что однородность результатов испытаний (см. таблицу 3.2) позволяет оперировать средними значениями параметров $\sigma_{рт}$ и $\sigma_{рр}$ и построить зависимости их изменения в функции температуры (рисунок 3.3):

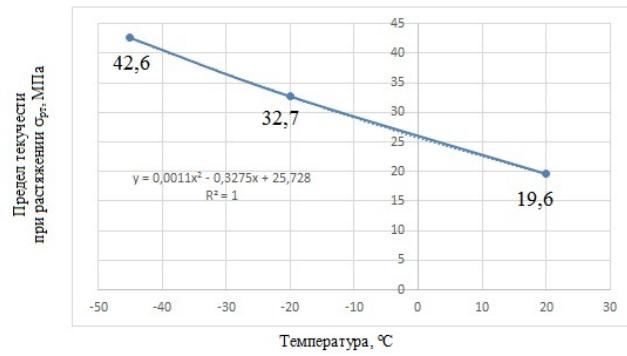
Эти зависимости аппроксимируются квадратичными функциями при $R^2=1$:

– предел текучести при растяжении $\sigma_{рт}$:

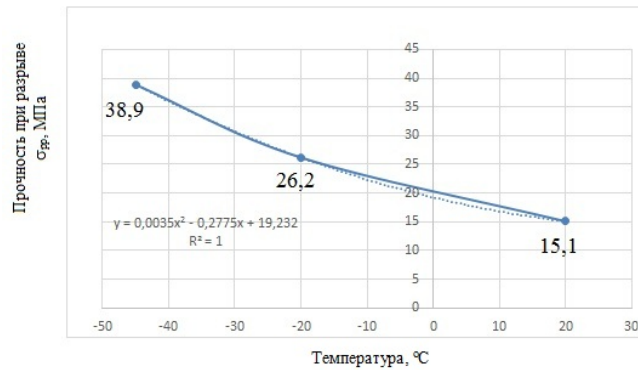
$$\sigma_{рт} = 0,0011t^2 - 0,3275t + 25,728; \quad (3.2)$$

– прочность при разрыве, $\sigma_{рр}$:

$$\sigma_{рр} = 0,0035t^2 - 0,2775t + 19,232.. \quad (3.3)$$



а



б

Рисунок 3.3. Изменение параметров прочности испытанных образцов в зависимости от температуры: а – предел текучести $\sigma_{рт}$ при растяжении; б – прочность при разрыве $\sigma_{рр}$.

Графически эти зависимости, пролонгированные до температуры $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в соответствии с выражениями (3.2) и (3.3), представлены совместно на рисунке 3.4.

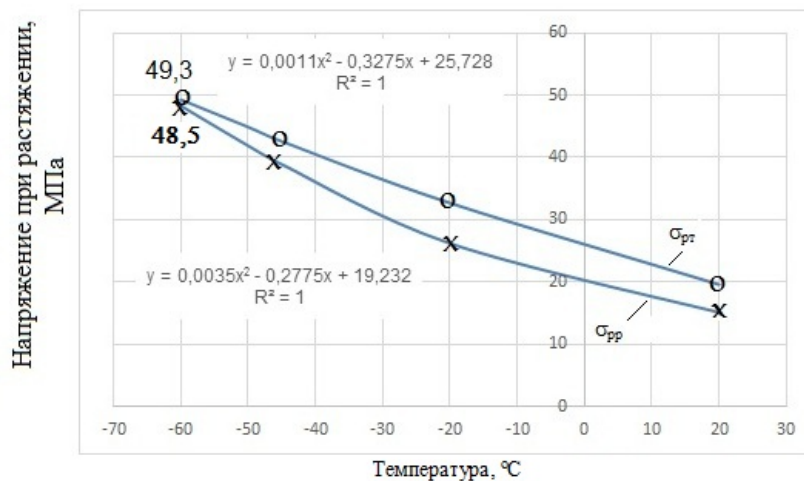


Рисунок 3.4. Зависимость изменения прочностных свойств полимерных покрытий с 11-летним сроком хранения в атмосферных условиях умеренно-холодного климата (II₄)

Как видно из этого рисунка, кривые σ_{pp} и $\sigma_{рт}$ фактически пересекаются при температуре ниже -60 °С. Это означает, что в точке пересечения этих кривых начинает действовать равенство (3.1): $\sigma_{рт} \approx \sigma_{pp}$. Следует заметить, что допустимая температура эксплуатации трехслойного полимерного покрытия типа «С» в соответствии с ГОСТ 31448-2012 составляет -60 °С.

Аналогичным образом можно получить зависимость изменения относительного удлинения ε_{pp} испытанных образцов (см. таблицу 3.2) в диапазоне температур от $+20$ до -45 °С.

Эта зависимость также описывается квадратичной функцией при $R^2=1$ и имеет вид:

$$\varepsilon_{pp} = -0,1066t^2 + 6,775t + 784,83. \quad (3.4)$$

Из анализа этого уравнения следует, что если параметр ε_{pp} приравнять к нулю ($\varepsilon_{pp}=0$), то решив квадратное уравнение

$$-0,1066t^2 + 6,775t + 784,83 = 0, \quad (3.5)$$

можно определить значение максимальной (по модулю) отрицательной температуры, при которой испытанный полимерный материал теряет пластичность и превращается в хрупкое тело.

Решение уравнения (3.5):

– определяется дискриминант квадратного уравнения:

$$D = b^2 - 4ac = (6,775)^2 - 4 \cdot (-0,1066) \cdot 784,83 = 380,5521;$$

– устанавливается факт, что $D = 380,5521 > 0$;

– вычисляются два действительных корня:

$$x_{1,2} = \frac{-6,775 \pm \sqrt{380,5521}}{2 \cdot (-0,1066)};$$

$$x_1 = 123,28;$$

$$x_2 = -59,72.$$

В качестве искомого значения принимается $x_2 = -59,72 = t$.

Таким образом, при температуре $t = -59,72 \text{ } ^\circ\text{C}$ испытанный полимерный материал переходит в хрупкое состояние ($\epsilon_{pp}=0$), что иллюстрируется рисунком 3.5.

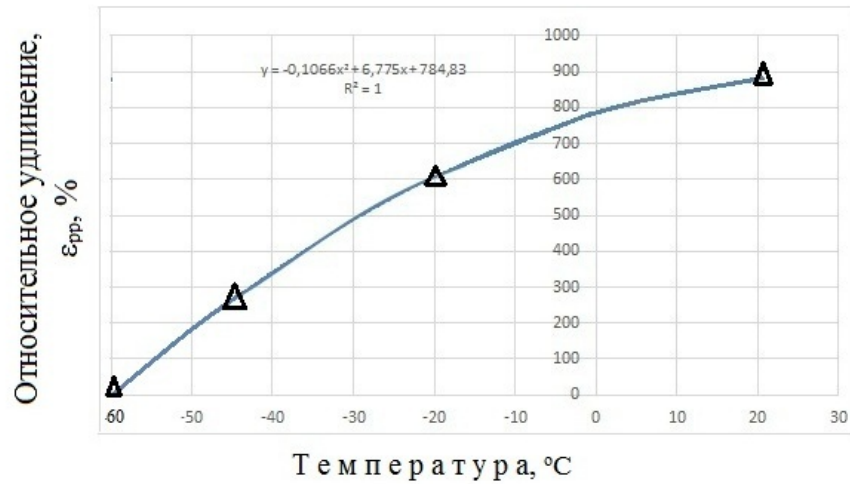


Рисунок 3.5. Изменение относительного удлинения ϵ_{pp} образцов полимерных покрытий с 11-летним сроком хранения в атмосферных условиях умеренно-холодного климата (II₄)

Таким образом, на основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1). Устойчивость механических свойств защитных полимерных покрытий в течение 4-х, 7-ми и 11-летнего срока хранения труб на открытых площадках в условиях умеренного климата (II₅) оценивалась методом лабораторных испытаний контрольных образцов на растяжение и разрыв в соответствии с ГОСТ 11262-80 и характеризуется стабильностью прочностных показателей в рассматриваемом промежутке времени, превышая предельно допустимые значения, регламентированные ГОСТ 31448-2012.

2). Полученные кривые деформации испытанных образцов экструзионного полимерного покрытия несколько отличаются от кривых 1-го типа, регламентированного ГОСТ 11262-80 для пластмасс, и имеют два выпуклых экстремума, соответствующие пределу текучести при растяжении $\sigma_{рт}$ и показателю прочности при разрыве σ_{pp} при этом показатели пластичности $\sigma_{рт}$ превышают значения показателей прочности на разрыв σ_{pp} .

3). На основе удовлетворительной однородности полученных результатов лабораторных испытаний (8-10% для $\sigma_{рТ}$ и $\sigma_{рр}$; 12-13% для показателя $\varepsilon_{рр}$) можно констатировать практическую неизменность механических свойств образцов полимерных защитных покрытий с 4-х, 7-ми и 11-летним сроками хранения труб на открытом воздухе умеренного климата (II₅).

4). При снижении температуры в диапазоне от +20 до -45 °С предел текучести $\sigma_{рТ}$ при растяжении и напряжение разрушения $\sigma_{рр}$ испытанных образцов закономерно возрастают с тенденцией сближения их численных значений при температуре около -60 °С ($\sigma_{Т} \approx \sigma_{р}$ при $t \approx -60$ °С).

5). Параметр относительного удлинения $\varepsilon_{рр}$ в том же диапазоне температур от +20 до -45 °С для испытанных образцов закономерно уменьшается и в соответствии с этой закономерностью при температуре около -60 °С стремится к нулю, превращаясь в хрупкое тело ($\varepsilon_{рр} = 0$).

6). По результатам испытаний образцов 4-х, 7-ми и 11-летнего срока хранения можно заключить, что полимерное защитное покрытие труб остается работоспособным в указанном промежутке времени при температуре до -45 °С с прогнозным пределом охрупчивания при -60 °С.

3.1.2. Изменение механических свойств защитных покрытий при длительном атмосферном хранении

Наблюдения проведены для двух климатических районов: II₄ – умеренно-холодный и II₅ – умеренный климат.

По результатам испытаний на растяжение образцов защитного покрытия труб аварийного запаса климатической зоны II₄ установлено (рисунок 3.6), что прямой зависимости изменения механических характеристик материала защитного покрытия при 11-летней продолжительности хранения в атмосферных условиях не наблюдается: условные среднестатистические тренды, приведенные на графиках, показывают практическую неизменность полученных показателей в 11-летний период проведенных наблюдений. Механические характеристики материала всех испытанных образцов соответствуют нормативным требованиям (рисунок 3.6 а,)

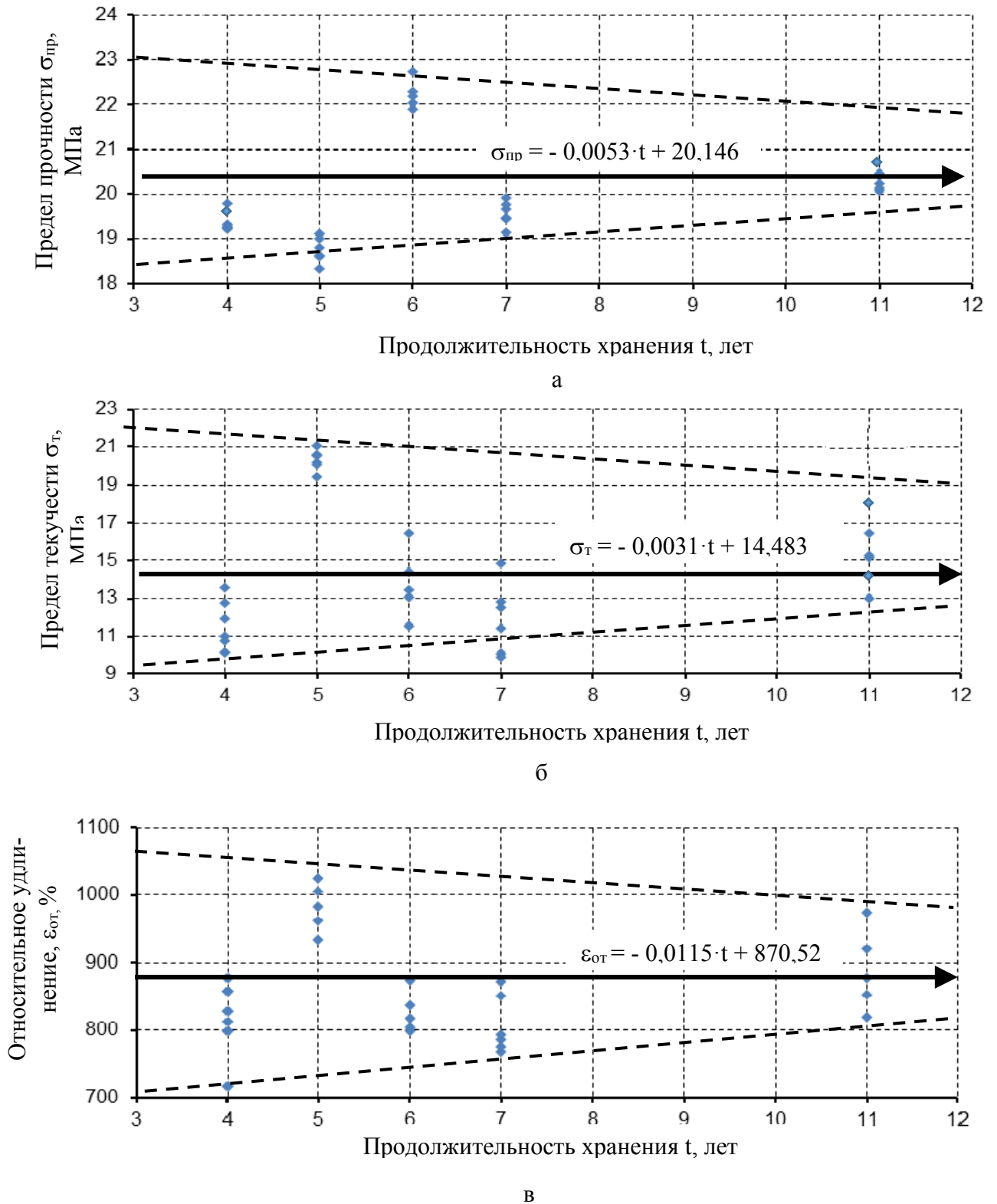


Рисунок 3.6 – Механические характеристики материала защитного покрытия труб аварийного запаса с различными сроками хранения в атмосферных условиях умеренно-холодного II₄ климата:
 - - - – границы коридора разброса измеренных характеристик; → условный среднестатистический тренд измерения прочностных характеристик

б). Разброс значений наблюдается в первые годы хранения, затем он стабилизируется. Об этом свидетельствуют условно проведенные границы коридора разброса, имеющие видимую тенденцию к сужению. Такая тенденция может трактоваться как признак снижения эластичности полимерного материала, что связано со старением его структуры во времени. Этот вывод подтверждается испытанием образцов на относительное удлинение (рисунок 3.6, в), показатели которого напрямую характеризуют состояние пластичности исследуемых полимеров, хотя условный тренд среднестатистических измерений за наблюдаемый промежуток времени (11 лет) остается практически неизменным.

Это означает, что полимерные покрытия труб, хранившихся в течение 11 лет на открытых площадках умеренно-холодного II₄ климата, остаются нормативно работоспособными, но с намечающимися признаками старения внутренней структуры.

Похожая тенденция разброса измеренных показателей наблюдается по результатам испытаний образцов из аварийных запасов климатической зоны умеренного II₅ климата (рисунок 3.7). Наблюдения проводились в течение 17 лет.

Здесь также прочностные показатели не выходят за пределы нормативных требований и характеризуются сужением границ разброса их значений. При этом наибольший разброс прочностных показателей наблюдается в первые годы (5-7 лет) хранения труб. В последующие 7-10 лет эти показатели стабилизируются благодаря консолидационным процессам старения в структуре полимеров, что приводит к постепенному ухудшению их механических свойств: об этом свидетельствует понижение условного тренда среднестатистических значений прочностных показателей.

Важным параметром, характеризующим способность материала сопротивляться ударным нагрузкам, является удельная работа деформации.

Удельная работа деформации является мерой энергетической емкости или долговечности материала и может служить общей характеристикой сумма площадей элементарных трапеций (рисунок 3.8). Расчетное выражение следующее

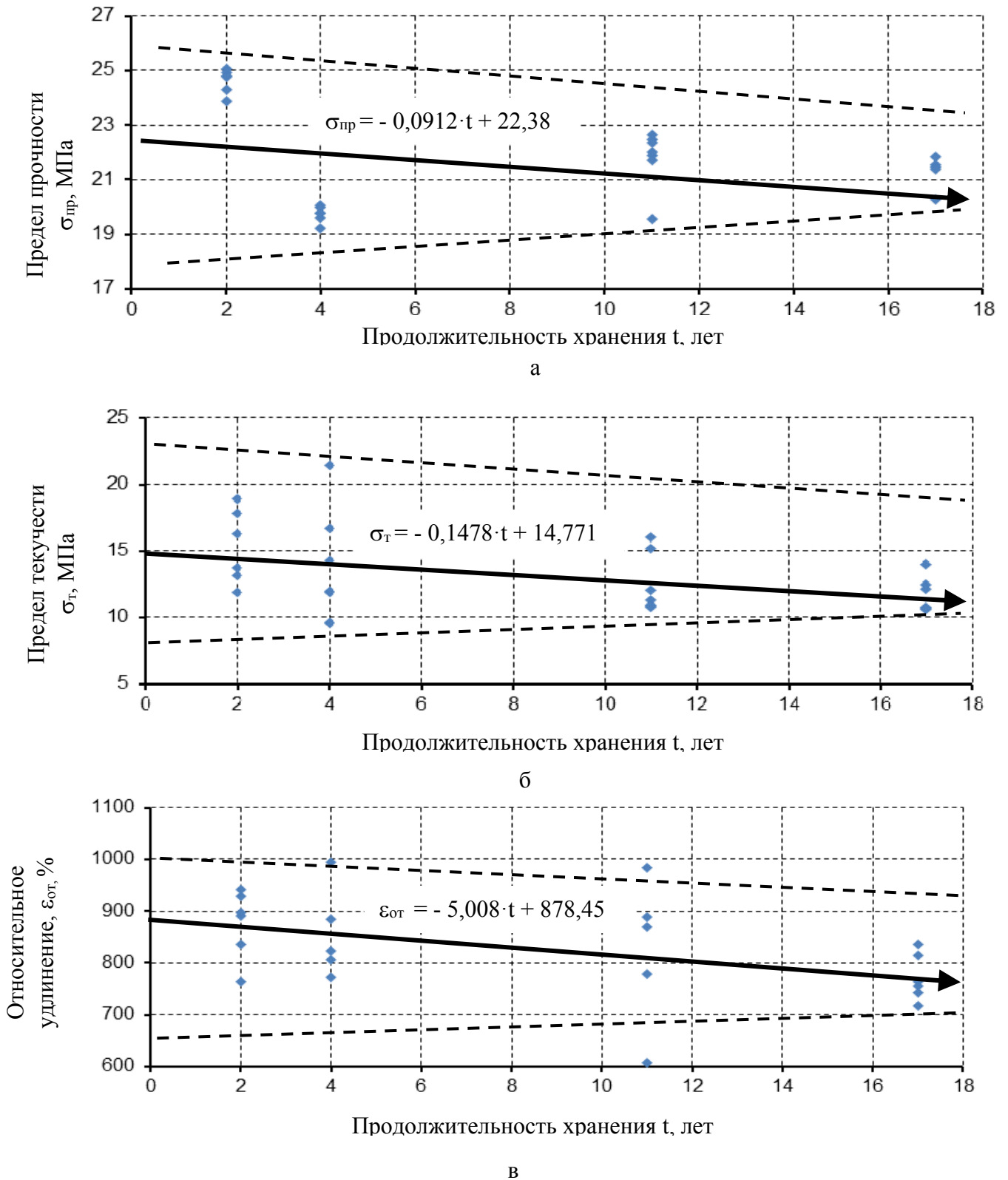


Рисунок 3.7 – Механические характеристики материала защитного покрытия труб аварийного запаса с различными сроками хранения в атмосферных условиях умеренного П₅ климата:

- - - – границы коридора разброса измеренных значений → – условный тренд изменения среднестатистических значений измеренных показателей

механических качеств материала: чем больше показатель удельной работы деформации до разрыва, тем приспособленнее материал к сопротивлению внешним, а том числе ударным, нагрузкам.

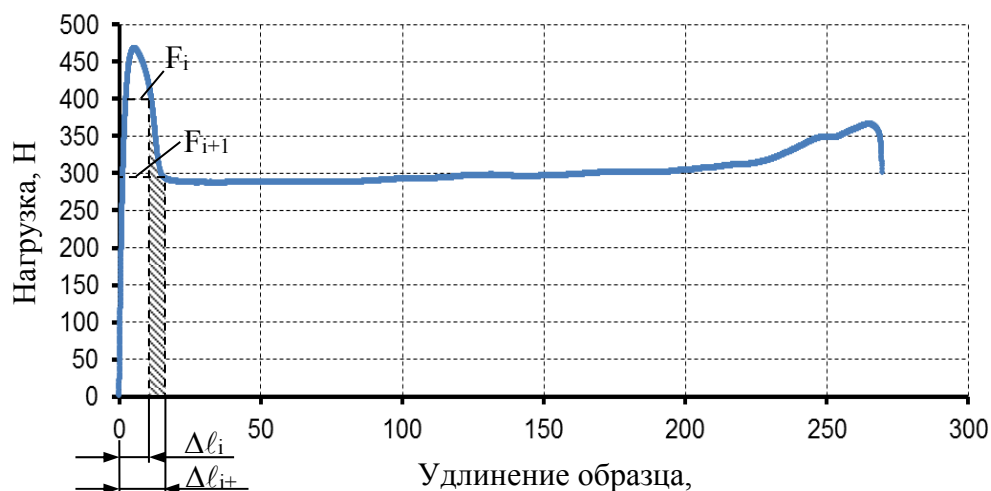


Рисунок 3.8 – Диаграмма растяжения образца защитного покрытия

Таким образом, удельная работа деформации $A_{уд}$ выражается величиной работы A_i , потребной для доведения образца до разрыва, отнесенной к единице его объема:

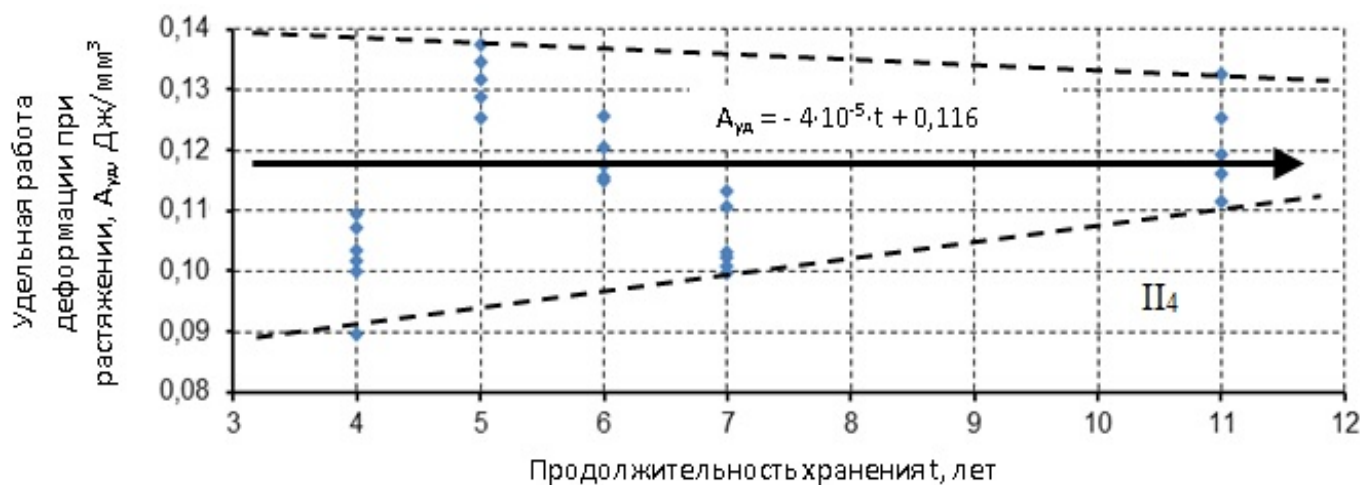
$$A_{уд} = \frac{A_i}{V_{обр}}, \quad (3.7)$$

Работа деформации A_i образцов защитного покрытия труб с различными сроками хранения определялась по диаграмме «нагрузка-перемещение» как сумма площадей элементарных трапеций (рисунок 3.8). Расчетное выражение следующее:

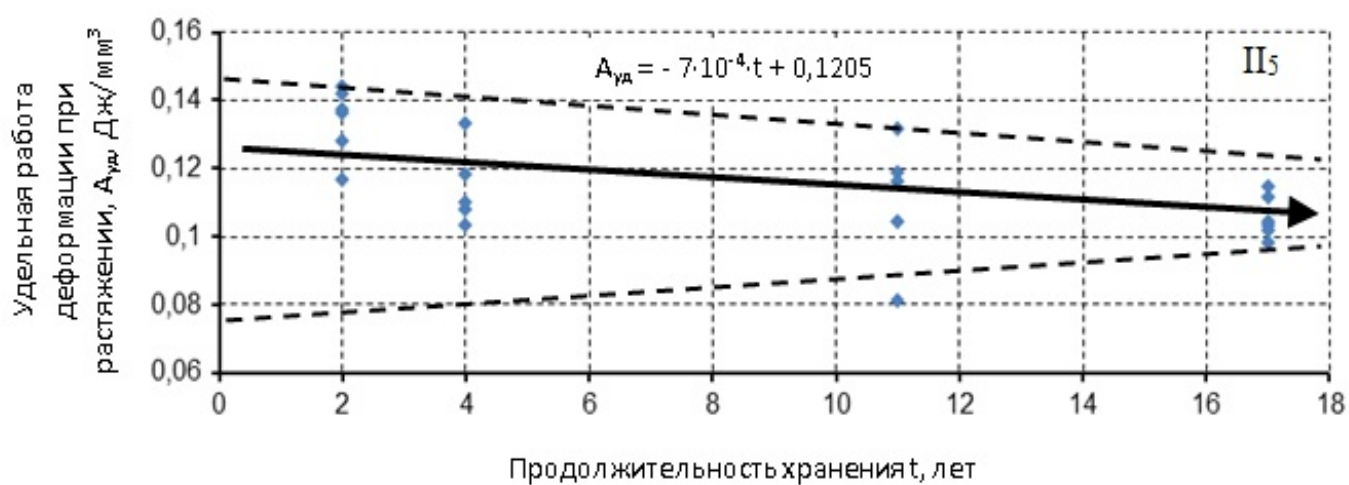
$$A_i = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \right) \cdot (\Delta l_{i+1} - \Delta l_i) \right), \quad (3.8)$$

где i – шаг нагружения образца; F_i, F_{i+1} – нагрузка на каждом шаге нагружения, Н; $\Delta l_i, \Delta l_{i+1}$ – удлинение образца на каждом шаге нагружения, м; n – общее количество шагов нагружения.

Результаты расчета удельной работы деформации $A_{уд}$ образцов защитного покрытия для климатических зон умеренно-холодного П4 и умеренного П5 климатов приведены на рисунке 3.9. Как видно из этого рисунка, границы коридора



а



б

Рисунок 3.9 – Удельная работа деформации образцов защитного покрытия труб с различными сроками хранения в атмосферных условиях: а – климатическая зона П4 (умеренно-холодный климат); б – климатическая зона П5 (умеренный климат)

разброса полученных расчетных величин $A_{уд}$ также имеют тенденцию к сужению во времени, причем в первые годы хранения (до 5-7 лет) наблюдается неустойчивость измеренных показателей с последующей их стабилизацией во временной перспективе (до 11-17 лет).

Построение условного тренда сохраняемости среднестатистических расчетных показателей удельной работы деформации $A_{уд}$ дает основание констатировать, что для умеренно-холодного П4 климата этот тренд на протяжении 11 лет наблюдений остается постоянным, т.е. работоспособность покрытия за этот пери-

од не изменяется; в то же время для климатической зоны умеренного П₅ климата тренд проявляет тенденцию к снижению на временном отрезке до 17 лет наблюдений, что характеризует ухудшение механических свойств исследуемого покрытия, т.е. снижение продолжительности работоспособного состояния полимерного покрытия в этих условиях и временных рамках.

Таким образом, выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- механические свойства защитных покрытий остаются в рамках первоначальных значений при хранении труб в течение 11 лет в условиях умеренно-холодного П₄ климата и претерпевают тенденцию к снижению показателей при 17-летнем хранении в условиях умеренного П₅ климата, но не выходят за пределы допустимых значений;

- показатель удельной работы деформации, как меры приспособленности материала к внешним нагрузкам, остается практически неизменным в течение 11-летнего хранения в условиях умеренно-холодного климата П₄ и проявляет тенденцию к снижению при 17-летнем хранении в умеренном климате П₅;

- характер сужающихся границ разброса механических показателей исследованных полимерных покрытий является признаком старения их внутренней структуры при длительном хранении на открытых площадках, причем с увеличением времени воздействия этот процесс интенсифицируется.

3.2. Изменение адгезионной прочности полимерных покрытий во времени

3.2.1. Классификация механизмов деформации и разрушения адгезионных связей покрытия с металлом трубы

Механизм деформации и разрушения адгезионной связи определяется:

- температурой проведения исследований;
- физико-механическими характеристиками покрытия;
- физико-механическими характеристиками клеевого подслоя;

– особенностями нанесения эпоксидного грунтовочного слоя.

По результатам измерения адгезионной прочности покрытия труб аварийного запаса зафиксированы следующие варианты разрушения адгезионных связей (рисунок 3.10):

– адгезионное разрушение:

а) полоса покрытия отделяется от грунтовочного слоя, при этом клеевой подслоя остается на полосе;

б) полоса покрытия отделяется вместе с грунтовочным слоем от металла стенки трубы;

– когезионное разрушение:

а) при отрыве полосы происходит расслаивание клеевого подслоя, клеевой состав остается, как на полосе, так и на грунтовочном слое;

б) полоса значительно удлиняется (растягивается) при отрыве, клеевой слой остается на грунтовочном слое;

– смешанное разрушение – чередование отдельных участков полосы с различными механизмами разрушения клеевого подслоя.

Измерения адгезионной прочности покрытия труб аварийных запасов П4 климатической зоны показал, что в большинстве случаев разрушение адгезионных связей происходит по смешанному механизму (рисунок 3.10, б, в). Адгезионный тип разрушения наблюдается в одном случае (рисунок 3.10, а) при испытаниях покрытия труб 2008 г. выпуска (ОАО «Челябинский трубопрокатный завод», 1220×15,2 мм). Протяженность отслоенного участка полосы за период нагружения (20 с) составляла от 50 до 260 мм.

Испытания показали, что в данном случае адгезионная прочность соответствует нормативным требованиям, однако имеет место относительно свободное, равномерное отслаивание полос, что возможно объясняется особенностями грунтовочного слоя (например, меньшей шероховатостью поверхности).

Отрыв полос сопровождался их значительным удлинением. В некоторых случаях значительное удлинение полос может объясняться разогревом покрытия



Рисунок 3.10 – Механизм разрушения адгезионных связей:

а) адгезионный; б, в) смешанный

под действием солнечного излучения, вследствие чего происходит изменение физико-механических характеристик материала, при этом клеевой слой сохраняет исходные характеристики. Так же указанное явление будет иметь место при условии, когда исходные физико-механические характеристики покрытия окажутся ниже характеристик клеевого подслоя, а усилие отрыва участка полосы единичной площади превысит предел текучести материала покрытия.

Удлинение полос при отрыве показано на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Удлинение полос покрытия при отрыве

3.2.2 Расчетная модель адгезионной прочности с учетом работы адгезии и отрыва покрытия

Адгезионная прочность может выражаться как силой, так и работой отрыва полосы покрытия, причем эти параметры взаимосвязаны между собой. При этом сила отрыва зависит от угла действия растягивающего вектора и от деформационного поведения полосы отрыва в связи с ее удлинением при растяжении.

Для определения этих двух характерных параметров, определяющих адгезионную прочность сцепления защитного покрытия с металлической поверхностью трубы, разработана расчетная модель, в основу которой положены теоретические представления, изложенные в работе [66].

Эти представления заключаются в следующем.

Общая работа отслаивания полосы защитного покрытия складывается из работы разрушения клеевого соединения W_a , работы растяжения (деформирования) W_d , а также энергетических потерь, $W_{вн}$. Деформация при отрыве полосы покрытия от поверхности вызвана тем, что полоса отрывается не одновременно, и та ее

часть, которая уже оторвана от поверхности, под действием внешней силы изменяет свою форму и деформируется (рисунок 3.12).

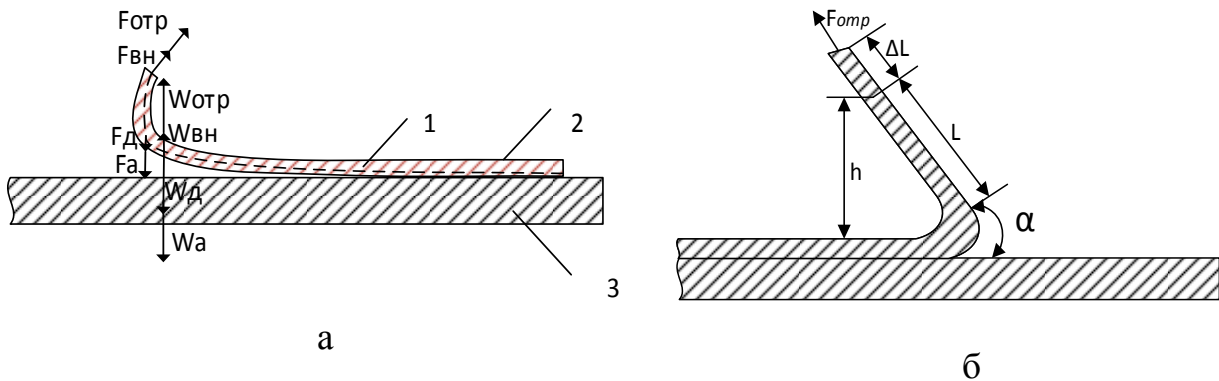


Рисунок 3.12 – Работа отрыва пленки методом отслаивания (а)

и схема отслаивания полосы покрытия (б): 1 – полоса покрытия; 2 – стенка трубы стальной

В общем виде адгезионная прочность, выраженная работой отрыва полосы защитного покрытия, равна:

$$W_{отр} = W_a + W_d - W_{вн}, \quad (3.9)$$

где W_a – работа разрушения клеевого слоя; Дж; W_d – работа деформирования отслоенного участка полосы покрытия; Дж; $W_{вн}$ – энергетические потери адгезионной связи, обусловленные наличием внутренних напряжений в покрытии, Дж.

Сила отрыва в расчете на единицу ширины отслаиваемой полосы $F_{отр}^{y\partial}$ измеряется в Н/см и определяется по следующей формуле

$$F_{отр}^{y\partial} = \frac{F_{отр}^*}{b}, \quad (3.10)$$

где $F_{отр}^*$ – истинное усилие отрыва полосы, Н; b – ширина полосы, см.

Сила отрыва в начале процесса отрыва полосы от поверхности, как правило, больше, чем в процессе отрыва, который осуществляется с одновременным удлинением полосы отрыва и в условиях разнотемпературности сред при проведении испытаний. При этом истинное усилие отрыва полосы прямым измерением определить не удастся.

Эта задача может быть решена с помощью предлагаемой расчетной модели, принципы построения которой изложены ниже.

В случае, когда полоса покрытия не удлиняется под действием силы отрыва, а сила отрыва действует нормально к площади контакта, то работа отрыва на единицу площади контакта определяется выражением:

$$W_{\text{отр}} = \frac{F_{\text{отр}} \cdot h}{L \cdot b}, \quad (3.11)$$

где L – протяженность отслоенного участка контрольной полосы покрытия, м; h – перемещение отслаиваемого участка полосы покрытия по нормали к поверхности стенки трубы, м.

Числитель формулы (3.11) показывает работу сил отрыва при перемещении пленки на расстояние, равное h . В случае, если $L = h$, т. е. длина оторванной части полосы равна пути перемещения полосы h , правая часть этого уравнения становится равной правой части уравнения (3.10). Фактически этого совпадения не обнаружено по следующим причинам:

- длина отслоенного участка полосы L не равна пути h в связи с наличием радиуса кривизны отрываемой полосы;
- под действием силы $F_{\text{отр}}$ происходит удлинение полосы на величину ΔL ;
- сила отрыва может быть направлена под углом к внешней поверхности стенки трубы.

Если до отрыва полосы покрытия ее длина была равна L , то после отрыва под действием внешней силы она увеличивается на ΔL . С учетом этого величина h будет равна:

$$h = L + \Delta L - x, \quad (3.12)$$

$$\text{где} \quad x = L \cdot \cos \alpha. \quad (3.13)$$

где α – угол между направлением действия силы отрыва и поверхностью, с которой производится отслаивание полосы покрытия.

С учетом этого выражение для определения величины h принимает вид

$$h = \Delta L + L(1 - \cos\alpha), \quad (3.14)$$

Тогда работа на единицу площади $L \cdot b$ отрыва полосы с учетом упругих свойств материала покрытия составит:

$$W_{\text{отр}} = \frac{F_{\text{отр}} [\Delta L + L(1 - \cos\alpha)]}{L \cdot b}. \quad (3.15)$$

При этом полная работа отрыва с учетом удлинения полосы ($\Delta L > 0$) будет иметь вид:

$$W_{\text{отр}}^n = F_{\text{отр}} [\Delta L + L(1 - \cos\alpha)]. \quad (3.16)$$

При $\Delta L = 0$ и нормальной силе отрыва, когда $\alpha = 90^\circ$, формула (3.15) трансформируется в выражение (3.11).

Исходя из этого, предложен следующий порядок расчета истинного значения адгезионной прочности защитного покрытия труб.

Из выражения (3.9) следует, что общая работа отрыва $W_{\text{отр}}$ полосы защитного покрытия складывается из работы разрушения клеевого соединения и работы растяжения W_δ , соответственно, работа разрушения определяется по выражению

$$W_a = W_{\text{отр}} - W_\delta. \quad (3.17)$$

Энергетические потери адгезионной связи $W_{\text{вн}}$ в условиях проведения исследований могут не учитываться, так как внутренние напряжения характеризуются малыми величинами и не оказывают существенного влияния на процесс отслаивания защитного покрытия при испытаниях.

Работа деформации полосы определяется по результатам предварительно проведенных механических испытаний образцов защитного покрытия. Удельная работа деформации образцов при удлинении изменяется по линейному закону, причем зависимость справедлива для всех полиэтиленовых композиций, использованных при нанесении покрытий в период с 2000 до 2014 г (рисунок 3.13). Выражение для расчета работы деформации полосы защитного покрытия имеет вид

$$W_d = a \cdot b \cdot L \cdot W_{уді}, \quad (3.18)$$

где a – толщина защитного покрытия, мм; b – ширина полосы, мм; L – длина отслоенного в результате испытаний участка покрытия, мм; $W_{уді}$ – удельная работа деформирования образца защитного покрытия, Дж/мм³.

Удельная работа деформирования образца защитного покрытия в зависимости от удлинения составит

$$W_{уді} = k_p \cdot \frac{\Delta L}{L}, \quad (3.19)$$

где k_p – определяемый экспериментально коэффициент пропорциональности между работой деформации и удлинением образца, равный 0,0135 Дж/мм³.

Значение коэффициента $k_p=0,0135$ получено из обработки графиков, представленных на рисунке 3.13. Графики построены по результатам анализа данных экспериментальных испытаний на растяжение контрольных образцов полимерных защитных покрытий, отобранных на площадках хранения аварийного запаса труб.

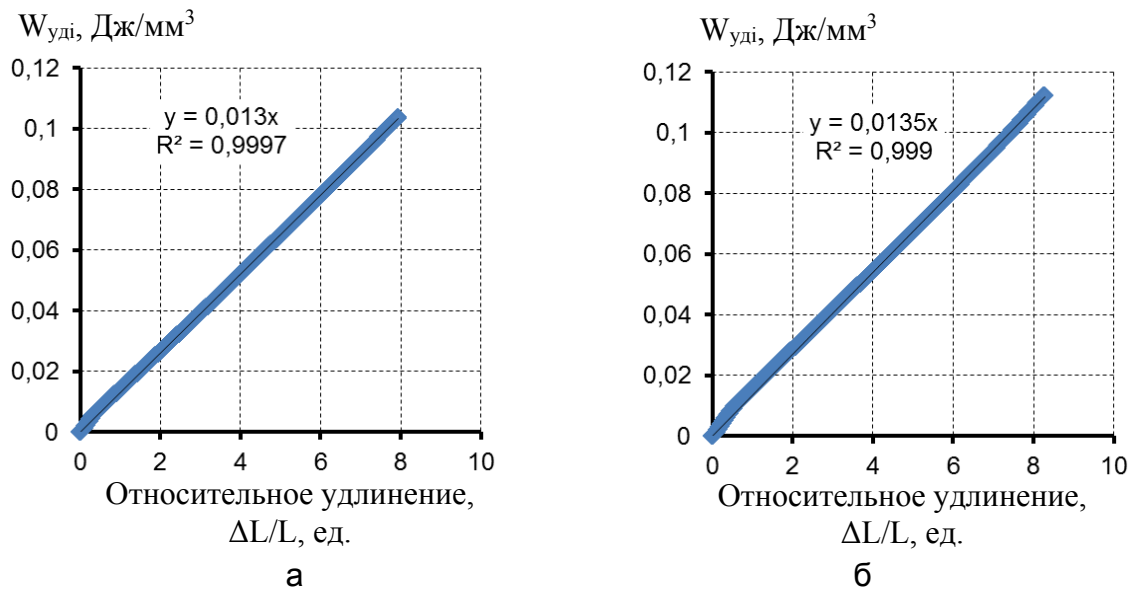


Рисунок 3.13 – Удельная работа деформирования образцов защитного покрытия труб со сроками хранения в атмосферных условиях: а) 7 лет; б) 4 года

Так как отбор контрольных образцов проводится на открытых площадках хранения, температура защитного покрытия может не соответствовать температу-

ре, при которой проводились механические испытания образцов, что приводит к искажению выполненных измерений.

Для учета этого фактора, воспользуемся экспериментальными данными, приведенными в работе [126] в виде диаграммы растяжения при разных температурах для образцов полиэтилена высокой плотности (рисунок 3.14, а).

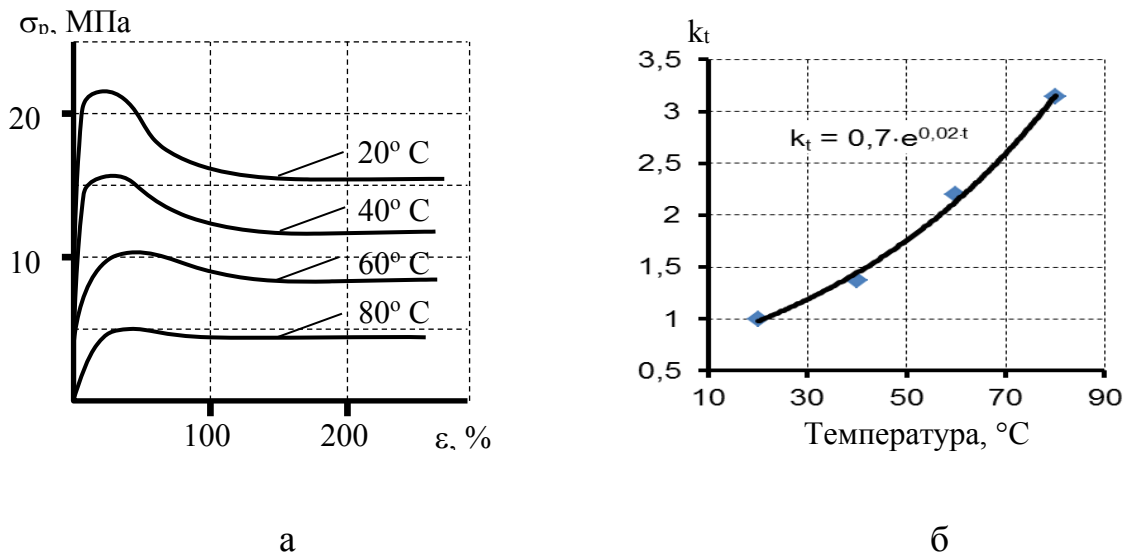


Рисунок 3.14 – Диаграммы растяжения образцов полиэтилена высокой плотности при температуре от 20 до 80 °С (а), значение поправочного коэффициента k_t (б)

Испытания проводились при температуре от 20 до 80 °С. Из представленных графиков видно, что при повышении температуры образцов параметр σ_p снижается. После обработки этих данных получен график, представленный на рисунке 3.14, б, позволяющий получить аналитическую форму поправочного температурного коэффициента k_t :

$$k_t = 0,7 \cdot e^{0,02t}, \quad (3.20)$$

где 0,7 и 0,02 – коэффициенты, определяемые экспериментально (рисунок 3.14, б);

t – температура проведения испытаний.

В результате, общее выражение для расчета полной работы деформации полосы с учетом температурной поправки k_t получит вид :

$$W_{\delta}^n = \frac{a \cdot \varepsilon \cdot L}{k_t} \cdot \frac{k_p \cdot \Delta L}{L} = 0,019 \cdot a \cdot \varepsilon \cdot \Delta L \cdot e^{-0,02t}. \quad (3.21)$$

Тогда, исходя из уравнения (3.17), полная работа разрушения адгезионного слоя при условии удлинения полосы составит:

$$W_a = W_{omp}^n - W_{\delta}^n = F_{omp} [\Delta L + L(1 - \cos \alpha)] - 0,019 \cdot a \cdot \varepsilon \cdot \Delta L \cdot e^{-0,02t}. \quad (3.22)$$

В том случае, когда деформации не происходит ($\Delta L = 0$) полная работа отрыва полосы в соответствии с уравнением (3.16) получит вид:

$$W_{omp}^{n*} = F_{omp}^* \cdot L(1 - \cos \alpha), \quad (3.23)$$

где F_{omp}^* – истинное усилие отрыва полосы (без учета удлинения).

Предполагаем, что полная работа отрыва полосы (3.23) должна соответствовать значению работы разрушения адгезионного слоя (3.22):

$$F_{omp}^* \cdot L(1 - \cos \alpha) = F_{omp} [\Delta L + L(1 - \cos \alpha)] - 0,019 \cdot a \cdot \varepsilon \cdot \Delta L \cdot e^{-0,02t} \quad (3.24)$$

Отсюда истинное усилие отрыва полосы от металлической поверхности трубы с учетом температурной поправки определится из уравнения:

$$F_{omp}^* = \frac{F_{omp} [\Delta L + L(1 - \cos \alpha)] - 0,019 \cdot a \cdot \varepsilon \cdot \Delta L \cdot e^{-0,02t}}{L \cdot (1 - \cos \alpha)} \quad (3.25)$$

Практическая ценность этого выражения подтверждается экспериментальными исследованиями. В частности, результаты измерения адгезионной прочности защитного покрытия труб аварийного запаса из климатической зоны П4 (умеренно холодная) представлены на рисунке 3.15 (а). Установлено, что усилие отрыва контрольных полос покрытия варьирует в достаточно широких пределах (от 250 до 550 Н/см для труб в диапазоне хранения до 21 года), при этом зависимость изменения прочности адгезии от продолжительности хранения труб практически не прослеживается.

Уточненное значение адгезионной прочности представлено на рисунке 3.15 (б). В данном случае изменение адгезионной прочности с увеличением срока хранения происходит в соответствии с понижающимся линейным трендом А в гра-

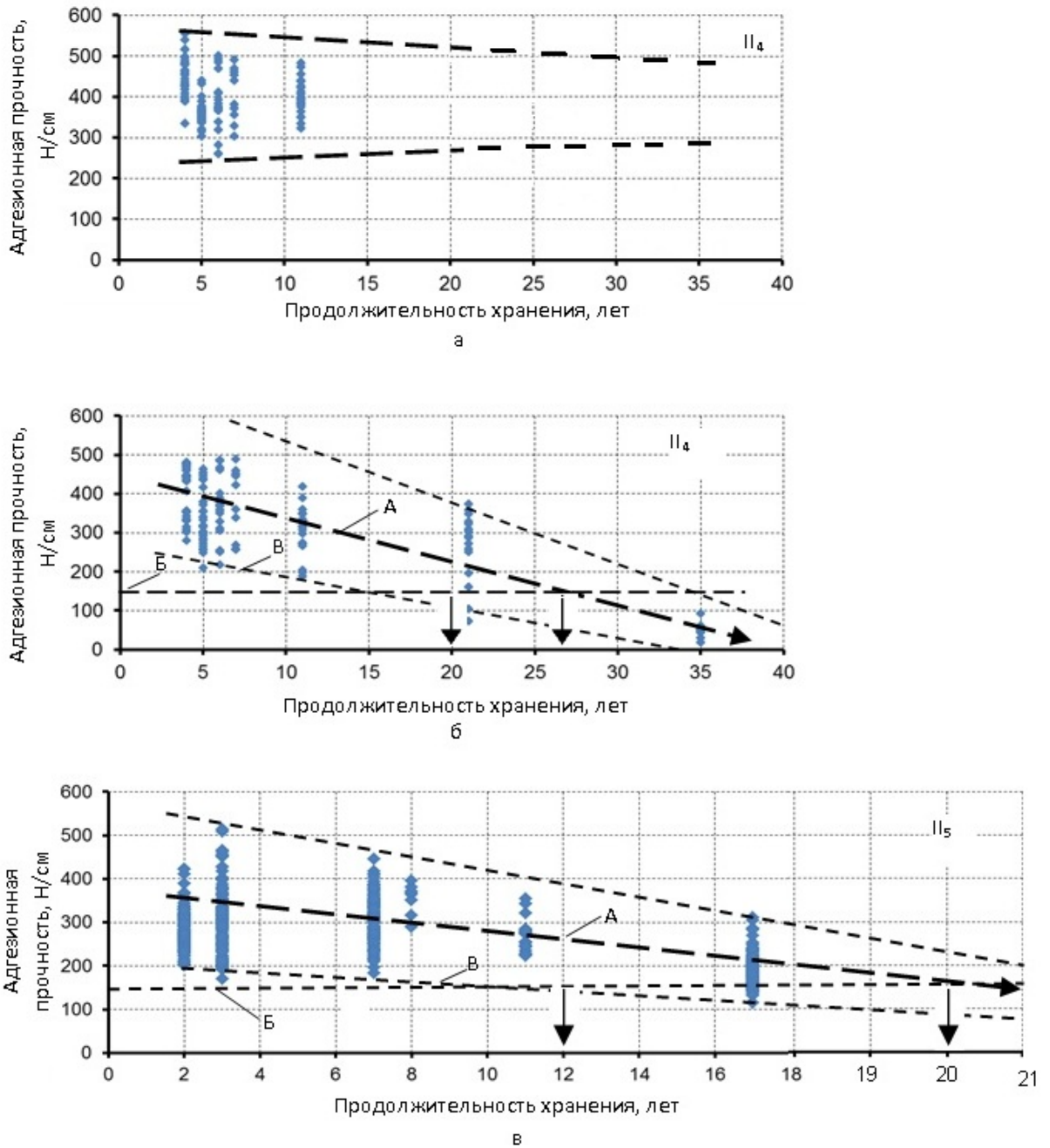


Рисунок 3.15 – Результаты испытания адгезионной прочности защитных покрытий труб аварийного запаса: а, б – климатическая зона II₄; в – климатическая зона II₅; А – среднестатистический тренд снижения адгезионной прочности во времени; Б – допустимое значение адгезионной прочности измеренных значений

нищах сужающегося коридора разброса измеренных значений. Результаты измерения адгезионной прочности покрытия труб аварийного запаса климатической зоны II₅ показаны на рисунке 3.12, в. Здесь также наблюдается значительный раз-

брос измеренных значений (от 200 до 520 Н/см) с постепенным сужением этого диапазона во времени и с падающим трендом среднестатистических измерений.

Сужение границ коридоров разброса является признаком снижения эластичности (податливости) материала адгезионного слоя с постепенным твердением во времени и приближением к предельно-хрупкому состоянию с отслаиванием от металла трубы.

Значительный разброс измеренных значений не позволяет достоверно оценить вероятные сроки сохраняемости физико-механических свойств защитных полимерных покрытий в процессе их длительного хранения в атмосферных условиях.

Так, по точке пересечения прямой Б (минимально допустимое значение прочности адгезионного слоя, составляет 150 Н/см по ГОСТ Р 52568-2006) с трендовой линией А (см. рисунок 3.15, б) среднестатистический срок сохраняемости клеевого материала в климатической зоне П₄ можно оценить ориентировочно в 26 лет, но по нижней границе В коридора разброса этот срок не превышает 20 лет.

Аналогичная картина наблюдается на рисунке 3.15, в для образцов из климатической зоны П₅. Здесь срок сохраняемости по нижней границе В коридора разброса составляет 10-12 лет, а по среднестатистическому тренду А интерполируется в интервале 20-21 года.

Такая неопределенность свидетельствует о том, что проблема прогнозирования сроков сохраняемости физико-механических свойств адгезионного слоя должна решаться с использованием других методических и диагностических подходов.

Таким образом:

- сохраняемость адгезионной прочности защитных покрытий в процессе длительного хранения на открытом воздухе исследовалась с помощью предложенной расчетной модели с определением истинной работы разрушения адгези-

онного слоя и с учетом поправки на различие температур при отборе и лабораторном испытании образцов;

- адгезионный слой защитных покрытий подвержен поступательному ухудшению физико-механических свойств клеевого состава, темп которого различен в исследованных климатических зонах умеренно-холодного (II₄) и умеренного (II₅) климатов, что связано, видимо, не только с разными сроками хранения анализируемых образцов, но и с различными уровнями инсоляции, воздействовавшими на эти образцы;

- оценка сроков сохраняемости физико-механических свойств адгезионного слоя по результатам измерения прочности сцепления с металлом трубы оказывается достаточно неопределенной из-за значительного разброса измерений, но по общетрендовым минимальным и средним значениям время сохраняемости адгезионной прочности в умеренно-холодной II₄ зоне ориентировочно составляет 20-26 лет, а в климатической зоне умеренного II₅ климата этот срок сокращается по тем же оценкам до 12-20 лет.

3.3. Распределение температурных напряжений в полимерных покрытиях при низких температурах

3.3.1. Характер распределения напряжений в покрытии при хранении в условиях низких температур

На настоящее время трехслойное полиэтиленовое покрытие является наиболее эффективным наружным антикоррозионным покрытием труб заводского нанесения. Трехслойное покрытие состоит из слоя эпоксидного праймера толщиной от 100 до 600 мкм, адгезионного подклеивающего слоя толщиной от 0,3 мм и наружного полиэтиленового слоя толщиной от 2,2 до 2,7 мм. В зависимости от диаметров труб и их назначения общая толщина трехслойного покрытия может варьировать от 2,5 до 6 мм.

В силу малой толщины и хорошей адгезии к металлу наличие слоя эпоксидного праймера может не учитываться, поэтому при расчетах трехслойное покрытие труб рассматривают как двухслойное, состоящее из адгезионного подклеива-

ющего слоя и наружного полиэтиленового.

Под воздействием температурных нагрузок защитное покрытие находится в сложном напряженном состоянии, которое в общем случае предполагает наличие как нормальных, так и касательных напряжений (рисунок 3.16). За счет существенной разности величин коэффициентов температурного расширения трубной стали $(0,135 \div 0,43)10^{-4} \text{ 1/K}$ и полимерного материала $(2,2 \div 5,5)10^{-4} \text{ 1/K}$ покрытие при низких температурах натягивается на поверхности трубы, испытывая двухосное растяжение в плоскости поверхности и сжатие в поперечном сечении. В соответствии с этими рассуждениями определяются значения кольцевых (σ_ϕ) и продольных (σ_z) напряжений. В общем случае в покрытии возникают также и радиальные напряжения (σ_r), в результате которых будут возникать напряжения сжатия (рисунок 3.16, а).

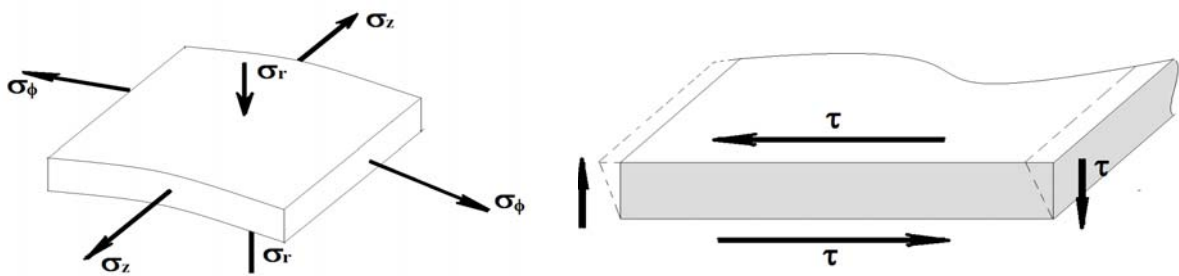


Рисунок 3.16. – нормальные (а) и касательные (б) напряжения, действующие на элемент и в сечении покрытия при понижении температуры

Помимо нормальных напряжений, покрытие испытывает дополнительно напряжение сдвига (рисунок 3.16, б), которое также обеспечивается разностью коэффициентов температурного расширения стали и полимера. Эти напряжения являются касательными. Особенно сильно такие напряжения проявляются в адгезионном подклеивающем слое, который находится на границе двух материалов с разными свойствами.

Таким образом, прочность покрытия определяется рядом условий:

- нормальные кольцевые (σ_ϕ) и продольные (σ_z) напряжения не должны превышать допустимого предела прочности $[\sigma_n]$ полимерного слоя:

$$\sigma_\phi \leq [\sigma_n]; \quad \sigma_z \leq [\sigma_n] \quad (3.26)$$

- радиальные напряжения (σ_r) не должны превышать допустимой величины прочности адгезии $[\sigma_a^n]$, определённой методом отрыва:

$$\sigma_r \leq [\sigma_a^n]; \quad (3.27)$$

- касательные напряжения (τ) не должны превышать величины допустимой прочности адгезии $[\sigma_a^\tau]$, определённой методом сдвига:

$$\tau \leq [\sigma_a^\tau]. \quad (3.28)$$

Для определения прочности полимерного покрытия необходимо определить все компоненты тензора напряжений, которые в общем случае состоят из трех нормальных напряжений и шести касательных.

3.3.2 Разработка расчетной деформационной модели трехслойного полиэтиленового покрытия труб

Как отмечалось ранее, трехслойное полиэтиленовое покрытие в первом приближении может быть рассмотрено как покрытие, состоящее из внешнего полиэтиленового слоя, подстилаемого клеевым слоем сополимера этилена. Поскольку второй подслои из полиолефиновых композиций и наружный полиэтиленовый слой имеют схожие значения коэффициентов температурного расширения, то в рамках заданной модели можно предположить, что имеет место один слой суммарной толщиной 3 мм.

Разработка расчетной деформационной модели выполняется с учетом следующих соображений.

Рассматривается труба наружным диаметром 1420 мм с нанесенным на нее полимерным покрытием. Труба находится на хранении и никаким внешним силовым факторам не подвергается. В рамках рассматриваемой задачи определяются величины напряжений, возникающие в покрытии при понижении температуры окружающей среды до заданного значения T_2 . При этом начальной температурой принимается значение, равное $T_0 = 20$ °С. Величина значения начальной температуры выбрана исходя из условий нанесения покрытия на трубу. Как уже отмечалось, при полном остывании покрытия при температуре 20 °С в нем формируются остаточные напряжения, максимальные значения которых наблюдаются в кольце-

вом направлении на границе контакта металла и полиэтилена. Таким образом при расчете общей прочности необходимо учитывать наличие остаточных напряжений.

При хранении трубы в течение некоторого периода времени меняется температура окружающей среды, и, как показывает практика, именно температурное воздействие оказывает существенно влияние на напряженное состояние покрытия.

За счет большего значения коэффициента линейного расширения при нагревании полиэтиленовое покрытие получает положительные деформации по величине большие, чем основной металл трубы. Таким образом, в результате нагрева в полиэтиленовом слое будут возникать деформации сжатия, обусловленные тем, что клеевой слой и слой эпоксидной композиции будет удерживать покрытие на трубе и препятствовать естественному расширению. При понижении температуры, по причине той же разницы коэффициентов линейного расширения β , покрытие будет сжиматься гораздо сильнее металла трубы. Влияние трубы и ее препятствие к естественному сжатию полиэтиленового слоя приведет к возникновению напряжений растяжения как в кольцевом, так и в продольном направлениях. Исходя из сказанного, построение расчетной деформационной модели для определения параметров напряженного состояния защитного покрытия при некотором конечном значении температуры T_2 выполняется с учетом отмеченных деформационных особенностей.

Продольная деформация металла может быть представлена в виде:

$$\varepsilon_{z_m} = \frac{L_m^* - L}{L} = \beta_m \cdot \Delta t, \quad (3.29)$$

где L – исходная длина трубы, м; L_m^* – конечная длина трубы при заданной температуре T_2 , м; β_m – коэффициент температурного расширения металла, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; Δt – перепад температуры, определяемый как $(T_2 - T_0)$, $^{\circ}\text{C}$; T_0 – начальная температура, $^{\circ}\text{C}$.

Конечный размер трубы в продольном направлении составит:

$$L_m^* = L\beta_m\Delta t + L. \quad (3.30)$$

Аналогично определяется конечное значение длины полимерного покрытия,

при условии, что его деформациям ничего не препятствует:

$$L_n^* = L\beta_n\Delta t + L, \quad (3.31)$$

где L_n^* – конечная длина полимерного покрытия при заданной температуре T_2 и условии беспрепятственного деформирования, м; β_n – коэффициент температурного расширения материала покрытия, $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Если покрытие нанесено на трубу, то его свободному сжатию в продольном направлении будет препятствовать металл трубы и в покрытии возникнут растягивающие деформации, которые численно будут равны разности свободных деформаций материала трубы и покрытия:

$$\varepsilon_{z_пр} = \frac{L_m^* - L}{L} - \frac{L_n^* - L}{L} = (\beta_m - \beta_n)\Delta t. \quad (3.32)$$

Таким образом, в продольном направлении выражение для определения величины относительной деформации полимерного покрытия трубы совпадает с выражением, предложенным в качестве упрощенной расчетной модели (см. п.2.4). То есть значения продольных напряжений могут быть определены по выражению (2.19) при условии, что имеют место упругие деформации:

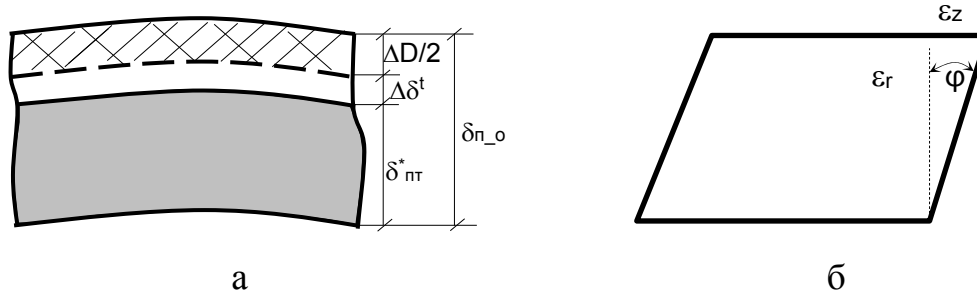
$$\sigma_{z_пр} = \frac{E_n \cdot \varepsilon_{z_пр}}{1 - \mu_n} = E_n (\beta_m - \beta_n)\Delta t, \quad (3.33)$$

где E_n – модуль упругости материала покрытия, МПа; μ_n – коэффициент Пуассона полимерного покрытия.

По толщине в радиальном направлении деформациям покрытия ничего не препятствует, соответственно относительная деформация материала покрытия при изменении температуры составит

$$\varepsilon_{r_пр} = \beta_n\Delta t. \quad (3.34)$$

При этом, вследствие того, что деформация происходит беспрепятственно, напряжения в радиальном направлении отсутствуют. Тем не менее, следует учесть тот факт, что при деформировании верхних слоев в окружном направлении нижние (внутренние) слои покрытия будут испытывать сжатие (рисунок 3.14, а), и суммарная деформация в радиальном направлении может быть представлена в виде:



$\delta_{п-0}$ - начальная толщина покрытия; $\delta_{пт}^*$ - конечная толщина покрытия; $\Delta\delta^t$ - изменение толщины стенки, обусловленное температурной деформацией материала; $\Delta D/2$ - изменение наружного диаметра, вызванное температурными деформациями материала трубы и покрытия в кольцевом направлении

Рисунок 3.17 – Суммарные деформации полимерного слоя покрытия в радиальном направлении (а) и расчетная схема для определения касательных напряжений (б)

$$\varepsilon_{r_пт} = \frac{\delta_{пт}^* - \delta_{п-0}}{\delta_{п-0}}, \quad (3.35)$$

где $\varepsilon_{r_пт}$ – суммарная относительная деформация материала покрытия в радиальном направлении; $\delta_{пт}^*$ – конечное значение толщины покрытия в результате температурных деформаций, мм; $\delta_{п-0}$ – начальное значение толщины покрытия, мм.

Конечное значение толщины покрытия может быть определено из выражения

$$\delta_{пт}^* = \delta_{п-0} (\beta_{п} \times \Delta t + 1) - \frac{\Delta D}{2}, \quad (3.36)$$

где $\delta_{п-0}$ – толщина покрытия; мм; ΔD – изменение диаметра трубы, вызванное температурными деформациями в кольцевом направлении, мм.

Изменение диаметра трубы вследствие температурных деформаций может быть рассчитано по формуле:

$$\Delta D = (D_n + \delta_{п-0}) - D_n \cdot \sqrt{(\beta_m \Delta t + 1)} - \delta_{п-0} (\beta_{п} \Delta t + 1), \quad (3.37)$$

где D_n – наружный диаметр трубопровода, мм.

Предполагая, что материал покрытия работает в упругой стадии, напряжения, возникающие в радиальном направлении, могут быть определены по формуле:

$$\sigma_{r_пт} = E_n \cdot \varepsilon_{r_пт}. \quad (3.38)$$

Относительную деформацию в кольцевом направлении можно представить как отношение изменения длины окружности, вызванного температурным перепадом, к первоначальному значению длины окружности:

$$\varepsilon_{\varphi_nm} = \frac{(D_n + \delta_n)^2 ((\beta_m - \beta_n) \Delta t)}{(D_n + \delta_{n_0})^2}, \quad (3.39)$$

где $\varepsilon_{\varphi_пт}$ – суммарная относительная деформация материала покрытия в кольцевом направлении.

Величины кольцевых напряжений могут быть найдены из закона Гука:

$$\sigma_{\varphi_пт} = E_n \cdot \varepsilon_{\varphi_пт}, \quad (3.40)$$

Величины касательные напряжений определяются по выражению:

$$\tau = G \cdot \varphi = \frac{E_n}{1 + \mu_n} \varphi, \quad (3.41)$$

где φ – угловая деформация, G – модуль сдвига.

Возникновение касательных напряжений по толщине τ_{zr} и $\tau_{\varphi r}$ можно условно представить в виде расчетной схемы, представленной на рисунке 3.17, б. Их значения могут быть определены из выражений:

$$\tau_{zr} = \frac{E_n}{1 + \mu_n} \operatorname{arctg} \left(\frac{\varepsilon_{z_пт}}{\varepsilon_{r_пт}} \right), \quad (3.42)$$

$$\tau_{\varphi} = \frac{E_n}{1 + \mu_n} \operatorname{arctg} \left(\frac{\varepsilon_{\varphi_nm}}{\varepsilon_{r_nm}} \right). \quad (3.43)$$

где $\varepsilon_{z_пт}$, $\varepsilon_{\varphi_пт}$, $\varepsilon_{r_пт}$ относительная деформация в осевом, продольном и радиальном направлениях соответственно.

Методика расчета деформационного поведения модели трехслойного покрытия при низких температурах с учетом внесенных допущений изложена в работе [15] и реализована в программном комплексе MathCad. Анализ выполнен для

случая охлаждения полимерного покрытия на поверхности стальной трубы, исходные данные для расчета приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Исходные данные

Параметр	Значение
диаметр труб (Dп)	1420 мм
коэффициент Пуассона	0,42
толщина защитного покрытия	3,5 мм
коэффициент температурного расширения металла стенки трубы (β_t)	$13 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$
температурного расширения материала покрытия (β_p)	$200 \cdot 10^{-6} \text{ C}^{-1}$
разность минимальной температуры воздуха на площадке хранения и начальным значением температуры T_0 (Δt)	67 C°;
разрушающее напряжение при растяжении (определенное при начальной температуре $t_0 = 20 \text{ C}^\circ$) σ_T^0	22..32 МПа
модуль упругости материала покрытия (E_p) с учетом изменения его при понижении температуры (для минус 47 C°)	2250 МПа

3.3.3 Результаты расчета температурных напряжений в покрытии трубы при низких температурах

При расчете параметров напряженного состояния защитного покрытия труб предполагается, что минимальная температура T_2 равна минус 47° C. Соответственно, все значения параметров напряженно-деформированного состояния рассчитываются из условия, что температурный перепад Δt составляет минус 67° C.

Продольные и радиальные напряжения, в соответствии с выражениями (3.25) и (3.30), для рассматриваемой трубы, при температуре окружающей среды равной минус 47° C, распределены по толщине покрытия в соответствии с функциями, представленными на рисунке 3.18.

При этом, в случае построения представленных функций величины модуля упругости принималась с учетом особенностей ее изменения при низких темпера-

турах. Для температуры минус 47°C значение модуля упругости составляет 2250 МПа.

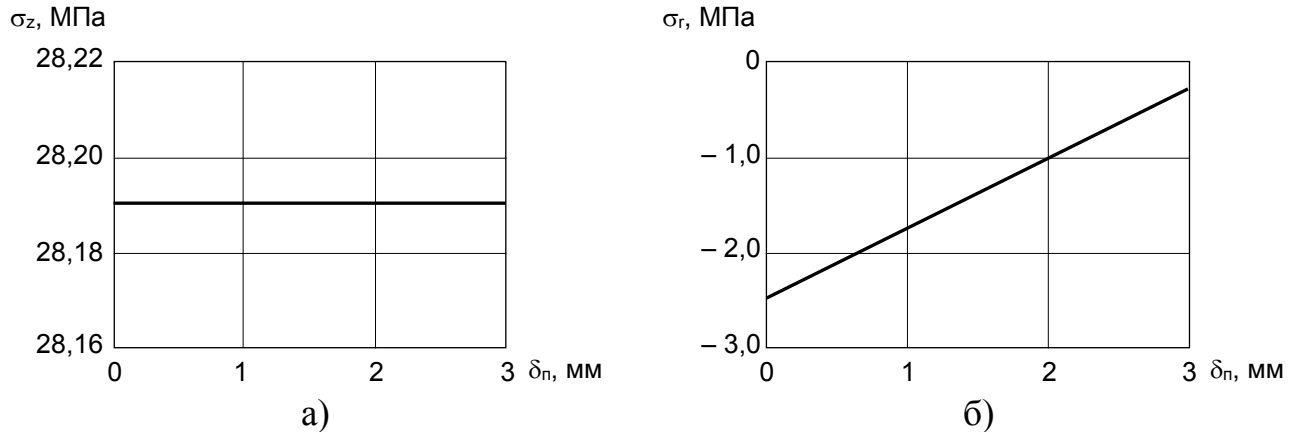


Рисунок 3.18 – Распределение продольных (а) и радиальных (б) напряжений по толщине покрытия при температуре минус 47°C

В продольном направлении напряжения являются растягивающими постоянными по толщине покрытия и при минус 47°C составляют 28.2 МПа. Радиальные напряжения по толщине покрытия отрицательные (сжимающие). Максимальное по модулю значение ($-2,5$ МПа) наблюдается у внутреннего слоя, контактирующего с металлом трубы. На поверхности покрытия радиальные напряжения отсутствуют.

Кольцевые и касательные напряжения для рассматриваемой трубы при температуре минус 47°C распределены по толщине покрытия в соответствии с функциями, представленными на рисунке 3.19.

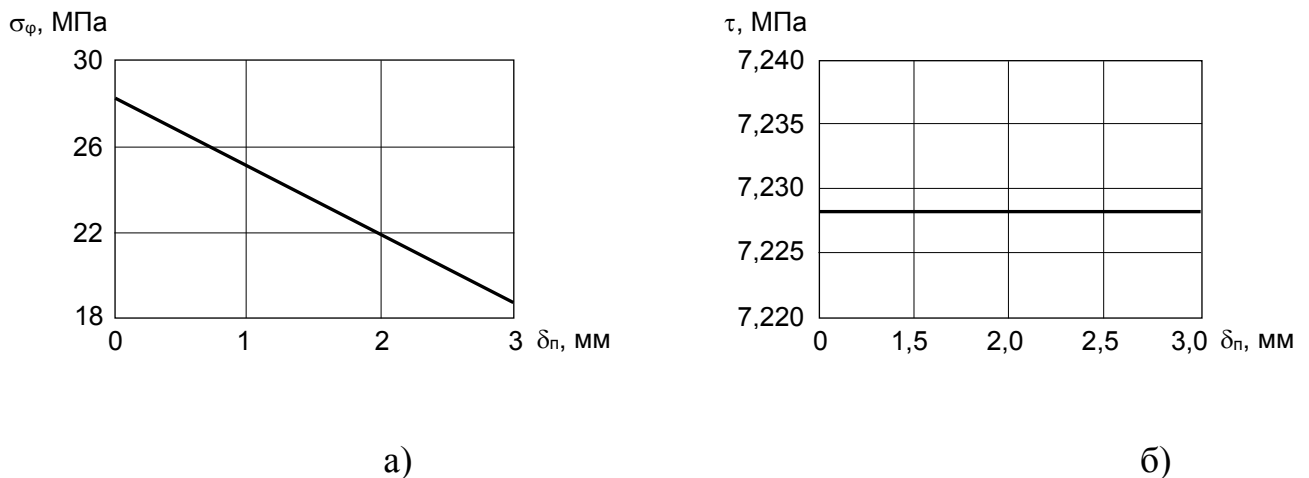


Рисунок 3.19 – Распределение кольцевых (а) и касательных (б) напряжений по толщине покрытия при температуре минус 47°C

Кольцевые напряжения – растягивающие (положительные). По толщине покрытия изменяются линейно. Максимальное значение (28,2 МПа) наблюдается у внутреннего слоя, контактирующего с металлом трубы. Приближаясь к поверхности, значения этих напряжений снижаются и на поверхности принимают значение равное 18,7 МПа. Касательные напряжения – растягивающие (положительные) По толщине покрытия постоянны. Приблизительно величина касательных напряжений при температуре минус 47° С составляет 7,2 МПа.

3.4 Прочностные свойства трехслойных полимерных покрытий при низкой температуре

3.4.1. Влияние температурного фактора на изменение прочности полимерных покрытий

Прочностные свойства полимерных покрытий, как уже упоминалось, определяются прочностью материала покрытия и прочностью адгезионного слоя.

В качестве материала покрытий труб используют полиэтилен.

В зависимости от технологии полимеризации полиэтилен подразделяют на:

- полиэтилен высокого давления или низкой плотности (ПЭВД или ПЭНП);
- полиэтилен низкого давления или высокой плотности (ПЭНД или ПЭВП).

Сравнительные характеристики полиэтиленов высокого и низкого давлений приведены в таблице 3.4.

Наименование полиэтилена	Предел прочности, МПа			Относительное удлинение, %	Модуль упругости при изгибе, МПа	Твердость, МПа	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, °С
	σ_T	σ_p	$\sigma_{и}$					
Полиэтилен высокого давления (ПЭВД / ПЭНП)	10-17	12	12-17	50-600	80-260	14-25	918-935	108-115
Полиэтилен низкого давления (ПЭНД / ПЭВП)	18-35	22-32	20-38	250-1000	400-1200	44-52	945-965	130-135

С точки зрения сохранения целостности покрытия наиболее важными являются прочностные характеристики материала покрытия. С понижением температуры, как показано в п.п. 3.2, эластичность (податливость) структуры полимерного материала снижается, что объективно подтверждается повышением его твердости. При этом с повышением твердости возрастает также показатель прочности материала – предел текучести σ_T . Однако прямых зависимостей по пересчету прочностных параметров полимерного материала в функции изменения температуры не существует. Полимеры различной структуры характеризуются значительным разбросом показателей упругого деформирования. В связи с этим, для определения основных прочностных параметров материала покрытия необходимо использовать зависимости, установленные и подтвержденные экспериментально.

Прочность покрытия труб определяется главным образом прочностью адгезии полимера к поверхности металла, т.е. прочность адгезии должна быть значительно выше всех возможных внутренних напряжений, возникающих в полимерном покрытии:

$$\sigma_a \gg \sum \sigma_\sigma, \quad (3.44)$$

где σ_a – адгезионная прочность, МПа; $\sum \sigma_\sigma$ – суммарные напряжения в слое полимерного покрытия, МПа.

Суммарные напряжения, возникающие в слое полимерного покрытия, определяются в соответствии с выражением

$$\sum \sigma_\sigma = \sigma_o + \sigma_{\Delta\varepsilon} + \sigma_p \quad (3.45)$$

где σ_o – остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления труб, МПа; $\sigma_{\Delta\varepsilon}$ – термические напряжения, возникающие вследствие разности коэффициентов линейного расширения металла и полимера при температурных перепадах, МПа; σ_p – рабочие напряжения, возникающие от давления рабочей среды, МПа

В рамках рассматриваемой задачи σ_p принимаются равными нулю, поскольку полагается, что трубы находятся на хранении и внутренних воздействий, за исключением температурных изменений окружающего воздуха, не испытывают.

Таким образом, предполагается, что суммарные напряжения в слое полимерного покрытия трубы складываются из остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления труб, и термических напряжений, вызванных перепадами температуры окружающей среды.

В работе предлагается использовать в качестве аппроксимирующего уравнения для описания температурных зависимостей пределов текучести полиэтилена низкого давления следующее уравнение [89]:

$$\sigma_T^t = \sigma_T^0 \left(\frac{T_{пл} - t}{T_{пл} - T_0} \right)^n \quad (3.46)$$

где σ_T^t – предел текучести материала при исследуемой температуре, Па; σ_T^0 – известное значение предела текучести, определенное экспериментально при некоторой начальной температуре (20°C), МПа; t – температура, для которой ведется расчет, °C; T_0 – начальное значение температуры ($T_0 = 20^\circ\text{C}$); n – параметр, определяемый экспериментально (для диапазона температур $-60 \div 0^\circ\text{C}$, этот параметр по данным [89] можно принимать равным 1,2); $T_{пл}$ – температура плавления.

Поскольку установлено, что при низких температурах (-40°C и ниже) у полимерных материалов предел текучести совпадает с пределом прочности, то найденное значение может быть использовано в качестве предельно допустимого для рассматриваемой температуры.

Приняв в качестве предела прочности разрушающие напряжения при растяжении (в соответствии с таблицей 3.4 они меняются в пределах от 22 до 32 МПа) по выражению (3.46) можно определить пределы прочности материала для рассматриваемого температурного режима (минус 47 °C):

$$\sigma_p^{-47} = \sigma_p^{20} \left(\frac{T_{пл} - t}{T_{пл} - T_0} \right)^n = 22 \cdot \left(\frac{130 - (-47)}{130 - 20} \right)^{1,2} = 38,9 \text{ МПа}$$

$$\sigma_p^{-47} = \sigma_p^{20} \left(\frac{T_{пл} - t}{T_{пл} - T_0} \right)^n = 32 \cdot \left(\frac{130 - (-47)}{130 - 20} \right)^{1,2} = 56,6 \text{ МПа}$$

Результаты расчета приведены в виде графика (рисунок 3.20), определяющего зависимость предела прочности полиэтилена низкого давления при темпера-

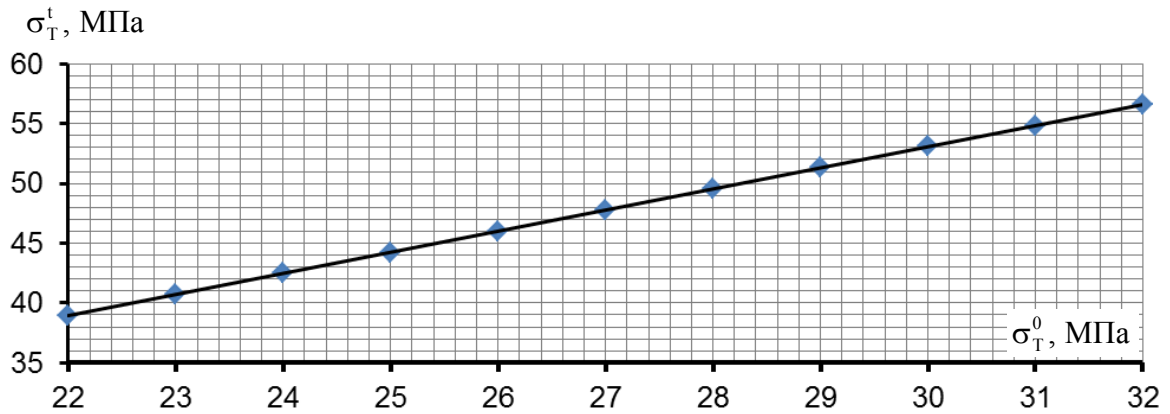


Рисунок 3.20 – Зависимость предела прочности полиэтилена высокой плотности при температуре минус 47° С от величины разрушающего напряжения при растяжении при нормальных условиях

туре минус 47° С от величины разрушающего напряжения при растяжении при нормальных условиях (температура 20° С).

По результатам проведенного расчета установлено, что для заданного диапазона изменения величины разрушающего напряжения при нормальных условиях, граничные значения напряжений в материале при температуре минус 47°С составляют от 38,9 до 56,6 МПа. В том случае, если механические характеристики материала покрытия неизвестны, в качестве граничного значения для растягивающих напряжений в продольном и кольцевом направлениях принимается минимальное значение диапазона изменения предела прочности для заданной температуры (38,9 МПа). При известных механических характеристиках, предельное значение для растягивающих напряжений может быть уточнено в соответствии с выражением (3.46).

3.4.2 Сопоставление результатов расчета механических напряжений с допустимыми значениями

Для оценки влияния низких температур на целостность защитного покрытия труб при хранении необходимо сопоставить полученные ранее значения механических напряжений в покрытии при температуре минус 47° С с предельными значениями напряжений для данного материала. В качестве предельных значений принимаются пределы разрушающих напряжений при растяжении, регламентиру-

емые нормативными документами и пересчитанные с учетом температурного режима хранения.

Для визуальной оценки предельные значения напряжений наносятся на ранее построенные графики изменения параметров напряженного состояния по толщине покрытия при заданной температуре (рисунок 3.21).

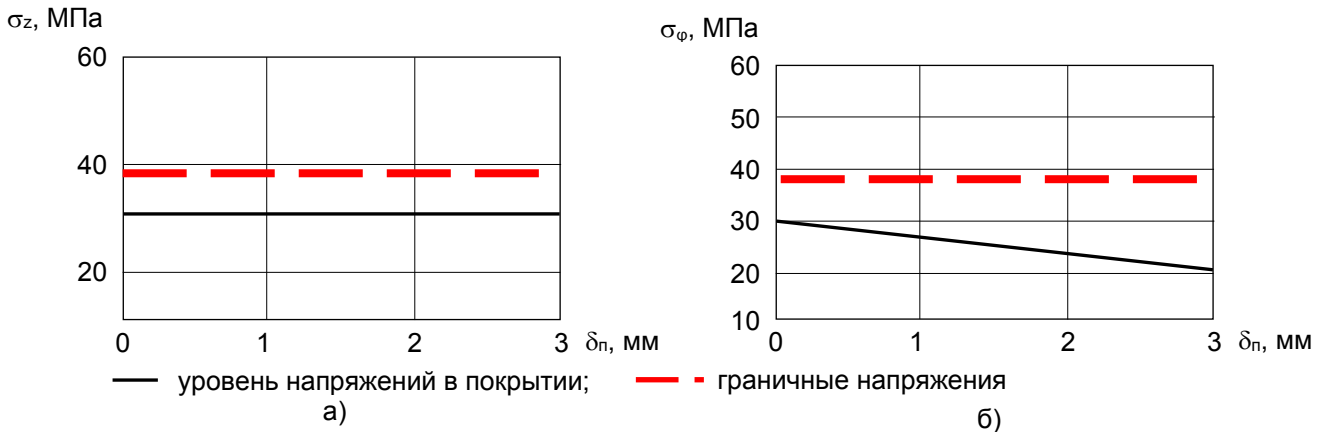


Рисунок 3.21. – Параметры напряженного состояния защитного покрытия труб при температуре минус $50\text{ }^\circ\text{C}$: а – продольные напряжения; б – кольцевые напряжения

Из представленных на рисунке 3.21 графиков видно, что при температуре минус $47\text{ }^\circ\text{C}$ максимальные значения продольных и кольцевых напряжений примерно на 25% ниже граничных значений. Продольные напряжения постоянны по толщине слоя покрытия, соответственно, достижение граничного значения маловероятно. Кольцевые напряжения максимальны на внутренней стороне слоя покрытия, соответственно, в том случае, если имеет место неоднородность механических характеристик материала и существуют локальные области, в которых разрушающие напряжения будут ниже граничных значений более чем на 25%, становится возможным разрушение покрытия. Сопоставления кольцевых и касательных напряжений с граничными значениями не приводится, так как величины указанных параметров значительно ниже разрушающих напряжений при заданной температуре.

Необходимо отметить, что зарождение трещин (микроразрывов) на покрытии в большей степени вероятно на внутренней его поверхности, а значит, спро-

гнозировать возникновение разрыва можно путем определения мест отслаивания.

3.4.3 Характер изменения напряжений полимерных покрытий труб при вероятной температуре их хранения (+20÷-60°C)

Предложенная методика по определению параметров напряженного состояния путем усовершенствования за счет введения дополнительного параметра в виде температуры позволила охарактеризовать в графическом виде особенности изменения максимального значения напряжения (по толщине) в зависимости от текущей температуры. Пределы изменения температуры были приняты в диапазоне от 20 до минус 60° С. За предельное значение напряжений принимается минимальное значение прочности полиэтилена при растяжении, составляющее 22 МПа (см. таблицу 3.3).

На рисунке 3.22 (а) представлен график изменения величины продольных напряжений в покрытии в зависимости от температуры.

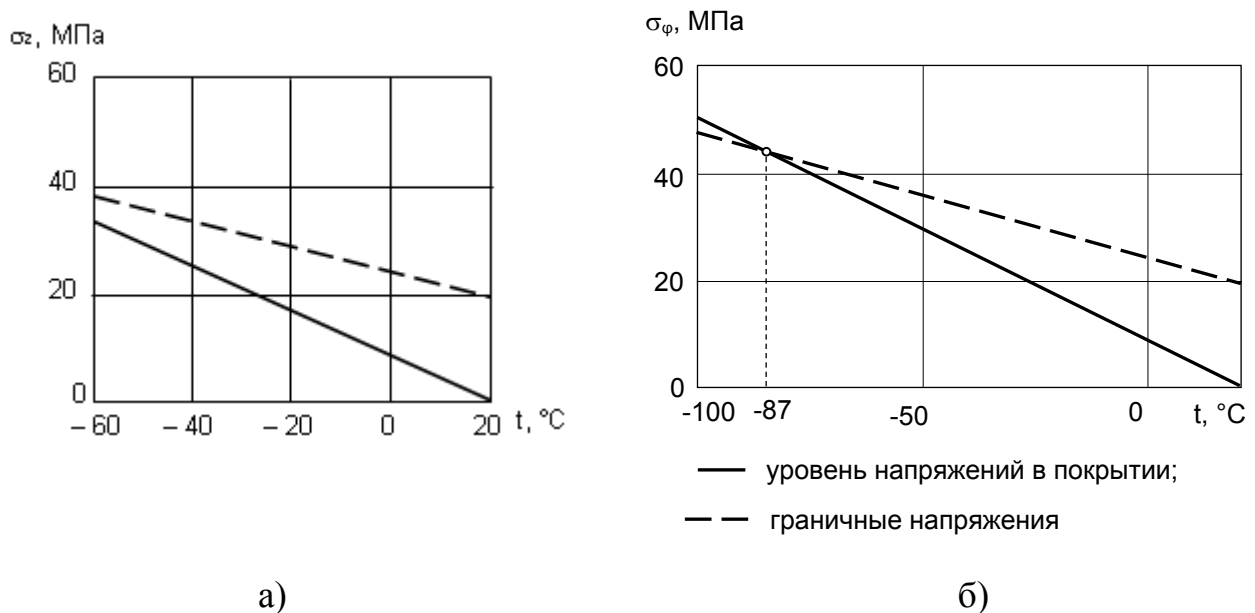


Рисунок 3.22 – Характер изменения продольных(а) и радиальных (б) напряжений в покрытии в зависимости от температуры а-в интервале температур +20÷-60°C; б-в интервале температур +20÷-100°C

Установлено, что в рассматриваемом диапазоне температур величина продольных напряжений не превышает граничных значений. Тем не менее, увеличив диапазон рассматриваемых температур до минус 100 °С, можно выявить критиче-

ское значение температуры для рассматриваемого покрытия (рисунок 3.22, б).

Радиальные напряжения существенно ниже других составляющих напряжений, кроме того, они отрицательны, тем ни менее, как было установлено ранее, максимальные по модулю значения будут наблюдаться на внутренней поверхности покрытия, поэтому при построении зависимости напряжений от температуры предполагалось, что $\delta_n = 0$. На рисунке 3.23 представлена зависимость величины радиальных напряжений, вызванных температурным перепадом от текущего значения температуры. Полученные значения даже при самых низких температурах не превышают граничных значений. Как видно уровень продольных напряжений в покрытии превысит граничные напряжения примерно при минус 87° .

Кольцевые напряжения принимают максимальное значение на внутренней поверхности покрытия, соответственно при построении зависимости напряжений от температуры также предполагалось, что $\delta_n = 0$. Полученный график изменения величины кольцевых напряжений на внутренней поверхности покрытия в зависимости от температуры представлен на рисунке 3.24 (а). Из представленной расчетной графической зависимости следует, что кольцевые напряжения также не превышают граничных значений даже при экстремально низких температурах.

Поскольку касательные напряжения также являются постоянными по толщине покрытия, то глубина слоя при построении зависимости величины напряжений от температуры хранения не имела значения. На рисунке 3.24 (б) представлена зависимость величины касательных напряжений, вызванных температурным перепадом от текущего значения температуры. Как видно, касательные напряжения существенно ниже граничных значений и не являются опасными.

Таким образом, расчетом установлено, что до температуры, соответствующей минус 87°C , ни одна из компонент тензора напряжений в покрытии не превысит граничных значений. Из этого следует, что на малых сроках хранения, развитие дефектов в покрытии труб под воздействием внутренних напряжений, формируемых преимущественно в периоды, характеризующиеся низкими температурами воздуха, маловероятно. При продолжительном хранении физико-механические характеристики материала покрытия изменяются, причем в некоторых случаях

значительно (см. п.1.2). При длительном воздействии солнечного излучения, как правило, покрытие становится менее эластичным, снижается величина относительного удлинения, при этом прочность на разрыв увеличивается в достаточно малых пределах. Соответственно, граничные значения напряжений, обозначенные, на рисунках 3.23 и 3.24 (пунктирная линия) для покрытия с продолжительным сроком хранения могут снижаться, вследствие чего, при низких температурах воздуха становится вероятным растрескивание и отслаивание покрытия от поверхности труб.

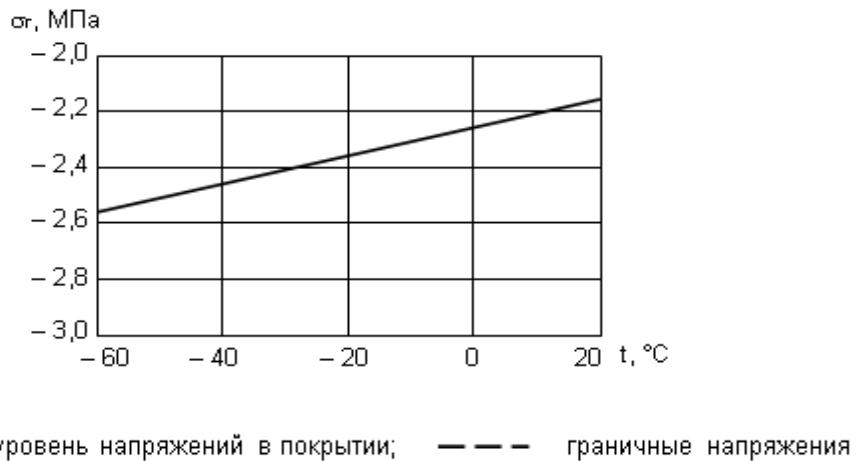


Рисунок 3.23 – Характер изменения продольных напряжений в покрытии на расширенном интервале температур

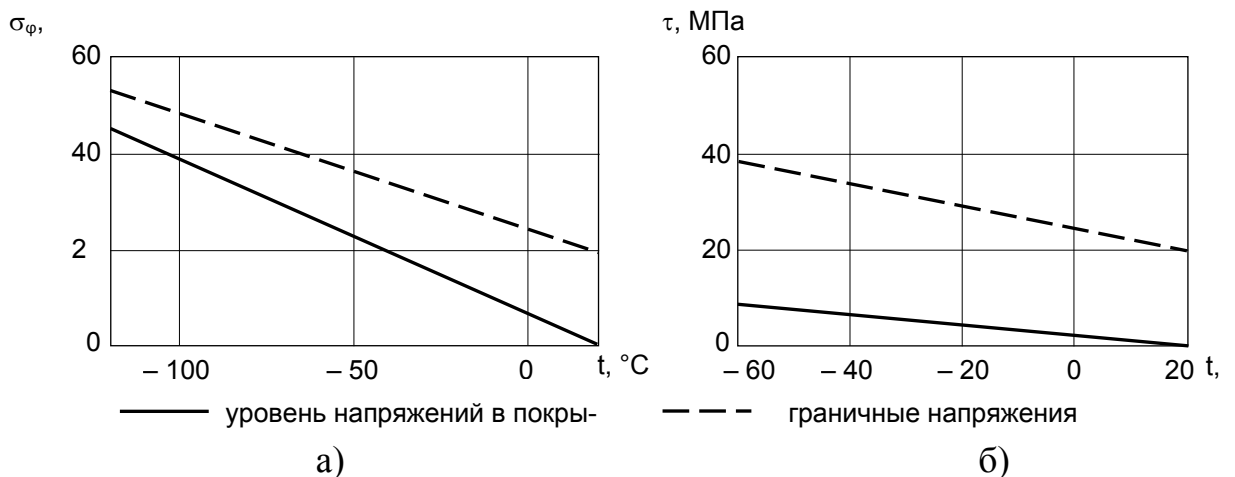


Рисунок 3.24 – Характер изменения кольцевых (а) и касательных (б) напряжений в покрытии в зависимости от температуры

Иначе говоря, предельный срок хранения труб с покрытием определяется интенсивностью снижения физико-механических характеристик покрытия, которые могут быть определены по результатам периодического контроля покрытия

труб с различными сроками хранения.

Таким образом показано, что:

- температурные напряжения полимерных покрытий в условиях отрицательных температур характеризуются постоянными по толщине растягивающими продольными и касательными напряжениями, а также распределенным по толщине растягивающими кольцевыми и сжимающими радиальными напряжениями;

- количественная оценка этих напряжений выполняется на основе расчетной деформационной модели, реализованной в Math Cade и позволяющей рассчитать значение температурных напряжений при заданных отрицательных температурах;

- при минимально вероятной для исследуемых климатических зон температуре, равной -47°C , максимальные значения продольных температурных напряжений составят 28,2 МПа по всей толщине покрытия; кольцевые напряжения изменяются от 28,2 МПа на внутренней стенке покрытия до 18,7 МПа – на наружной; касательные (7,2 МПа) и радиальные ($-2,5$ МПа) напряжения по величине незначительны;

- предельные значения прочностных показателей при отрицательных температурах определяются из адаптированного эмпирического выражения, учитывающего влияние температурного фактора, и для рассматриваемой температуры (-47°C) составляют величины $\sigma_p = \sigma_m = 38,9...56,6$ МПа;

Выводы:

1. Устойчивость механических свойств защитных полимерных покрытий с 11-летним сроком хранения труб на открытых площадках в условиях умеренного климата (II₅) оценивалась методом лабораторных испытаний контрольных образцов на растяжение и разрыв при температурах 20, -20 и - 45 °С в соответствии с ГОСТ 11262-80 и характеризуется стабильностью прочностных показателей в рассматриваемом промежутке времени, превышая предельно допустимые значения, регламентированные ГОСТ 31448-2012.

2. По результатам испытаний образцов 4-х, 7-ми и 11-летнего срока хранения можно заключить, что полимерное защитное покрытие труб остается работо-

способным в указанном промежутке времени при температуре до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ с прогнозным пределом охрупчивания при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Сохраняемость исправных полимерных покрытий из-за разброса измеряемых значений механических свойств оценивается общетрендовыми тенденциями, характеризующими зарождение деградиационных процессов во времени, но не выходящих за пределы допустимых значений, причем характер латентного ухудшения механических свойств проявляется интенсивнее в той климатической зоне, где больше показатель инсоляции.

4. Сохраняемость прочности адгезионного слоя из-за значительного разброса измерений оценивается также среднестатистическим трендом, характеризующим поступательное снижение адгезионной прочности, при этом оценка времени её сохраняемости оказывается весьма неопределенной и составляет 15-26 лет в зоне умеренно-холодного климата и 10-20 лет в условиях умеренного климата, отличающегося большим числом солнечных дней.

5. Температурные напряжения полимерных покрытий при отрицательной температуре -47°C характеризуются постоянными по толщине слоя растягивающими продольными (28,2 МПа) и касательными (7,2 МПа) напряжениями, а также распределенными по толщине растягивающими кольцевыми (от 28,2 МПа на внутренней стороне до 18,7 МПа на внешней стороне покрытия) и сжимающими радиальными ($-2,5$ МПа) напряжениями, при этом допустимые значения прочностных показателей исследуемых покрытий при температуре -47°C составляют $\sigma_p = \sigma_m = 38,9...56,6$ МПа, что превышает максимальные продольные напряжения в 1,7-2,0 раза.

6. Разработанный метод оценки деградации механических свойств защитных покрытий труб аварийных запасов, устанавливает закономерности деградиационных явлений в условиях атмосферных воздействий северного климата и обуславливает возможность увеличения срока хранения, кратно превышающего гарантийные обязательства изготовителя.

4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКОВ СОХРАНЯЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОГО КЛИМАТА

Процесс оценки сроков сохраняемости и изменения свойств защитных покрытий труб реализуют для определения расчетных предельных сроков сверхнормативного хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях.

4.1 Методика прогнозирования сроков сохраняемости полимерных покрытий труб

Предлагаемая методика основана на результатах мониторинга контролируемых параметров в процессе хранения полимерных покрытий труб.

Под контролируемым параметром понимается некоторый показатель, позволяющий оценить текущее физико-механическое состояние полимерных покрытий, находящихся под воздействием факторов атмосферного хранения.

Например, в качестве контролируемых параметров могут быть приняты:

- показатель твердости НВ, позволяющий косвенно оценить пластическое состояние материала по пределу его текучести $\sigma_{рт}$, поскольку эти параметры являются взаимосвязанными с нормативным показателем прочности при разрыве σ_{pp} ;

- показатель относительного удлинения, который является нормируемым и может быть определен косвенным методом, например, по коэффициенту затухания УЗ – волны;

- показатель адгезионной прочности А, который также является нормируемым показателем и определяется экспериментально путем отделения контрольной полосы от поверхности трубы.

Порядок реализации методики прогнозирования по контролируемым параметрам заключается в следующем:

1). Определяют исходные данные:

X_i – вид контролируемого параметра;

X_0 – начальное значение контролируемого параметра;

X_{τ_i} – значение контролируемого параметра после τ_i лет хранения защитного покрытия;

$[X]$ – допустимое значение контролируемого параметра для рассматриваемого типа защитного покрытия.

2). Рассчитывают ресурсные характеристики:

- коэффициент, характеризующий остаточный процент потенциального ресурсного запаса контролируемого параметра X_i после τ_i лет хранения:

$$\varphi_{\tau_i} = \frac{X_{\tau_i} \cdot 100}{X_0}, \% ; \quad (4.1)$$

- коэффициент, характеризующий величину предельно допустимого снижения рассматриваемого контрольного параметра:

$$\varphi_{\partial_i} = \frac{|[X] - X_0|}{[X]} \cdot 100\% , \quad (4.2)$$

если выражение $\frac{|[X] - X_0|}{[X]} < 1$, и

$$\varphi_{\partial_i} = \frac{[X]}{X_0} \cdot 100\% , \quad (4.3)$$

если выражение $\frac{|[X] - X_0|}{[X]} \geq 1$

3). Формулируют диаграммы изменения контролируемых параметров X_i в зависимости от сроков хранения τ_i (рисунок 4.1).

4). Предельный срок хранения определяется по условию пересечения контролируемого параметра $X_i(X_1, X_2 \dots)$ с прямой $\varphi_{\partial_i}(\varphi_{\partial 1}, \varphi_{\partial 2} \dots)$, ограничивающей его минимально допустимое значение, в точке $A_i(A_1, A_2 \dots)$ с последующей проекцией этой точки на временную ось $\tau_{\partial i}(\tau_{\partial 1}, \tau_{\partial 2} \dots)$. Перпендикуляр этой проекции $A_i \tau_{\partial i}(A_1 \tau_1, A_2 \tau_2 \dots)$ отсчет примерное прогнозное значение предельного времени

$\tau_{\partial i}(\tau_{\partial 1}, \tau_{\partial 2} \dots)$ хранения защитного покрытия в соответствующих климатических условиях.

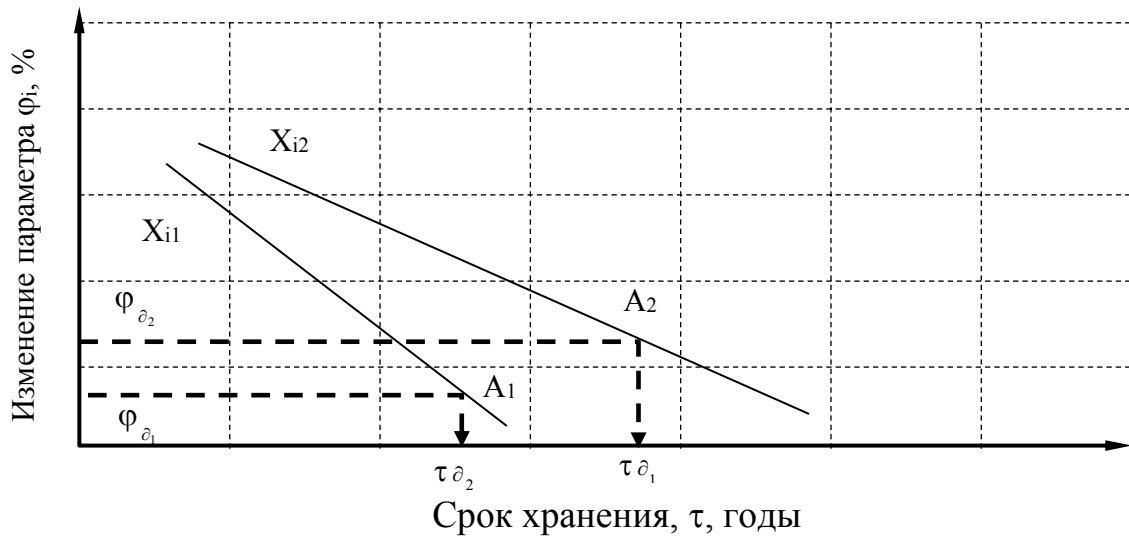


Рисунок 4.1. Диаграмма прогнозирования сроков сохраняемости $\tau_{\partial i}$ защитных покрытий по контролируемым параметром X_{i1} , $X_{i2} \dots$

Для определения точного прогнозного значения предельного времени хранения защитного покрытия необходимо выполнить несложную математическую обработку результатов прогнозирования

4.2. Определение взаимосвязи контролируемых параметров с прочностными свойствами полимерного материала

Оценку изменения свойств защитных покрытий труб выполняют с учетом процессов старения полимерного материала покрытия по ГОСТ 9.710-84 [41] в зависимости от внешних воздействующих факторов по ГОСТ 26883-86 [33].

Для получения исходных данных проводят натурные испытания по ГОСТ 16504-81 [27].

Для натурных испытаний отбирают фрагменты покрытий из труб с разными сроками хранения в атмосферных условиях. Отбор фрагментов проводят при выявлении дефектов покрытия, требующих ремонта.

На участке отбора фрагментов определяют прочность адгезии защитного покрытия.

Отобранные образцы покрытий из труб с разными сроками хранения подвергаются лабораторным и механическим испытаниям.

Лабораторные испытания образцов покрытий проводят с использованием методов:

- определения твердости по ГОСТ 4670-91 [37], ГОСТ 24621-91 [30] и ГОСТ 24622-91 [31];
- определение прочностных характеристик на растяжение по ГОСТ 11262-80 [22];
- определения скорости распространения и коэффициента затухания ультразвуковых колебаний [18].

Результатом испытаний являются зависимости изменения характеристик физико-механических свойств покрытий от времени атмосферного хранения труб с защитными покрытиями. При этом каждая физико-механическая характеристика может представлять собой контролируемый параметр, отслеживая изменение которого можно судить о скорости процессов старения защитных покрытий или, иначе говоря, прогнозировать время наступления их предельного состояния.

Одним из наиболее характерных контролируемых параметров является показатель твердости НВ полимерного покрытия, отличающийся доступностью организации мониторингового контроля как на площадке складирования, так и в лабораторных условиях.

В связи с этим рассмотрим возможности использования метода Бринелля для построения зависимостей изменения показателей твердости во времени с целью прогнозного определения сроков сохраняемости полимерного покрытия в условиях северного климата.

Твердость защитных покрытий труб нормативными документами не регламентируется, но является объективным показателем физико-механического состояния структуры полимерного материала, поскольку представляет собой производную от пластичности материала.

Для проведения исследований отбирались образцы защитных покрытий труб аварийных запасов со сверхнормативными сроками хранения, размещенных на открытых площадках в климатических зонах П₄ (умеренно-холодный климат) и П₅ (умеренный климат).

Определялась зависимость изменения твердости НВ от предела текучести σ_T исследуемых образцов, представляющие климатические зоны умеренно-холодного П₄ и умеренного П₅ климатов.

Зависимость средних значений твердости исследуемых защитных покрытий от их пластических свойств представлена на рисунке 4.1 и аналитически определяется из выражения при $R^2=0,9267$:

$$HB = 1,7381\sigma_{рт} + 10,584 \quad (4.4)$$

Тогда пластические свойства исследуемого материала могут быть оценены из выражения:

$$\sigma_{рт} = \frac{HB - 10,584}{1,7381}, \text{ МПа}, \quad (4.5)$$

где $\sigma_{рт}$ – предел текучести материала при растяжении

Как видно из рисунка 4.2 измеренные значения твердости НВ для зоны умеренно-холодного климата превышают те же значения для образцов из зоны умеренного климата, но достаточно тесно подчиняются линейной зависимости.

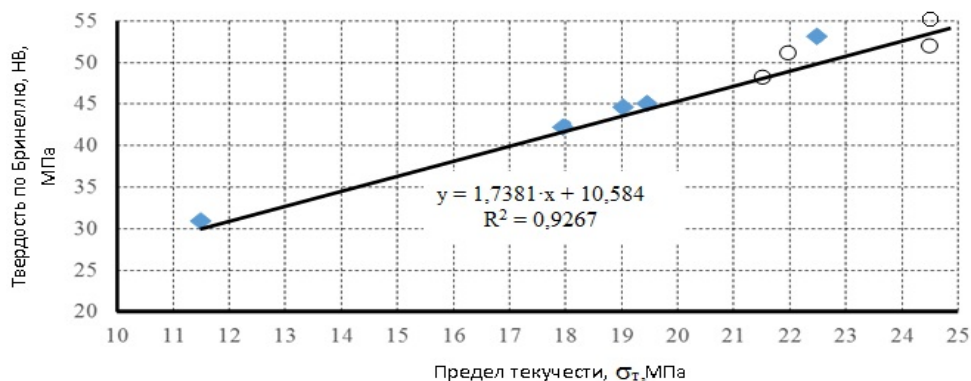
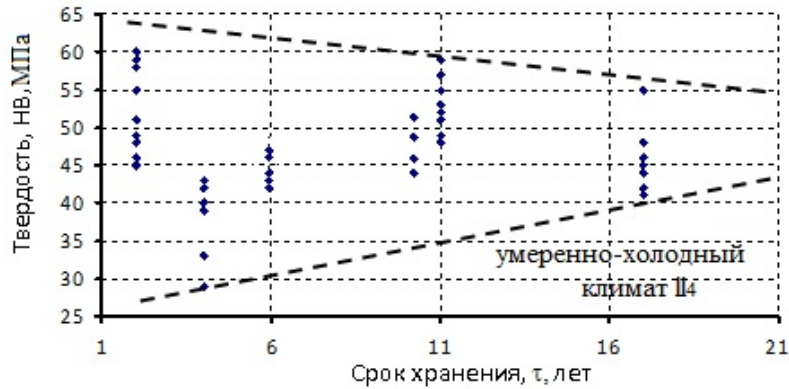
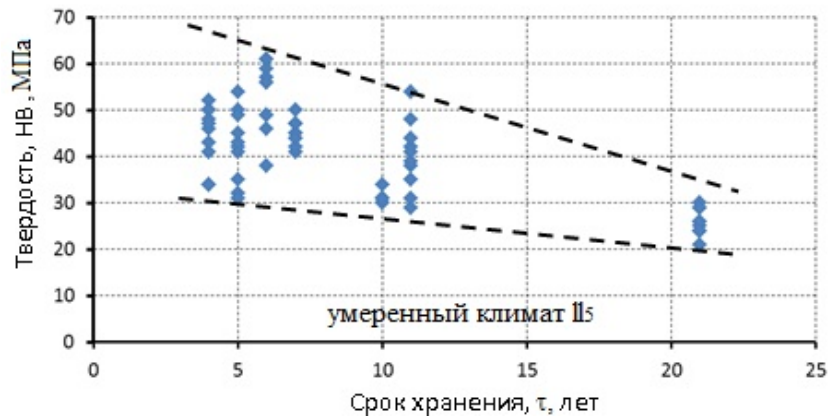


Рисунок 4.2 – Твердость по Бринеллю материала защитного покрытия в зависимости от предела текучести: ○ – образцы из зоны умеренно-холодного климата П₄; ◆ – образцы из зоны умеренного климата П₅

Для целей прогнозирования сроков сохраняемости полимерных покрытий труб при длительном хранении в условиях северного климата необходимо также иметь данные мониторинга контролируемого параметра – твердости НВ – во времени. Результаты такого мониторинга приведены на рисунке 4.3.



а



б

Рисунок 4.3 – Результаты измерения твердости по Бринеллю защитного покрытия труб аварийных запасов с различными сроками хранения: а – климатическая зона II₄ (умеренно-холодный климат); б – климатическая зона II₅ (умеренный климат)

Характер распределения измеренных значений НВ для обеих климатических зон (II₄ и II₅) аналогичен распределению прочностных показателей для этих покрытий: первые годы хранения (5-7 лет) характеризуются широкой амплитудой разброса измеренных значений, составляющих примерно ≈ 30 НВ (диапазон от 30 до 60 НВ), что свидетельствует о высокой пластичности исследуемого материала – главном показателе оценки эксплуатационных и технологических свойств. С

течением времени разброс значений НВ стабилизируется и после 17-20 лет хранения амплитуда разброса уменьшается в 3 раза до значений ≈ 10 НВ (диапазон от 20 до 30 НВ в климатической зоне П₅) и до значений ≈ 15 НВ в климатической зоне П₄ (диапазон от 40 до 55 НВ).

При этом границы коридора разброса измеренных значений приобретают сужающийся характер как признак физико-механических изменений в структуре полимерного материала. В частности, это свидетельствует о том, что эластичность (податливость) материала со временем ухудшается и его структура стремится к переходу в хрупкое состояние. Этот процесс характеризуется понижением твердости.

Таким образом, полученные зависимости $НВ=f(\sigma_{рт})$, и $НВ=f(\tau)$ являются исходными данными для последующего прогнозирования предельных сроков сохраняемости защитных покрытий труб.

4.3. Определение прогнозных сроков предельного хранения защитного покрытия

Пример определения прогнозного времени предельного хранения защитного покрытия на основе измерений прочностных показателей наружного слоя представлен ниже.

Для объективной оценки определение прогнозного времени сохраняемости защитных покрытий целесообразно провести по ряду основных контролируемых параметров, характеризующих разное состояние структуры полимерного материала во время хранения под влиянием климатических факторов, в частности, температурных и инсоляционных воздействий.

В настоящем разделе предлагается методика определения прогнозного времени сохраняемости защитных полимерных покрытий по трем объективным контролируемым параметрам: изменению твердости НВ полимерного материала во времени, относительного удлинения γ и прочности адгезии А.

4.3.1. Определение прогнозного срока сохраняемости по контролируемому параметру твердости

Исходные данные:

а). Среднегодовая температура в климатической зоне хранения принимается равной $t=0$ °С (умеренный климат II₅);

б). Вид контролируемого параметра $X_i=HB$

в). Измеренные значения контролируемого параметра при $\tau_i=5$ лет и $\tau_i=21$ год хранения принимаются из результатов натуральных испытаний (см. рисунок 4.2) как средне – статистические значения:

$$X_{\tau(5)} = HB_{(5)} = 45 \text{ МПа};$$

$$X_{\tau(21)} = HB_{(21)} = 27 \text{ МПа}.$$

Поскольку параметр $HB_{(\tau)}$ для защитных покрытий труб не нормируется, целесообразно перейти к прочностным параметрам, в частности, к пределу текучести при растяжении $\sigma_{pT(\tau)}$, определяемому из выражения (4.4):

$$\sigma_{pT(5)} = \frac{HB_{(5)} - 10,584}{1,7381} = 19,8 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{pT(21)} = \frac{HB_{(21)} - 10,584}{1,7381} = 9,4 \text{ МПа}.$$

Далее определяются начальные (при $\tau=0$) параметры $\sigma_{pT(0)}$ и $\sigma_{pp(0)}$ в зависимости от заданной ($t=0$ °С) температуры по формулам (3.2) и (3.3):

$$\sigma_{pT(0)} = 0,0011t^2 - 0,3275t + 25,728 = 25,7 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{pp(0)} = 0,0035t^2 - 0,2775t + 19,232 = 19,2 \text{ МПа}.$$

Теперь могут быть определены коэффициенты $\varphi_{(\tau)}$ из выражения (4.1) для 5-ти и 21-го года хранения:

$$\varphi_{(5)} = \frac{\sigma_{pT(5)}}{\sigma_{pT(0)}} \cdot 100 = \frac{19,8}{25,7} \cdot 100 = 77\%;$$

$$\varphi_{(21)} = \frac{\sigma_{pT(21)}}{\sigma_{pT(0)}} \cdot 100 = \frac{9,4}{25,7} \cdot 100 = 36,6\%,$$

Коэффициент допустимого снижения контролируемого параметра φ_{di} , определяемый из выражения (4.2), зависит от допустимого предела текучести $[\sigma_{pt}]_{t=0^{\circ}C}$ при растяжении и заданной температуре (в рассматриваемом случае $t=0^{\circ}C$). Этот параметр является ненормируемым, но может быть рассчитан на основе нормируемого параметра прочности при разрыве $[\sigma_{pp}]$ в соответствии с ГОСТ Р 31448-2012.

Некоторые минимально допустимые значения физико-механических характеристик в соответствии с этим нормативным документом приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Минимально допустимые значения физико-механических характеристик защитных покрытий труб (ГОСТ Р 31448-2012)

Параметр	Диаметр труб, мм	
	до 820	820 - 1420
Внешний вид	Однородная поверхность без дефектов и пропусков	
Адгезия, Н/см		
при 20° С	100	150
при 60° С	50	100
Прочность при разрыве, МПа		
при 20° С	15	15
при 60° С	10	10
Относительное удлинение		
при разрыве, %		
при 20° С	350	350
при минус 40° С	100	100
Прочность покрытия при ударе, Дж/мм		
при 20° С	6	6
при минус 30° С	5	5

Из этой таблицы видно, что допустимое значение прочности при разрыве $[\sigma_{pp}]$ для защитных покрытий при температуре 20 °С составляет $[\sigma_{pp}]_{t=20^{\circ}C} = 15 \text{ МПа}$.

Тогда значение допустимого предела текучести при заданной температуре $t=0^{\circ}C$ может быть определено из выражения:

$$[\sigma_{pt}]_{(0)} = \frac{\sigma_{pt(0)}}{\sigma_{pp(0)}} \cdot [\sigma_{pp}]_{(20)} = \frac{25,7}{19,2} \cdot 15 = 20,1 \text{ МПа}.$$

На основании полученного значения вычисляется коэффициент предельно допустимого снижения рассматриваемого параметра по формуле (4.2):

$$\varphi_{\partial i} = \left(\frac{[\sigma_{\text{пр}}] - \sigma_0}{[\sigma_{\text{пр}}]} \right) \cdot 100 = \left(\frac{[20,1] - 25,7}{[20,1]} \right) \cdot 100 = 27,9\%.$$

На основе полученных данных выстраивается диаграмма для графического прогнозирования предельного срока сохраняемости защитного покрытия труб (рисунок 4.4).

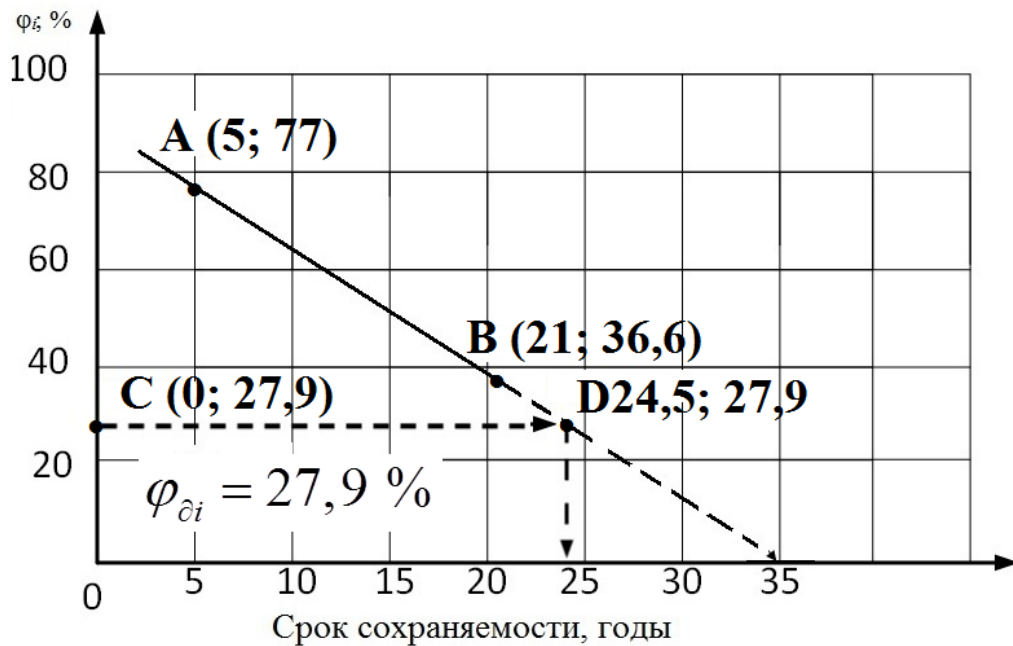


Рисунок 4.4 Графическое прогнозирование предельного срока сохраняемости защитного покрытия труб по контролируемому параметру твердости

Здесь по оси ординат откладываются расчетные значения коэффициентов $\varphi_{(5)}$ и $\varphi_{(21)}$, характеризующих остаточный процент потенциального ресурсного запаса контролируемого параметра после 5-ти ($\tau_{(5)}$) и 21-го ($\tau_{(21)}$) года хранения, значения которых фиксируются по оси абсцисс. Таким образом, возникают точки А и В с координатами соответственно (5; 77) и (21; 36,6). Параллельно оси абсцисс проводится линия коэффициента предельного снижения контролируемого параметра, равная $\varphi_{\partial i} = 27,9\%$, до пересечения с прямой АВ в точке Д. Перпендикуляр, опущенный из этой точки, отсекает ось абсцисс ориентировочно на отметке 24 года. Это и

есть прогнозный срок сохраняемости, определенный по параметру твердости для рассматриваемого покрытия в условиях открытого хранения при среднегодовой температуре $t \approx 0 \text{ } ^\circ\text{C}$. Из этого же рисунка видно, что 100%-ный износ защитного покрытия в рассматриваемых условиях по параметру твердости составит ориентировочно 35 лет.

Для более точного определения сроков сохраняемости полученные результаты графического прогноза подвергают несложной математической обработке.

Для этого:

а) составляется уравнение прямой линии А(5; 77) В(21; 36,6) по условию:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1};$$

- подставляются значения координат:

$$\frac{x - 5}{21 - 5} = \frac{y - 77}{36,6 - 77};$$

- решение дает уравнение вида:

$$40,4x + 16y - 1434 = 0;$$

- решается система для определения точки пересечения с линией $y - 27,9 = 0$

или :

$$y = 27,9.$$

Подставив это значение в последнее уравнение получим:

$$40,4x = 987,6 ;$$

$$x = 24,5 \text{ года.}$$

Таким образом по параметру средних значений твердости НВ прогнозный срок сохраняемости рассматриваемого защитного покрытия составляет 24,5 года.

4.3.2. Определение прогнозного срока сохраняемости по контролируемому параметру затуханию УЗ-волн

Отслеживать изменение контрольного параметра предлагается коэффициенту

затухания УЗ-волны δ_i в контрольных образцах защитных покрытий, имея в виду, что показатель коэффициента затухания δ_i взаимосвязан с нормируемым показателем относительного удлинения γ_i . При этом процесс изменения коэффициента затухания менее трудоемкий и более оперативный по сравнению с испытаниями на разрывной машине.

Для проведения исследований используются контрольные образцы прямоугольного сечения, имеющие длину не менее 70 мм, ширину не менее 25 мм (рисунки 4.5, а, б). Высота каждого образца определяется условиями эксперимента и составляет 3 до 6 мм. Материалом для изготовления образцов служит полиэтилен низкого давления (высокой плотности). Поверхности контрольных образцов, на которые устанавливаются преобразователи и от которых происходит отражение УЗ-колебаний, должны иметь шероховатость не выше Rz 20, быть параллельными друг другу и не иметь механических повреждений (рисок, царапин).

При проведении исследований используется следующее оборудование:

- акустический дефектоскоп УД4-76 (рисунок 4.5, а);
- набор пьезоэлектрических преобразователей (рисунок 4.5, б);
- жидкость для обеспечения акустического контакта между преобразователями и поверхностью контрольного образца.

Затухание УЗ-колебаний определяют по результатам измерения амплитуд первого и второго отраженного УЗ-сигнала. Скорость УЗ-волн в материале покрытия определяют с помощью стандартного УФ-дефектоскопа по заданному значению толщины образца.

Порядок проведения исследований следующий:

- с помощью штангенциркуля определяют толщину образца в месте установки пьезоэлектрического преобразователя;
- выполняют настройку дефектоскопа, задают параметры зондирующего УЗ-импульса, толщину образца, определяют параметры отображения УЗ-диаграммы;

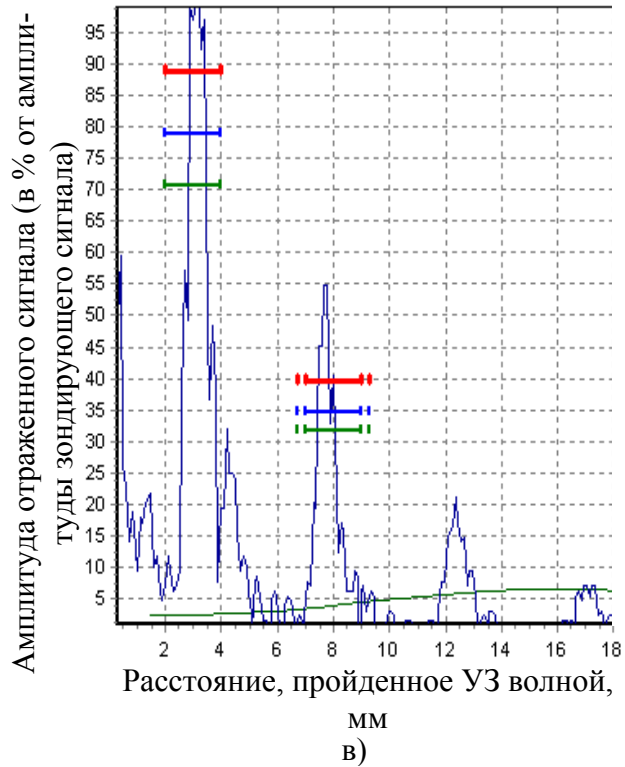
- выполняют не менее 10 измерений на каждом образце, по заданной толщине образца определяют скорость распространения УЗ-волн, получают УЗ-диаграммы (рисунок 4.5, в), результаты измерений сохраняют в памяти дефектоскопа;



а)



б)



в)

Параметр	Значение
Скорость УЗК (м/с)	2270
Усиление (дБ)	15
Шаг усиления (дБ)	1
Частота зондирования (Гц)	100
Амплитуда (дБ)	25,04
Толщина образца (мм)	4,61

г)

Рисунок 4.5 – Определение параметров УЗ-колебаний в материале образцов защитного покрытия труб: а, б) проведение измерений; в) УЗ диаграмма; г) фрагмент протокола

- по результатам анализа УЗ-диаграмм определяют коэффициент затухания УЗ-колебаний в материале образцов.

Величину коэффициента затухания (δ_i) УЗ-колебаний в материале образцов УЗ-исследований определяют по выражению, дБ/м:

$$\delta_i = 20 \cdot \frac{1}{h} \cdot \ln \frac{A_{i1}}{A_{i2}} \quad (4.6)$$

где h – толщина образца покрытия, м; A_{i1} – амплитуда первого отраженного УЗ-сигнала, дБ; A_{i2} – амплитуда второго отраженного УЗ-сигнала, дБ.

Результаты исследований по изменению коэффициента затухания УЗ-колебаний δ_i в зависимости от срока хранения защитных покрытий труб в условиях умеренного климата II₅ представлены на рисунке 4.6, а.

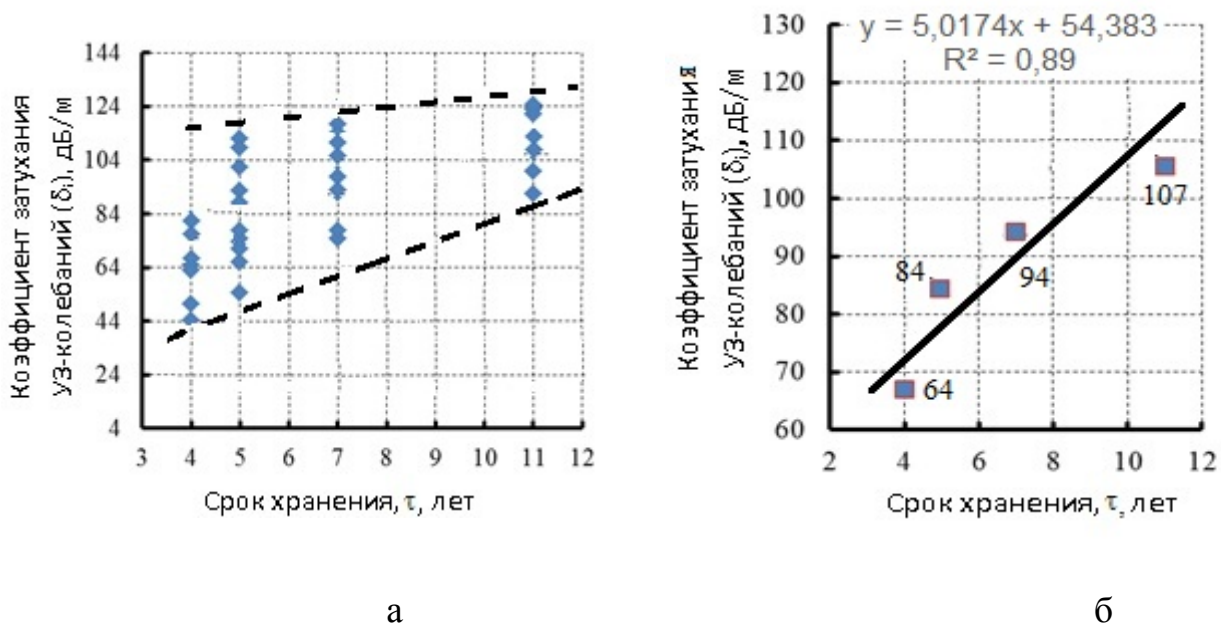


Рисунок 4.6 – Коэффициент затухания УЗ-волн в функции срока хранения защитных полимерных покрытий: а – общие результаты измерений; б – оценка достоверности результатов измерений по средним значениям

Результаты исследований на этом рисунке имеют широкий размах и обработаны по средним значениям измерений. Обоснование этому выбору представлено на рисунке 4.6, б. Как видно, средние значения этих измерений имеют достоверность результатов обработки не менее $R^2=0,89$, что в методах статистики является вполне приемлемым показателем. При этом выражение для определения функциональной зависимости изменения коэффициента затухания УЗ-колебаний от времени хранения контрольных образцов будет иметь вид, дБ/м:

$$\delta_i = 5,0174\tau + 54,383, \quad (4.7)$$

где τ – срок хранения защитных покрытий в условиях атмосферных воздей-

ствий, годы.

Характер изменения коэффициента затухания УЗ-колебаний δ_i в зависимости от параметра относительного удлинения γ_i представлен на рисунке 4.7. С доверительной вероятностью $R^2=0,94$ эта зависимость выражается уравнением прямой:

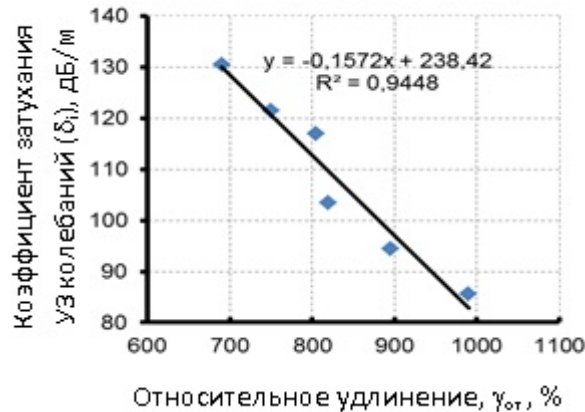


Рисунок 4.7 – Характер изменения коэффициента затухания УЗ-колебаний в зависимости от относительного удлинения контрольных образцов

$$\delta_i = -0,1572 \cdot \gamma_i + 238,42 \quad , \quad (4.8)$$

откуда параметр относительного удлинения составит:

$$\gamma_i = \frac{238,42 - \delta_i}{0,1572} \quad . \quad (4.9)$$

Далее прогнозный расчет времени сохраняемости защитных покрытий по контролируемому параметру затухания УЗ-волны δ_i выполняется следующим образом:

- определяется коэффициент затухания УЗ-колебаний в момент ($\tau=0$) закладки труб с защитными покрытиями на хранение в аварийный запас по формуле (4.5):

$$\delta_{i(0)} = 5,0174 \cdot 0 + 54,383 = 54,4 \frac{\partial Б}{м} \quad ;$$

- определяется показатель относительного удлинения γ_{i0} в начальный момент времени ($\tau = 0$) по формуле (4.7):

$$\gamma_i = \frac{238,42 - 54,4}{0,1572} = 1170,7 \% ;$$

- по формуле (4.5) уточняются средние измеренные значения коэффициентов затухания $\delta_{(\tau)}$ в моменты двух последовательных замеров (в рассматриваемом случае приняты значения при $\tau=4$ года и $\tau=11$ лет хранения образцов):

$$\delta_{(4)} = 5,0174 \cdot 4 + 54,383 = 74,5 \frac{\partial B}{M} ;$$

$$\delta_{(11)} = 5,0174 \cdot 11 + 54,383 = 109,6 \frac{\partial B}{M} ;$$

- по формуле (4.7) определяются значения показателей относительного удлинения контрольных образцов при $\tau=4$ года и $\tau=11$ лет хранения:

$$\gamma_4 = \frac{238,42 - \delta_{(4)}}{0,1572} = \frac{238,42 - 74,5}{0,1572} = 1042,7 \% ;$$

$$\gamma_{11} = \frac{238,42 - \delta_{(11)}}{0,1572} = \frac{238,42 - 109,6}{0,1572} = 819,5 \% ;$$

- по формуле (4.1) определяются коэффициенты $\varphi_{(\tau)}$, характеризующие остаточный процент потенциального ресурсного запаса контролируемого параметра $\gamma_{(\tau)}$ после τ_i лет хранения защитных покрытий:

$$\varphi_{(4)} = \frac{\gamma_{i(4)}}{\gamma_{i(0)}} \cdot 100 = \frac{1042,7}{1170,7} \cdot 100 = 89,1 \% ;$$

$$\varphi_{(11)} = \frac{\gamma_{i(11)}}{\gamma_{i(0)}} \cdot 100 = \frac{819,5}{1170,7} \cdot 100 = 70,0 \% ;$$

- допустимое значение относительного удлинения $[\gamma_i]$ для защитных покрытий в соответствии с ГОСТ 31448-2012 при температуре 20 °С составляет (таблица 4.1):

$$[\gamma] = 350 \%.$$

В процентном отношении от первоначального значения относительного удлинения γ_0 эта величина по формуле (4.3) составит:

$$\varphi_{\text{ci}} = \frac{[\gamma]}{\gamma_{i(0)}} \cdot 100 = \frac{350}{1170,7} \cdot 100 = 29,9 \%$$

На основе полученных данных выстраивается диаграмма (рисунок 4.8)

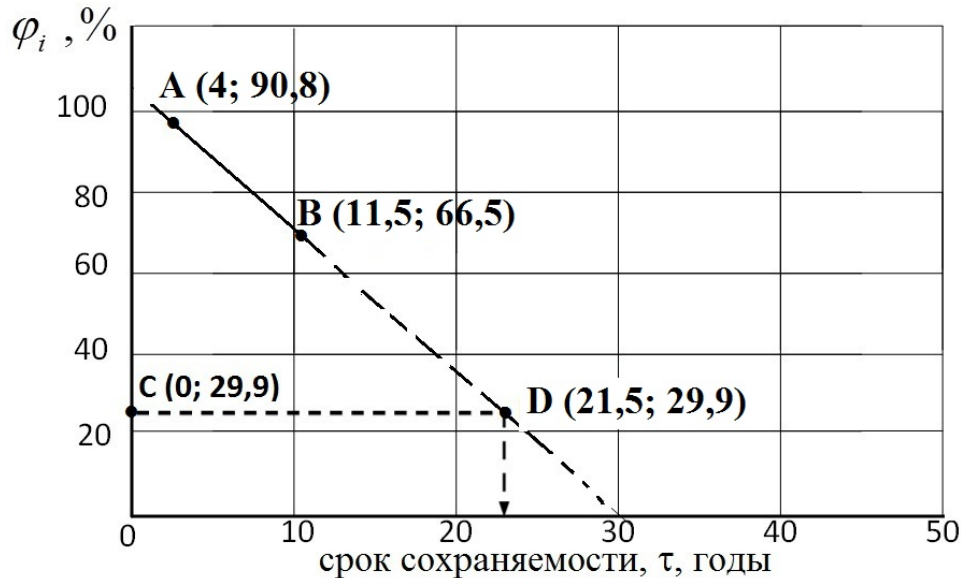


Рисунок 4.8 – Графическое прогнозирование предельного срока сохраняемости по контролируемому параметру относительного удлинения

Из графика этой диаграммы видно, что по контролируемому параметру относительного удлинения время сохраняемости исследуемого защитного покрытия составит ориентировочно $\tau=26$ года.

Для точной оценки этого результата решается задача пересечения двух прямых, имеющих координаты A (4; 89,1); B (11; 70) и C (0; 29,9). Составляются два уравнения и решаются совместно:

$$\begin{cases} \frac{x-4}{11-4} = \frac{y-89,1}{70-89,1} \\ y = 29,9 \end{cases}$$

Решение этих уравнений дает:

$$x = 21,7 \text{ года}$$

4.3.3. Определение прогнозного времени сохраняемости защитного полимерного покрытия труб по контролируемому параметру адгезионной прочности

Результаты испытания адгезионной прочности защитных покрытий труб аварийного запаса для зоны умеренного климата II₅ представлены в главе 3 (см. рисунок 3.15, в). Статистическая обработка этих изменений по средним значениям с доверительностью $R^2=0,9158$ позволяет установить функциональную зависимость показателя прочности адгезии A_i от времени хранения τ :

$$A_i = -8,0592 \cdot \tau + 357,47 \quad (4.10)$$

Методика прогнозирования времени сохраняемости аналогична предыдущим примерам:

а) из выражения (4.10) определяется первоначальное среднее значение прочности адгезии (при $\tau=0$)

$$A_{i0} = 357,5 \text{ , } H / \text{см} ;$$

б) устанавливаются по фактическим измерениям или расчетом по формуле (4.10) значения двух параметров $A_{i(\tau)}$ для разных моментов времени, например, $\tau = 3$ года и $\tau = 11$ лет:

$$A_{i(3)} = -8,0592 \cdot 3 + 357,47 = 333,3 \text{ , } H / \text{см} ;$$

$$A_{i(11)} = -8,0592 \cdot 11 + 357,47 = 268,8 \text{ , } H / \text{см} ;$$

в) вычисляются коэффициенты остаточного ресурсного запаса по параметру адгезионной прочности:

$$\varphi_{(3)} = \frac{A_{i(3)}}{A_{i(0)}} \cdot 100 = \frac{333,3}{357,5} \cdot 100 = 93,2 \text{ \%}$$

$$\varphi_{(11)} = \frac{A_{i(11)}}{A_{i(0)}} \cdot 100 = \frac{268,8}{357,5} \cdot 100 = 75,2 \text{ \%}$$

г) в соответствии с ГОСТ 31448-2012 устанавливается допустимое значение параметра адгезионной прочности, равное $[A_i] = 150 \text{ H / см} ;$

д) по формуле (4.3) определяется коэффициент предельно допустимого снижения контролируемого параметра:

$$\varphi_{\delta i} = \frac{[A_i]}{A_{i(0)}} \cdot 100 = \frac{[150]}{357,5} = 41,96 \%$$

е) выстраивается диаграмма для графической оценки прогнозного срока сохраняемости для рассматриваемого примера по вычисленным значениям:

A (3; 93,2); B (11; 75,2); C (0; 41,96); D (22,8; 41,96).

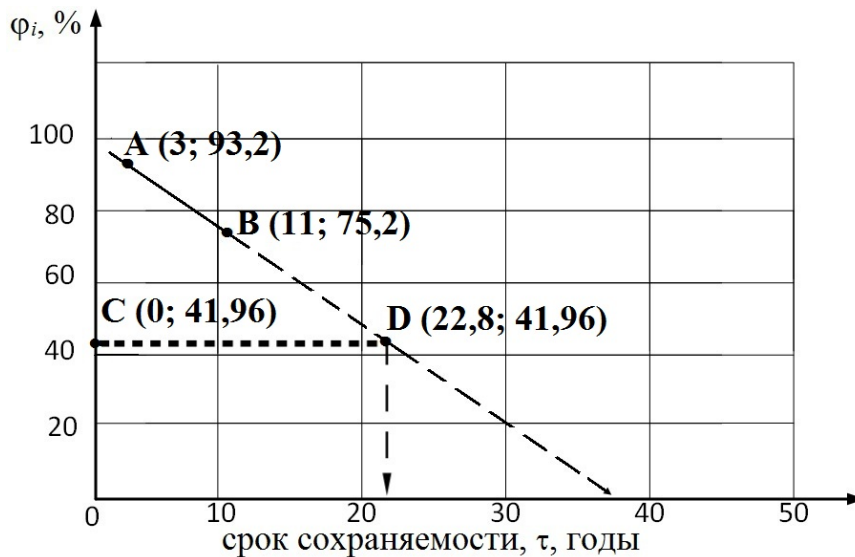


Рисунок 4.9 – Графическое прогнозирование предельного срока сохраняемости по контролируемому параметру адгезионной прочности

Из рисунка видно, что предельный срок сохраняемости по графическому прогнозу определяется примерно в 22 года. Для уточнения этого результата решается система уравнений:

$$\begin{cases} 18x + 8y - 745,6 \\ y = 41,96 \end{cases},$$

составленная по аналогии с предыдущими примерами. Решение этого уравнения дает:

$$x = 22,8.$$

Окончательно: прогноз предельного срока сохраняемости рассматриваемого полимерного покрытия труб по контролируемому параметру адгезионной прочности составляет:

$$\tau = 22,8 \text{ года.}$$

На рисунке 4.10 представлен совмещенный график прогнозной оценки предельного срока сохраняемости защитных покрытий труб по контролируемым параметрам твердости (НВ), относительного удлинения (γ) и адгезионной прочности А.

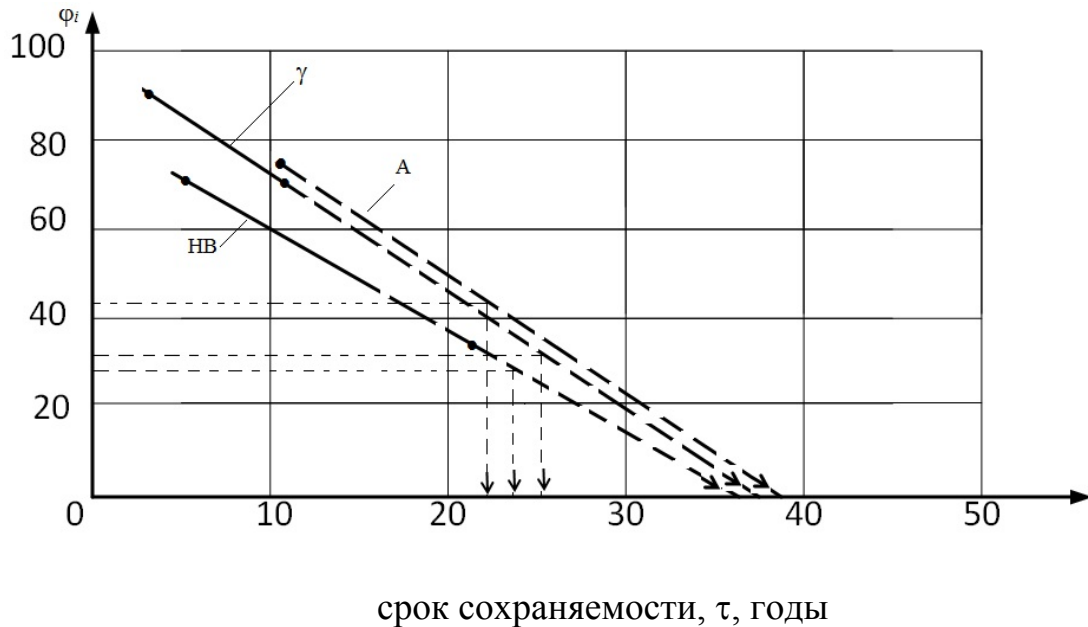


Рисунок 4.10 – Совмещенный график прогнозной оценки предельного срока сохраняемости защитных покрытий труб по контролируемым параметрам: НВ – твердости; γ – относительному удлинению; А – адгезионной прочности

Из этого рисунка видно, что предельные сроки сохраняемости защитных покрытий труб по прочности контролируемым параметрам (НВ, γ , А) находятся во временном диапазоне 23 ÷ 26 года. В этот временной период необходимо провести дополнительные контрольные измерения для оценки остаточных ресурсных возможностей по контролируемым параметрам и принять окончательное решение о продлении срока хранения защитных покрытий труб или о выводе их из состава аварийного запаса с последующим использованием для других целей, т.к. достижение предельного состояния (состояния разрушения) защитных покрытий труб по выполненному прогнозу ожидается во временном диапазоне от 30 до 40 лет (см. рисунок 4.10).

Выводы:

1. Предложена методика прогнозирования сроков сохраняемости полимерных покрытий труб на основе регулярного мониторинга контролируемых параметров, к которым относятся нормируемые значения прочностных или других предельно допустимых показателей, характеризующих работоспособность изделия.

2. Основана взаимосвязь контролируемых параметров со сроками сохраняемости защитных покрытий и методики их прямого или косвенного определения с помощью доступных методов диагностического контроля.

3. Представлены примеры методов прогнозного определения предельных сроков сохраняемости защитных покрытий по значениям контролируемых параметров в условиях атмосферного хранения.

4. Показано, что в условиях умеренного климата предельный срок сохраняемости для стандартных полимерных покрытий труб определённый по выбранным контролируемым параметрам (твёрдость НВ, коэффициент затухания УЗ-волны δ_i , адгезионная прочность), находится во временном диапазоне от 23 до 26 лет хранения, при этом достижение предельного состояния (состояние разрушения) ожидается в интервале от 35 до 40 лет.

5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОХРАНЯЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ТРУБ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

5.1. Факторы, влияющие на сохраняемость физико-механических свойств полимерных покрытий

Процесс закладки аварийных запасов труб, имеющих заводские полиэтиленовые покрытия, предполагает их доставку к месту хранения и далее к объектам строительства, ремонта и реконструкции трубопроводных систем. При этом трубы и трубные секции подвергаются воздействию статических и динамических нагрузок, поскольку процесс перевозки осуществляют обычно на автомобильном трубовозно-плетевозном транспорте. Очевидно, что доставка тяжелых труб с наружным полиэтиленовым покрытием требует при этом особого внимания. Это обусловлено тем, что доставка труб осуществляется по автозимникам, автодорогам со щебеночным покрытием, временным проездом, при этом протяженность и характеристики дорог от трубных баз временного хранения до участков строительства существенно неоднородны. Схема возникновения изгибных (а) и крутильных (б) воздействий на перевозимую секцию представлены для примера на рисунке 5.1.

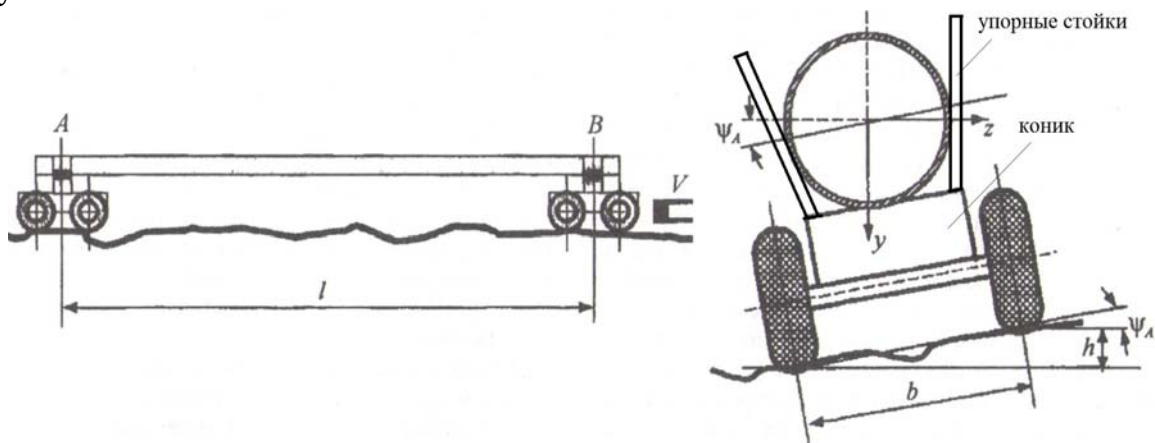


Рисунок 5.1 – Схема возникновения изгибных (а) и крутильных (б) сил при перевозке трубной секции

Из рисунка видно, что при постоянной линейной скорости (см. рисунок 5.1, а) ось А будет проходить по тем же препятствиям и неровностям дороги, что и ось В, но с некоторым запозданием. При этом, за счет неровностей поперечного про-

филя дороги, возникают одновременно поперечно-угловые колебания поперечного коника с упорными стойками, которые вызывают возникновение крутильных колебаний в транспортируемом трубном изделии. При этом в защитной полимерной оболочке трубы возникают напряжения на границе адгезионного контакта труба – покрытие, вызванные поперечно - угловыми колебаниями закрепленного покрытия относительно стальной трубы значительной массы и инерции. Вследствие цикличности этих колебаний возникают накопление необратимых микро-разрушений и микрорастрескиваний структуры полимерной оболочки и адгезионного слоя, что служит пусковым механизмом деградации защитных покрытий в процессе их последующего хранения в составе аварийных запасов.

Научное обоснование развития деформационных процессов, приводящих к нарушению структуры полимерного материала покрытий в процессе транспорта труб, изложено автором в работе [14]. Здесь же даны рекомендации по устранению условий возникновения деформационных воздействий в процессе транспортировки. Которые сводятся к рекомендациям по совершенствованию технологического оборудования, предназначенного для работы с изолированными трубами.

В процессе исследований и наблюдений за изменением качественных кондиций защитных покрытий труб установлено, что в процессе атмосферного хранения и при производстве сварки в ряде случаев (до 10÷15% от общего количества труб) защитные покрытия приобретают повреждения локальных областей, что проявляется в виде усадочного сдвига, растрескивания и образования отслаивания кромки шириной до 6 и 40 мм соответственно при окружной протяженности до 1,5 м. Образование повреждений связано преимущественно с действием экстремальных температурных факторов, которые приводят к увеличению внутренних напряжений в покрытии и к снижению адгезионной прочности его сцепления с металлом. Это прежде всего атмосферные факторы (свет, кислород, влага) и циклические изменения отрицательной температуры окружающего воздуха с перепадом до 30 °С в течение суток и длительное воздействие недопустимых (ниже минус 22°С) и экстремальных (ниже минус 40°С) отрицательных температур в процессе хранения труб на складских площадках. При этом оптимальный термиче-

ский режим, который не оказывает негативного воздействия на служебные свойства антикоррозионных полимерных покрытий характеризуется диапазоном температур в интервале от минус 22⁰С до плюс 48⁰С.

Тогда механизм образования и развития повреждений полимерных покрытий труб можно объяснить следующим образом.

В нормальных условиях при температуре от минус 22⁰С до плюс 48⁰С значения внутренних напряжений в покрытии и адгезионной прочности сцепления покрытия с металлом соответствуют допустимым по ГОСТ Р 31448-2012. Атмосферное температурное воздействие создает в покрытии труб напряженное состояние при одновременном снижении прочности адгезионного сцепления. До тех пор, пока эти силы соизмеримы, клеевой слой удерживает оболочку покрытия (и ее кромку) на поверхности сопряжения с трубой. При нарушении этого баланса возникает состояние, при котором усадочные силы, вызывающие рост внутренних напряжений на кромке покрытия, начинают превышать силы адгезионного сцепления. Действительно, по мере уменьшения температуры окружающего воздуха от минус 22⁰С до минус 40⁰С и ниже внутренние напряжения на кромке покрытия увеличиваются в 2 раза, а адгезионная прочность сцепления уменьшается более чем в 33 раза [109]. В этих условиях зарождается повреждение покрытия: кромка под действием усадочных сил начинает смещаться, а затем, необратимо деформируясь, стремится отделиться от поверхности; нарушенная структура клеевого состава перестает выполнять роль сцепляющего слоя: возникает воздушный зазор, неспособный к самоликвидации при восстановлении нормальных температурных условий в силу указанных причин. Иначе говоря, зарождение дефекта является также необратимым процессом; он может прогрессировать и развиваться при повторяющихся или циклических температурных воздействиях, но не может вернуться к исходно заданным параметрам. Характер этих воздействий определяется климатическими особенностями территорий, и наиболее опасны перепады зимних температур в северных и арктических районах предполагаемого строительства.

Влияние солнечной радиации и ее УФ-спектра приводят не только к перераспределению напряжений в теле покрытия, но и к перегреву полимеров на контак-

те с трубой и утратой клеящих свойств адгезионного слоя, а ультрафиолетовое излучение инициирует старение материала с зарождением сеток поверхностных трещин, развитие которых вплоть до разрыва сплошности завершает кислород воздуха, как мощнейший стимулятор различных окислительных процессов, и окружающая влага, как инструмент расклинивания трещин (эффект Ребиндера) и их расщепления при фазовых превращениях в кристаллическое состояние.

Таким образом, условия обеспечения сохраняемости полимерных материалов защитных покрытий труб зависят от климатического района хранения и текущего технического состояния. При этом срок сохраняемости защитных покрытий определяется агрессивностью влияния атмосферных факторов, методическая взаимосвязь которых позволяет сформулировать системный комплекс рекомендаций по организации процесса обеспечения сохраняемости полимерных покрытий труб в условиях атмосферных воздействий. При этом организация процесса, обеспечивающего сохраняемость полимерных покрытий труб при длительном хранении в составе аварийных запасов, включает три этапа:

- оценка технического состояния защитных покрытий труб для отбора их с помощью визуально-инструментальных методов контроля в состав аварийных запасов;
- создание условий хранения аварийных запасов в рамках допустимых значений температурно-инсоляционных и влажностных воздействий на полимерные материалы защитных трубных покрытий;
- регулярный мониторинг технических свойств защитных покрытий труб для оценки возможности дальнейшего хранения, необходимости ремонта или вывода из состава аварийных запасов.

5.2. Оценка внешнего технического состояния защитных покрытий труб для отбора в состав аварийных запасов

Исследования проводятся с учетом требований РД 03-606-03 [91] и заключаются в определении состояния защитного покрытия труб в зависимости от срока и условий хранения с помощью средств визуального-инструментального контроля

(увеличительных стекол, измерительных микроскопов, оптических приборов для определения шероховатости поверхности), а также измерительного оборудования (универсальных шаблонов сварщика, штангенциркулей, линеек, магнитных и ультразвуковых толщиномеров; акустических дефектоскопов).

Исследования включают следующие этапы выполнения:

- 1). Контроль геометрических характеристик качества внешней поверхности защитного покрытия с индикацией повреждений, сформировавшихся под действием факторов окружающей среды (поверхностных микротрещин), а также механических воздействий (порезов, царапин);
- 2). Контроль протяженности поверхностных трещин;
- 3). Контроль состояния кромок покрытия с выявлением отслоений в прикромочной области;
- 4). Контроль состояния клеевого слоя с выявлением отслоений.

5.2.1. Контроль геометрических характеристик внешней поверхности защитного покрытия

При проведении исследований последовательно выполняется:

- визуальный осмотр поверхности покрытия с определением его отражающей способности, цвета, волнистости, шероховатости;
- осмотр отдельных участков поверхности покрытия с использованием измерительного микроскопа, индикация микродефектов поверхности (поверхностных микротрещин);
- выявление механических сквозных и несквозных повреждений покрытия, определение их размеров, детальный осмотр (с помощью микроскопа или увеличительного стекла) поверхности покрытия по периметру повреждения;

Отражающая способность покрытия может быть определена следующим образом. Сфокусированный световой луч направляется на поверхность покрытия под определенным углом. Отраженный от поверхности луч проецируется на черную матовую проекционную пластину ориентированную таким образом, чтобы ее плоскость была перпендикулярна оси отраженного рассеянного луча. По вели-

чине световой проекции, формируемой при падении отраженного света на поверхности пластины можно дать условную оценку отражающей способности покрытия.

Для определения числовых характеристик отражающей способности поверхности покрытия рекомендуется использовать стандартные блескомеры, позволяющие измерять указанный параметр в единицах блеска в диапазоне от 0 до 2000.

Геометрические характеристики качества поверхности показаны на рисунке 5.1 в порядке уменьшения их абсолютных величин:

- отклонения формы (макрогеометрия);
- волнистость;
- шероховатость.

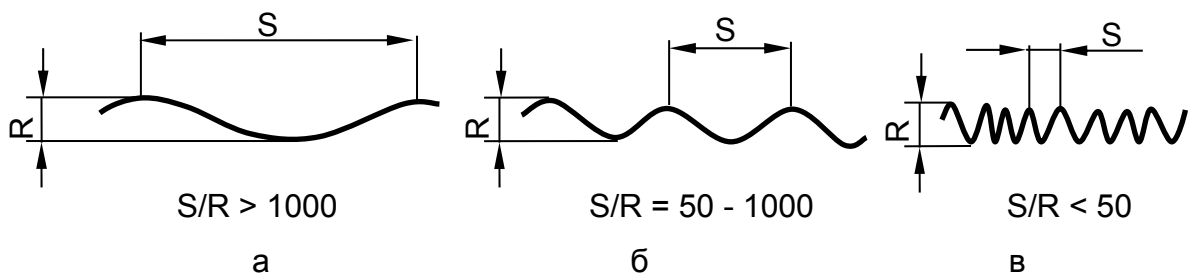


Рисунок 5.1 – Геометрические характеристики качества поверхности: а) отклонения формы; б) волнистость; в) шероховатость

В отдельных случаях волнистость может быть больше погрешности формы, а шероховатость больше волнистости. Волнистость занимает промежуточное положение между шероховатостью и погрешностями формы поверхности. Критерием для их разграничения служит отношение шага S к высоте неровностей R.

Геометрические характеристики качества поверхности определяются в соответствии с рисунком 5.1.

Отклонения от формы измеряются с помощью магнитного толщиномера.

Волнистость при отношении $S/R = 500 - 1000$ может быть определена с помощью стальной линейки и штангенциркуля, оснащенного глубиномером. Линейка укладывается на поверхность трубы (боковая поверхность линейки должна находиться строго в плоскости, проходящей через ось трубы) и формирует уро-

вень, относительно которого штангенциркулем определяются высоты неровностей поверхности защитного покрытия.

Шероховатость определяется визуально. Допускается для определения шероховатости использовать стандартные эталоны.

Градации состояния внешней поверхности защитного покрытия, определяемые по результатам визуального осмотра, приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Критерии оценки поверхности защитного покрытия по результатам визуального осмотра

Контролируемый параметр	Продолжение таблицы 5.1 Значение
Отражающая способность	Полное отражение или незначительное рассеяние светового сфокусированного луча вне зависимости от угла его падения на поверхность покрытия
	Рассеянное отражение светового луча вне зависимости от угла падения с формированием индикационной пластине нечеткой проекции отраженного луча
	Рассеянное отражение светового луча с формированием нечеткой проекции отраженного луча при углах падения более 60°
	Полное рассеяние отраженного луча, без формирования проекции с равномерным распределением отраженного света по всей поверхности индикационной пластины
Цвет	Черный, блестящий
	Черный, матовый
	Темно-серый, матовый
Характеристика поверхности	Гладкая, блестящая
	Волнистая
	Шероховатая, матовая

5.2.2. Контроль протяженности поверхностных трещин

По результатам осмотра поверхности покрытия с помощью измерительного микроскопа определяют наличие поверхностных микротрещин, их размеры и

плотность распределения (протяженность на единицу площади). Особенности распределения микротрещин на поверхности покрытия определяются в соответствии с рисунком 5.2.

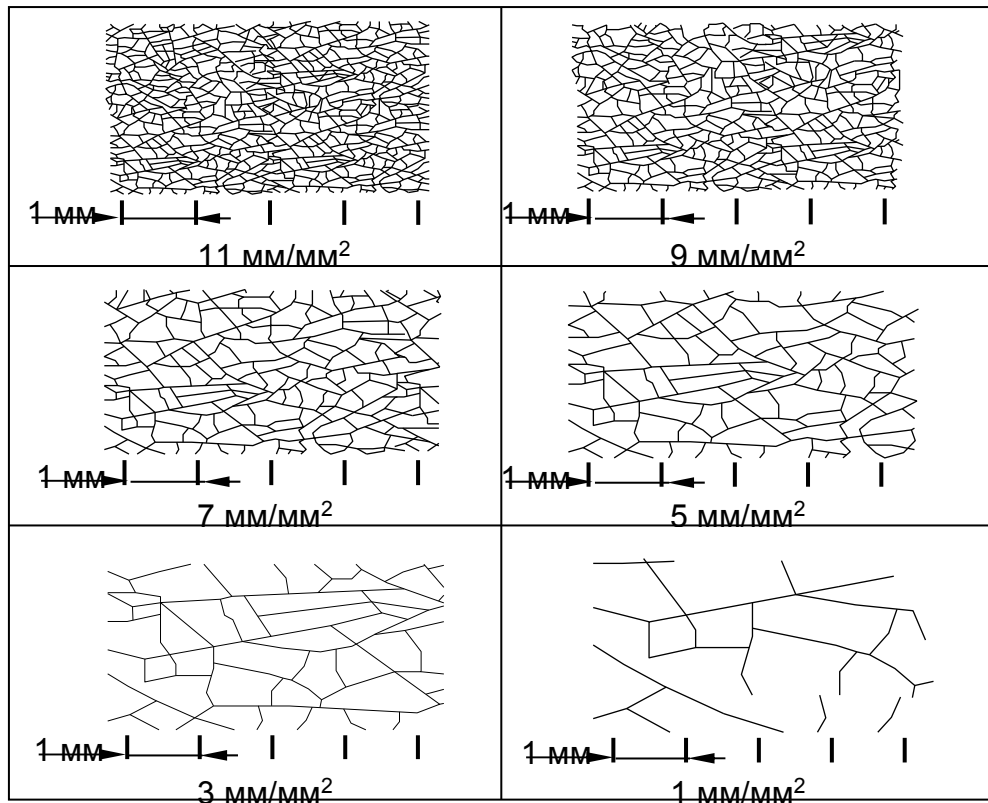


Рисунок 5.2 – Протяженность трещин на единицу площади поверхности покрытия в зависимости от плотности распределения

Пример реализации методики определения протяженности поверхностных трещин покрытия на единицу площади в зависимости от плотности их распределения представлен на рисунке 5.3.

Глубина поверхностных трещин определяется с помощью измерительного микроскопа по ширине их раскрытия. Как правило, вследствие длительного хранения труб на открытом воздухе без использования каких-либо укрывных приспособлений (тентов, навесов), внутренний объем трещин оказывается заполненным мелкими твердыми пылевыми частицами, имеющими светлую окраску, соответственно, ширина раскрытия трещин может быть определена с достаточно высокой точностью с помощью стандартного измерительного микроскопа.

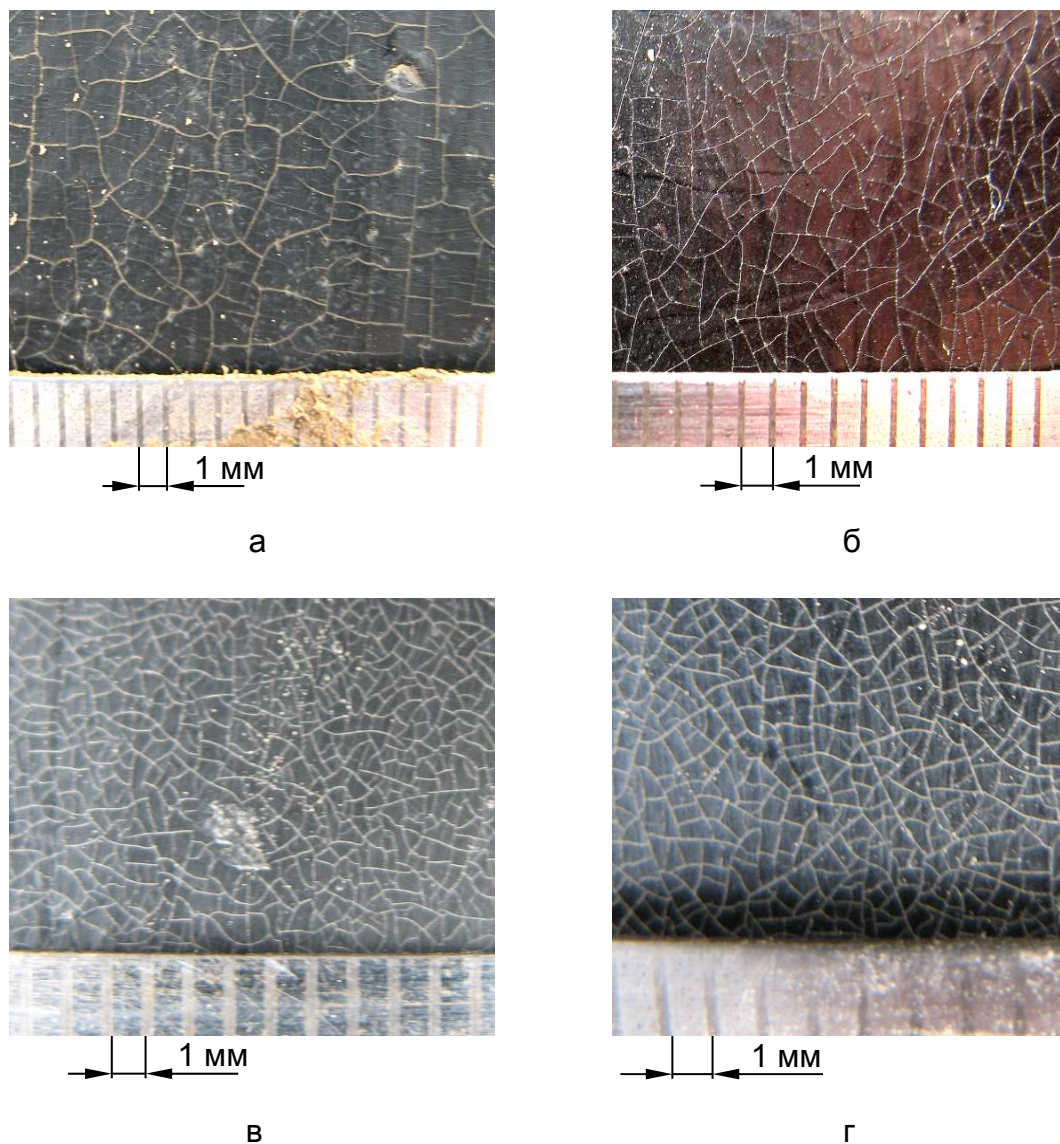


Рисунок 5.3 – Сетка трещин на поверхности защитного полиэтиленового покрытия труб различной плотности распределения: а) протяженность трещин 1 мм/мм²; б) 3 мм/мм²; в) 5 мм/мм²; а) 9 мм/мм²

В трещинах с высокой степенью раскрытия пылевые частицы могут не удерживаться. В этом случае рекомендуется использовать портативные микроскопы, работающие в отраженном свете. На изображениях, получаемых с помощью таких микроскопов, трещины будут отражены в виде черных линий. Для полиэтилена отношение величины раскрытия трещины к глубине составляет от 0,1 до 0,15, соответственно для трещин шириной 0,05 мм глубина составит 0,35 – 0,5 мм.

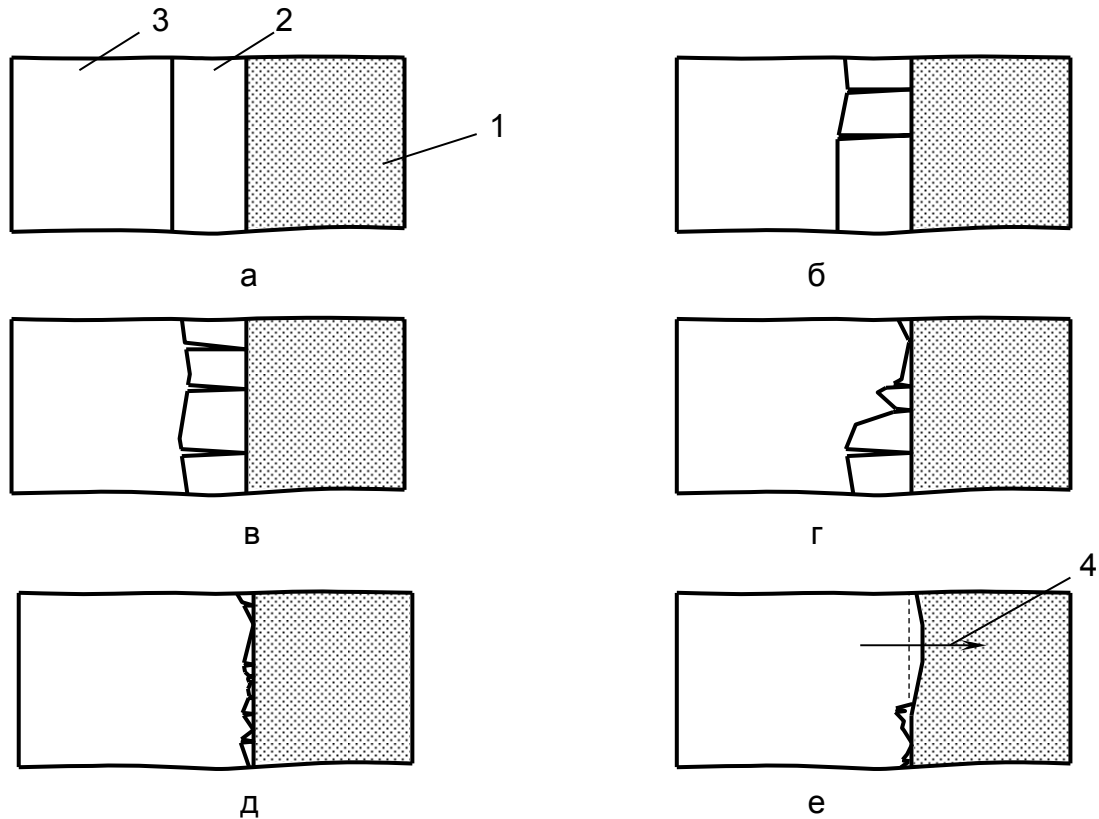
5.2.3. Контроль состояния кромок защитного покрытия

Индикатором степени агрессивного воздействия факторов окружающей среды на защитное покрытие в прикромочной области является выступающая полоса клеевого подслоя, расположенная на срезе кромки между внешним полиэтиленовым слоем и грунтовочным эпоксидным слоем, нанесенным на внешнюю поверхность трубы. Под действием ультрафиолетового излучения, а также суточных и сезонных колебаний температуры происходит постепенное снижение адгезии и эластичности выступающего клеевого подслоя, с последующим отверждением, растрескиванием и разрушением.

Этапы изменения состояния выступающего клеевого подслоя следующие:

1. Начало хранения, выступающая полоса клеевого подслоя эластичная, хорошо приклеенная к грунтовочному слою;
2. Снижение адгезии выступающей полосы к грунтовочному слою. Выступающая полоса свободно отделяется от грунтовочного слоя с помощью механических приспособлений (стального плоского щупа, стальной линейки);
3. Снижение эластичности выступающей полосы, формирование отдельных хрупких участков с трещинами (в основном на сторонах трубы, подверженных воздействию ультрафиолетового излучения). Хрупкие участки выступающей полосы приподнимаются над грунтовочным слоем на высоту до 1 мм;
4. Полное охрупчивание и растрескивание выступающей полосы клеевого подслоя;
5. Разрушение полосы клеевого подслоя на отдельных участках;
6. Полное разрушение полосы клеевого подслоя с формированием микротопслоений на кромки внешнего полиэтиленового слоя покрытия;
7. Формирование отслоений на кромке полиэтиленового покрытия.

Степень разрушения выступающей полосы клеевого подслоя определяется в соответствии с рисунком 5.4.



1 – внешний полиэтиленовый слой; 2 – выступающая полоса клевого подслоя; 3 – прикромочная область трубы; 4 – направление перемещения кромки внешнего полиэтиленового слоя

Рисунок 5.4 – Повреждения выступающей полосы клевого подслоя на кромке защитного покрытия труб, формируемые в процессе хранения под действием негативных факторов окружающей среды: а) эластичная полоса, адгезия к грунтово-вочному слою нормальная или пониженная; б) формирование локальных участков охрупчивания и растрескивания; в) полное охрупчивание и растрескивание; г) локальное разрушение полосы; д) полное разрушение полосы; е) формирование микроотслоений на кромке внешнего полиэтиленового слоя покрытия

Пример развития повреждений клевого подслоя представлен на рисунке 5.5.

Этот метод контроля реализуется в том случае, если не проводились мероприятия по предохранению прикромочной области покрытия от воздействий неблагоприятных факторов. В том случае, если на кромку покрытия наносились защитные составы, контроль заключается в выявлении отслаиваний с помощью стальных щупов или акустических дефектоскопов.

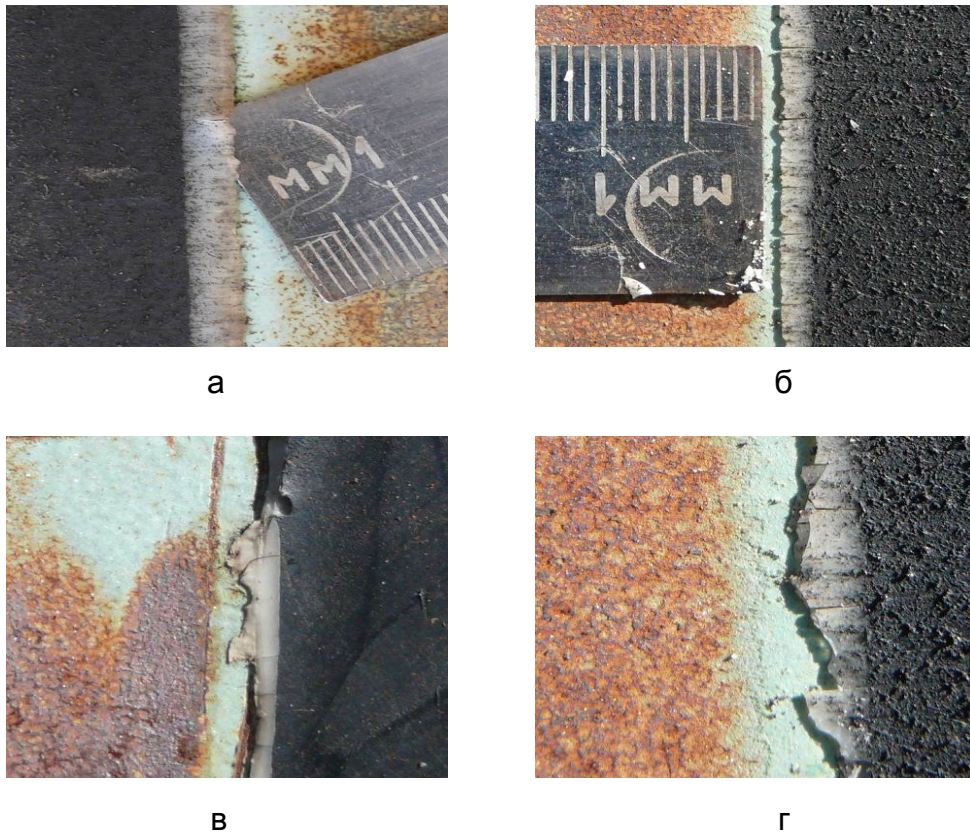


Рисунок 5.5 – Нарушения целостности выступающей полосы клеевого подслоя, сформировавшиеся в процессе хранения труб: а) отслоение полосы; б) охрупчивание и растрескивание; в, г) разрушение, формирование микроотслоений кромки внешнего полиэтиленового слоя

Порядок обследований поверхности покрытия в прикромочной области показан на рисунке 5.6.

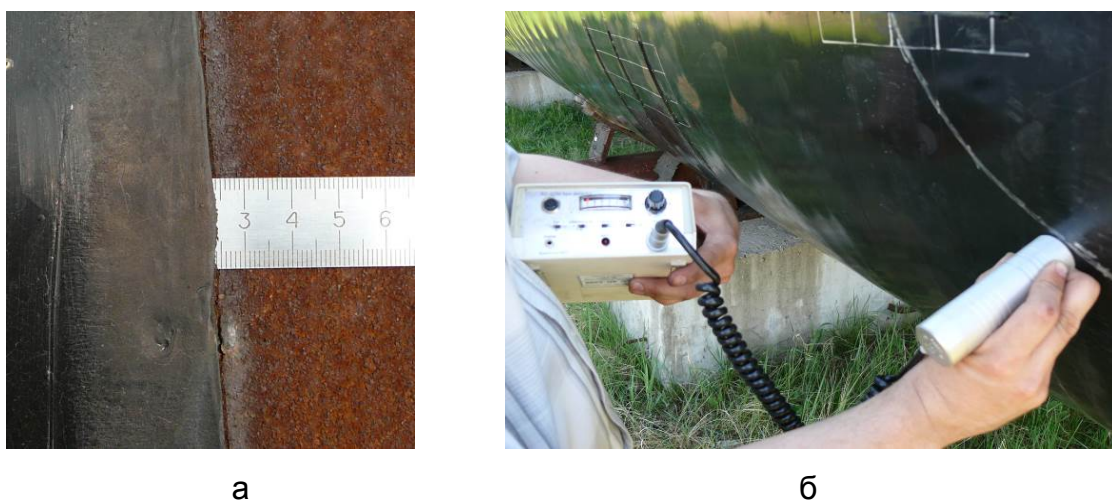


Рисунок 5.6 – Обследования кромки защитного покрытия на наличие отслаиваний с помощью стальной линейки (а) и акустического дефектоскопа (б)

Порядок обследований прикромочной области защитного покрытия с помощью акустического дефектоскопа следующий:

1. На очищенную от пыли и частиц грунта поверхность покрытия, на расстоянии не менее 10 мм от кромки в районе продольного сварного шва устанавливается датчик дефектоскопа, при этом контактные элементы датчика (излучатель и приёмник) должны располагаться на линии, параллельной кромке;

2. Датчик с шагом в 5 см перемещается по кромке, при обнаружении отслоения, положение датчика обозначается водостойким маркером;

3. Начальные точки границ обнаруженных отслоений уточняются, для чего датчик поворачивается таким образом, чтобы контактные элементы датчика были перпендикулярны кромке. Уточнённое положение начальной точки границы отслоения обозначается маркером, перед этим ранее поставленная отметка удаляется с поверхности покрытия;

4. Выполняется сканирование покрытия, для чего датчик с шагом в 5 см перемещается вдоль оси трубы в направлении от кромки. Контактные элементы датчика ориентируются по линии, перпендикулярной оси трубы;

5. В точке, где выходной сигнал изменяется от 20 – 40 мкА до 0 – 3 мкА водостойким маркером ставится отметка, после чего датчик вновь возвращается на кромку, смещается на 5 см по окружности в сторону отслоения и вновь перемещается по оси трубы от кромки;

6. Полученная группа точек объединяется общей линией, обозначающей границу отслоения.

Контроль отслаиваний на кромках покрытия выполняется с помощью стального щупа (в качестве которого может выступать стальная линейка), а также акустического дефектоскопа АД-42 ИМ с раздельно-совмещённым преобразователем РА-5R или аналогичного.

При обследовании прикромочной области защитного покрытия с помощью стального щупа определяется глубина отслаивания, а также его протяженность по окружности.

5.2.4. Контроль состояния клевого слоя с выявлением отслоений

Обследование проводится с помощью акустического дефектоскопа АД-42 ИМ с раздельно-совмещённым преобразователем РА-5R или аналогичного. Сканированию подлежит вся поверхность покрытия трубы. Для этого датчик дефектоскопа последовательно перемещается:

- по окружности, в пределах назначенных контрольных сечений, при этом шаг перемещения составляет не более 10 см, расстояние между соседними сечениями не более 10 см;

- по линейным траекториям на боковой образующей трубы, параллельных оси трубы, с шагом 10 см. Расстояние между соседними траекториями не более 10 см.

Границы выявленных отслоений обозначаются водостойким маркером.

Детальному обследованию (с расстоянием между точками контроля не более 3 см) подлежат участки покрытия в окрестности механических повреждений защитного покрытия, в том числе и устраненных с помощью ремонтных заплат.

5.2.5. Критерии оценки технического состояния защитного покрытия труб для отбора в состав аварийных запасов

Состояние защитного покрытия на трубах различного срока хранения определяется по совокупности данных, полученных в ходе проведения визуально-измерительного контроля. Результаты контроля вносятся в стандартную форму, где им присваивается определенный балл. По сумме баллов определяется степень нарушения эксплуатационных характеристик покрытия, а также оценивается возможность дальнейшего хранения.

Стандартная форма для записи результатов и определения баллов поврежденных представлена в таблице 5.2.

По сумме баллов определяется общее состояние защитного покрытия:

- менее 1 – удовлетворительное техническое состояние в существующих условиях хранения;

Таблица 5.2 – Критерии оценки состояния защитного покрытия по данным визу-ально-измерительного контроля

Контролируемый параметр	Критерий	Значение	Балл
Состояние поверх-ности	Геометрические харак-теристики качества по-верхности	отклонения формы	0
		волнистость	0,1
		шероховатость	0,2
	Цвет	черный, блестящий	0
		черный, матовый	0,1
		темно-серый	0,2
	Блеск (по результатам измерения с помощью блескомера)	800 - 1000	0
		500 - 800	0,1
		менее 500	0,2
	Протяженность поверх-ностных трещин на еди-ницу площади	более 11 мм/мм ²	0,4
		5 – 11 мм/мм ²	0,3
		1 – 5 мм/мм ²	0,2
		менее 1 мм/мм ²	0,1
		трещины отсутствуют	0
Ширина раскрытия тре-щин	менее 0,1 мм	0	
	более 0,1 мм	0,3	
Состояние прикро-мочной области	Состояние выступающей полосы клеевого под-слоя на кромке покрытия	неповрежденная, эластич-ная, хорошо прилегающая к эпоксидному слою	0
		нарушение адгезии, охруп-чивание и растрескивание на локальных участках	0,1
		полное охрупчивание, рас-трескивание и разрушение	0,2
		формирование микроотсла-иваний кромки полиэтиле-нового слоя	0,4
	Отслаивание покрытия в прикромочной области	не выявлены	0
выявлены		1	
Механические по-вреждения	Количество	не выявлены	0
		единичные, малой площади (не более 0,01 м ²)	0,2
		единичные, большой пло-щади (более 0,01 м ²)	0,3
		множественные, малой площади	0,5
		множественные, большой площади	1
Отслаивания	Общая площадь	не выявлены	0
		менее 0,1 м ²	0,1
		0,1 – 0,5 м ²	0,3
		более 0,5 м ²	1

- 1 – 2 – критическое состояние, требующее принятия мер по устранению об-наруженных дефектов;

- более 2 – неудовлетворительное состояние: трубы с покрытием не подлежат хранению в аварийных запасах.

Таким образом, для формирования аварийных запасов направляются трубы с защитными покрытиями удовлетворительного технического состояния и трубы с критическим состоянием защитных покрытий после устранения обнаруженных дефектов.

5.3 Мониторинг технического состояния защитных покрытий труб при длительном хранении

Периодический мониторинг выполняется для оценки технического состояния защитных покрытий труб, хранящихся в составах аварийных запасов сверх установленных норм.

5.3.1 Методы контроля защитных покрытий

Визуально измерительный контроль (ВИК) применяют:

- для определения общего состояния защитного покрытия, выявления и описания сквозных и несквозных дефектов;
- для выявления повреждений, сформировавшихся под действием атмосферных факторов.

Для реализации ВИК покрытий применяют:

- увеличительные средства (лупа, измерительный микроскоп);
- измерительные средства (линейка, штангенциркуль, микрометр, угломер);
- измеритель блеска (фотоэлектрический метод);
- портативный микроскоп, работающий в отраженном свете.

Для выявления отслаиваний покрытия применяют ультразвуковые методы в соответствии с СТП 8828-156-99.

- метод отражения (эхо-метод);
- импедансный метод.

Для реализации ультразвуковых методов используют следующее оборудование:

- ультразвуковой дефектоскоп общего назначения;
- ультразвуковой импедансный дефектоскоп.

Для выявления повреждений, сформировавшихся под действием атмосферных факторов, с помощью ВИК на трубах различного срока хранения определяют следующие характеристики покрытия:

- цвет;
- блеск;
- волнистость, шероховатость;
- наличие микротрещин в покрытии.

Цвет покрытия определяют визуально путем сравнения с контрольным образцом начального состояния или с помощью спектрофотометра или компаратора цвета.

Блеск покрытия определяют фотоэлектрическим методом по ГОСТ Р 52663-2006.

Для измерения блеска используют три угла:

- 60° - для определения блеска от 0 до 100 единиц;
- 20° - для покрытий, которые при геометрии 60° имеют блеск более 70 единиц;
- 85° - для покрытий, которые при геометрии 60° имеют блеск менее 15 единиц.

Волнистость и шероховатость поверхности покрытия определяют визуально и с применением измерительных средств по ГОСТ 2789-73.

Микротрещины в покрытиях выявляют:

- на наружной поверхности покрытия;
- в клеевом слое покрытия, выступающем на торцевую кромку покрытия.

При выявлении микротрещин на наружной поверхности покрытия определяют размеры и плотность их распределения (протяженность на единицу

площади) в соответствии с п.п. 5.2.3.

Оценку состояния клеевого слоя покрытия, выступающего на торцевую кромку покрытия, проводят в соответствии с п.п. 5.2.4. Результаты ВИК заносят в стандартную форму в соответствии с [91].

5.3.2 Оценка результатов контроля покрытия для отбраковки из состава аварийных запасов

Результатом диагностирования покрытия является перечень дефектов и повреждений покрытий при хранении. По результатам контроля покрытий труб, длительно хранящихся в атмосферных условиях, выполняют оценку пригодности защитных покрытий к дальнейшему хранению или ремонту выявленных дефектов и повреждений.

Оценку выявленных изменений и повреждений покрытий труб, сформировавшихся под действием атмосферных факторов, выполняют на основе совокупности данных, полученных в ходе ВИК. При этом первичную оценку внешнего состояния защитного покрытия определяют в балльной форме (таблица 5.3)

Т а б л и ц а 5.3 – Критерии первичной оценки состояния защитного покрытия по результатам ВИК

Область контроля	Контролируемый показатель	Значение	Балл
По всей поверхности покрытия	Шероховатость	Отклонения формы	0
		Волнистость	0,1
		Шероховатость	0,2
	Цвет	Черный, блестящий	0
		Черный, матовый	0,1
		Темно-серый	0,2
	Блеск	От 50 до 70	0
		От 30 до 50	0,1
	Протяженность поверхностных микротрещин на единицу площади, мм/мм ²	Менее 30	0,2
		Более 11	0,4
		От 5 до 11	0,3
		От 1 до 5	0,2
		Менее 1 мм/мм ²	0,1
		Трещины отсутствуют	0

	Ширина раскрытия микротрещин, мм	Менее 0,1	0
		Более 0,1	0,3
Торцевая кромка покрытия	Состояние клеевого слоя	Материал эластичный, адгезия нормальная	0
		Материал хрупкий, единичные микротрещины	0,1
		Множественные микротрещины	0,2
		Частичное разрушение клеевого слоя	0,4
		Полное разрушение клеевого слоя	0,5
		Деформация и отслаивание заводской торцевой кромки покрытия	1

Для этой цели критериальные оценки контролируемых показателей суммируются. Если общая первичная оценка не превышает $\leq 1,3$ балла, защитное покрытие находится в удовлетворительном состоянии и пригодно для дальнейшего хранения.

Покрытие труб признают также годным к дальнейшему хранению при условии, что показатели его качества соответствует требованиям ГОСТ Р 51164, СТО Газпром 2-3.2-129 и СТО Газпром 2-3.2-130. В частности, покрытие используют для последующего хранения при выявлении следующих видов дефектов:

- сдвиг (деформация) торцевого края покрытия по оси к центру трубы до 5 мм;
- неоднородность толщины покрытия (волнистость),
- несквозные повреждения покрытия (вмятина, царапина, задир), при условии, что толщина оставшегося слоя покрытия на дефектных участках составляет не менее 1,5 мм - для труб диаметром до 820 мм включительно и не менее 2,0 мм - для труб диаметром свыше 820 мм;
- микротрещины в покрытиях глубиной не более 0,2 мм.

Если общий балл первичной оценки превышает $> 1,3$, решается вопрос о ремонте покрытия на месте хранения трубы или вывода его из хранения с

последующей утилизацией.

Покрытие подлежит ремонту непосредственно на месте хранения трубы в случае наличия механических повреждений при условии, что размеры единичных дефектов, число и общая площадь дефектных участков на одну трубу не превышают установленных допустимых величин (таблица 5.4).

Т а б л и ц а 5.4 – Балльная система оценки пригодности покрытий к ремонту на основе установленных характеристик выявленных дефектов и повреждений покрытий

Характеристика повреждения	Качественная оценка	Количественная оценка	Баллы
Число повреждений	Единичные	-	0
	Множественные	Не более 5	5
		Более 5	10
Площадь повреждений, м ²	Незначительные	Менее 0,05	0
	Средних размеров	От 0,05 до 0,1	3
	Крупные	От 0,1 до 0,5	5
	Очень крупные	Более 0,5	10
Степень локализации повреждений на трубе	Высокая	Расстояние между крайними повреждениями менее 0,7 м	0
	Средняя	Расстояние между крайними повреждениями от 0,7 до 2 м	5
	Малая	Расстояние между крайними повреждениями более 2 м	10
Примечание – Количественные оценки площади повреждений покрытия в таблице 5.6 указаны для труб диаметром 1420 мм.			
Для труб диаметром менее 530 мм указанные количественные оценки (в баллах) следует умножить на 0,2; для труб диаметром от 530 до 820 мм - на 0,3; для труб диаметром от 820 до 1220 мм - на 0,4.			

Пригодность покрытий к ремонту определяют путем суммирования баллов. Условием пригодности к ремонту является непревышение расчетной суммы величины 20 баллов. Трубы с отремонтированным покрытием являются пригодными для дальнейшего хранения.

Покрытия труб не подлежат ремонту и дальнейшему хранению в случаях:

- превышения расчетной суммы баллов > 20 ;
- отслаиваний покрытия;
- трещин в покрытии глубиной более 0,2 мм.

Трубы с покрытием, имеющие повреждения, которые являются непригодными к ремонту на месте хранения, очищают механическим способом от покрытия. Снятое покрытие утилизируют, хранение трубы завершают.

5.4. Разработка стандарта организации для обеспечения сохраняемости полимерных покрытий труб при атмосферном хранении

Результаты исследований, полученные в диссертационной работе по обеспечению сохраняемости полимерных покрытий при атмосферном хранении, нашли отражение при разработке стандарта организации (СТО) ООО «Газпром трансгаз Ухта» «Сроки хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях с использованием средств защитного укрытия», введенного в действие 01.01.2015 года.

Стандарт регламентирует следующие основные положения:

1) Область применения. Стандарт распространяется на трубы с защитными трехслойными полиэтиленовыми покрытиями заводского нанесения, хранящиеся на объектах ООО «Газпром трансгаз Ухта» (далее – Общество) в атмосферных условиях свыше гарантийного срока хранения.

Стандарт устанавливает порядок реализации организационно-технических мероприятий по увеличению сроков хранения и обеспечению сохранности защитных покрытий труб в атмосферных условиях свыше гарантийного срока хранения, требования к методам периодического контроля состояния защитных покрытий труб и прогнозирования изменения их свойств, требования к конструкциям для обустройства площадок хранения труб защитными укрытиями и к материалам для консервации покрытий труб.

Стандарт предназначен для структурных подразделений Общества и подрядных специализированных организаций, осуществляющих работы по контролю

защитных покрытий труб и обустройству площадок хранения труб защитными укрытиями и нанесению материалов для консервации покрытий труб.

2) Организация процесса хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях:

- Организацию процесса хранения в атмосферных условиях выполняют применительно к трубам с защитными трехслойными полиэтиленовыми покрытиями заводского нанесения, соответствующих требованиям ГОСТ 16337-77, СТО Газпром 2-2.3-129-2007, СТО Газпром 2-2.3-130-2007.

- Целью реализуемых мероприятий является увеличение сроков хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях свыше гарантийного срока хранения до их применения по назначению в соответствии с ГОСТ 9.602-2005, ГОСТ Р 51164-98, ГОСТ Р 52568-2006, СТО Газпром 9.0-001-2009.

- Реализуемые мероприятия по хранению труб с защитными покрытиями должны соответствовать общим требованиям надежности по ГОСТ 27.002-89, требованиям к техническим изделиям в части условий хранения по ГОСТ Р 51908-2002, в том числе применительно к изделиям, хранящимся в условиях Крайнего Севера по ГОСТ 15846-2002.

- Задачами реализуемых мероприятий являются:

а) обоснование сроков сверхнормативного хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях;

б) оценка состояния и своевременное выявление скрытых повреждений защитных покрытий труб при хранении;

в) ограничение влияния атмосферных факторов на защитные покрытия труб.

- Увеличение сроков хранения труб с защитными покрытиями достигается путем повышения сохраняемости защитных покрытий за счет применения мероприятий по ограничению воздействия на защитные покрытия труб повреждающего действия атмосферных факторов.

- Реализуемые мероприятия повышают устойчивость защитного покрытия к воздействию атмосферных факторов, уменьшают скорость ухудшения свойств

материала покрытия.

3) Организация выполнения работ:

- организационно-технические мероприятия по обеспечению длительного хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях включают (рисунок 5.7):

а) прогнозирование изменения свойств защитных покрытий труб с учетом воздействия атмосферных факторов;

б) периодический контроль состояния защитных покрытий труб сверхнормативного хранения;

в) использование средств для защиты и материалов для консервации покрытий труб при хранении.

- Прогнозирование изменения свойств защитных покрытий труб, периодический контроль состояния защитных покрытий труб сверхнормативного хранения проводят структурные диагностические организации Общества на основании их организационно-технической готовности в соответствии с СТО Газпром 2-3.5-046.

- Оборудование площадок хранения труб защитными укрытиями для труб и консервацию кромок защитных покрытий труб выполняют структурные подразделения Общества, в ведении которых находятся трубы с защитными покрытиями.

- Для изоляции и ограничения воздействия на защитные покрытия труб повреждающего действия атмосферных факторов используют:

а) защитные укрытия для труб;

б) материалы для консервации торцевых кромок защитного покрытия труб.

- Мероприятия по ограничению воздействия на защитные покрытия труб повреждающего действия атмосферных факторов применяют для труб, вновь поступающих на хранение и для труб, хранящихся в атмосферных условиях определенный период.

- Для труб, хранящихся в атмосферных условиях без использования защит-

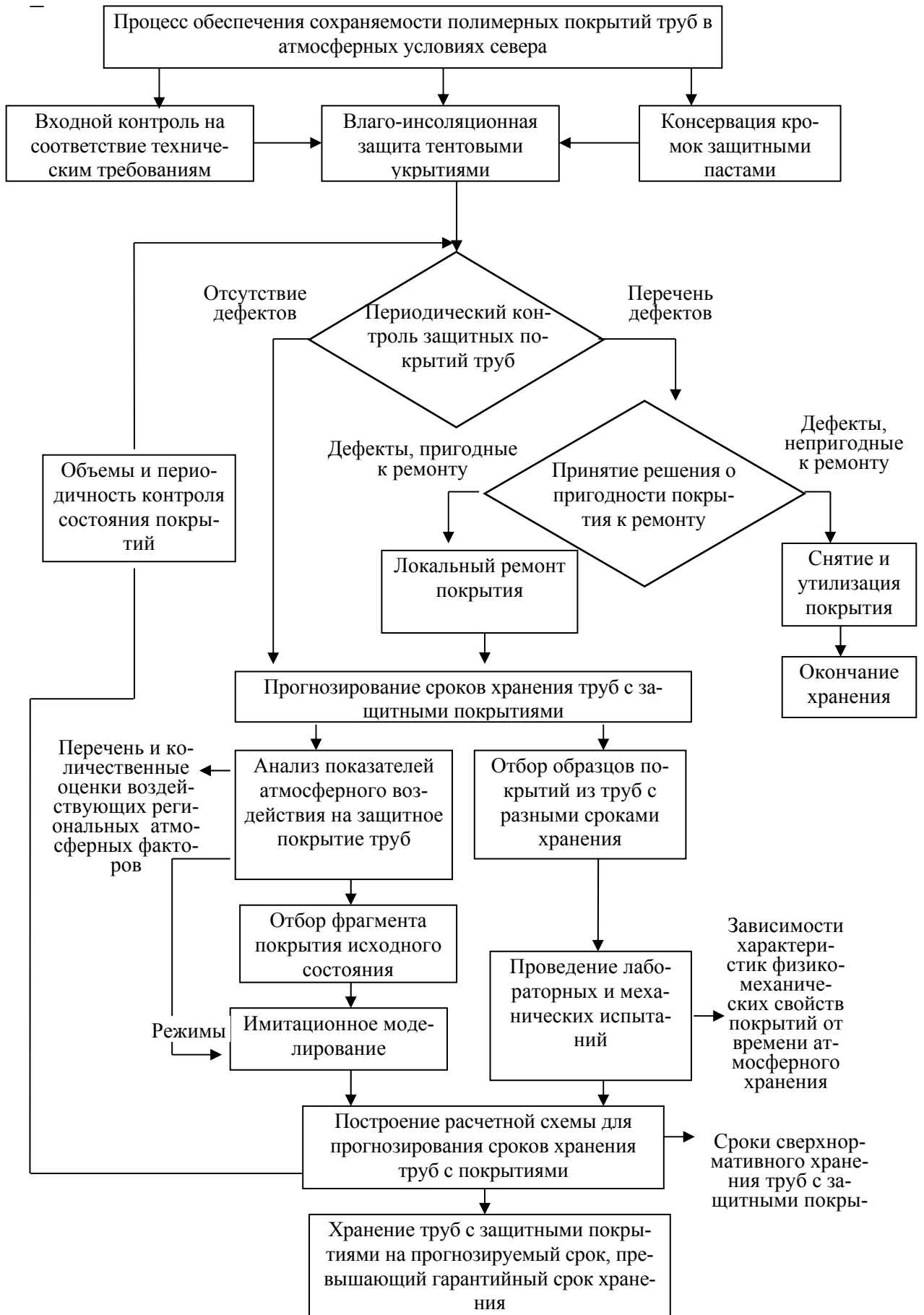


Рисунок 5.7 – Алгоритм организационно-технических мероприятий по обеспечению длительного хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях

ных укрытий и материалов для консервации торцевых кромок защитного покрытия труб перед применением мероприятий согласно настоящему стандарту, осуществляют входной контроль состояния покрытий.

- По результатам входного контроля покрытий хранящихся труб определяют возможность их дальнейшего хранения, которая обусловлена отсутствием в покрытии дефектов и повреждений, не пригодных к ремонту на месте хранения труб.

- Для входного контроля состояния покрытий используют следующие методы неразрушающего контроля:

- а) визуально-измерительный контроль (ВИК) в соответствии с РД-03.606.03;
- б) ультразвуковой метод выявления отслаиваний покрытия в соответствии с СТП 8828-156-99.

- Для труб, закладываемых на хранение в период, не превышающий гарантийного срока хранения труб в атмосферных условиях (24 месяца), для входного контроля применяют осмотр внешней поверхности труб на предмет отсутствия механических дефектов и повреждений.

- Объемы и периодичность контроля защитных покрытий труб назначают в зависимости от величины превышения гарантийного срока хранения труб в атмосферных условиях, величины прогнозируемых изменений состояния защитных покрытий труб.

- Сроки хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях определяют на основе исследований физико-механических свойств покрытий.

- Результатом реализуемых мероприятий является продолжение хранения труб с защитными покрытиями в составе аварийных запасов на прогнозируемый срок, превышающий гарантийный или вывод их из состава аварийного запаса с последующей утилизацией защитного покрытия.

Выводы:

1. Процесс обеспечения сохраняемости полимерных покрытий труб в условиях атмосферных воздействий включает обоснование методик балльных

оценок технического состояния защитных покрытий при первоначальном формировании защитного запаса труб и последующем выводе из его состава на основе алгоритма организационно - технических мероприятий, системная реализация которого направлена на совершенствование методов длительного хранения.

2. Сохраняемость защитных полимерных покрытий труб в условиях длительного хранения определяется агрессивностью влияния атмосферных факторов (температура, фазовые превращения влаги, солнечная инсоляция), методическая взаимосвязь которых позволяет сформулировать системный комплекс рекомендаций по совершенствованию методов оценки сроков сохраняемости покрытий и условий их хранения на открытых площадках.

3. При формировании аварийного запаса труб методический комплекс включает:

- балльную оценку внешнего состояния покрытий по результатам ВИК (микроскопия, линейные измерения, блеск, цвет, волнистость, шероховатость, микротрещинность поверхности);

- оценку состояния кромок защитного покрытия и клеевого слоя на наличие отслаиваний по результатам УЗК (УЗ-дефектоскопия общего назначения и УЗ-импедансная дефектоскопия);

- обследование всей поверхности защитного покрытия на наличие отслаиваний.

4. По результатам реализации этого комплекса составляется перечень выявленных дефектов и повреждений полимерных покрытий, оцениваемый в баллах, что позволяет принять решение: о возможности принятия полимерных покрытий на длительное хранение (сумма баллов <1); о необходимости ремонта или использования мер защиты от атмосферных воздействий (сумма баллов 1...2); о невозможности принятия на длительное хранение (сумма баллов > 2).

5. Периодический контроль включает:

- первичную оценку внешнего состояния в балльной форме; при $\leq 1,3$ балла покрытие признают годным к дальнейшему хранению; при $> 1,3$ балла – решается вопрос о его ремонте или утилизации после вторичной оценки внешнего состояния;

- вторичная оценка также выполняется в балльной форме: при ≤ 20 баллов – защитное покрытие признается пригодным для ремонта: при ≥ 20 баллов – покрытие снимается с хранения и утилизируется.

7. Предложен алгоритм организационно-технических мероприятий по обеспечению длительного хранения защитных покрытий труб в атмосферных условиях северного климата, основные положения которого отражены при разработке стандарта организации (СТО) ООО «Газпром Трансгаз Ухта» «Сроки хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях с использованием средств защитного укрытия», введенного в действие с 01.01.2015 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Совершенствование процессов прогнозирования и обеспечения сохранности защитных полимерных покрытий труб аварийных запасов трубопроводных систем в атмосферных условиях северного климата является актуальной проблемой, поскольку существующие нормативы хранения, принимаемые в соответствии с коммерческой гарантией производителя, не являются научно обоснованными и порождают комплекс технико-организационных затрат в связи с частым и необоснованным обновлением хранящегося запаса.

2. Качество защитных покрытий труб оценивают совокупностью трех прочностных показателей: механическими свойствами, внутренними напряжениями и прочностью адгезии, при этом основными атмосферными факторами, влияющими на ухудшение физико-механических свойств, является температура и инсоляция, инициирующие в присутствии кислорода и влаги возникновение циклических температурно-влажностных напряжений, приводящих к развитию процессов усталости и предельным деформациям.

3. Сформирован комплекс методик для оценки изменения физико-механических свойств полимерных покрытий труб при длительном хранении в условиях северного климата, включающий методики определения твердости, прочности на растяжение, адгезионной прочности и внутренних температурных напряжений при низких атмосферных температурах.

4. Показано, что при низких отрицательных температурах первоисточником деформационного разрушения являются концевые кромки защитных покрытий с очаговым зарождением трещин, последующим их развитием и скачкообразным отслаиванием от поверхности трубы с продольным растрескиванием, что объясняется снижением пластичности полимерного материала, асимметрией сдвиговых деформаций относительно тела трубы и безвозвратной утратой адгезионного контакта.

5. Установлено различие интенсивности изменения физико-механических свойств полимерных покрытий в разных климатических зонах.

6. Адгезионная прочность клеевого контакта в процессе длительного хранения труб с защитными покрытиями характеризуется снижением силы сцепления с интенсивностью, превышающей снижение прочностных характеристик наружного слоя в 4-6 раз, при этом сроки сохраняемости адгезионной прочности из-за значительного разброса измерений можно оценивать лишь по общетрендовым минимальным или средним значениям, которые для умеренно-холодного П₄ климата ориентировочно составляют 15-27 лет, а в умеренном П₅ климате снижаются до 10-20 лет.

7. Механические свойства и работоспособность наружного слоя защитных покрытий труб остаются в рамках первоначальных значений при хранении их в течение 11 лет в условиях умеренно-холодного П₄ климата и претерпевают тенденцию к снижению показателей прочности при 17-летнем хранении в условиях умеренного П₅ климата, но не выходят за пределы допустимых значений; при этом результаты наблюдений не позволяют оценить условия достижения предельного состояния защитных покрытий при низких отрицательных температурах.

8. Оценка этих условий выполнена на основе расчетной деформационной модели, согласно которой сохраняемость наружного слоя покрытия по параметрам механических свойств в условиях умеренно-холодного П₄ и умеренного П₅ климатов ($t_{\min} = -47^{\circ}\text{C}$) обеспечивается низкотемпературной стойкостью используемых полимерных материалов, предельное состояние которых в соответствии с прогнозным расчетом достигается лишь при температуре минус 87°C от продольных температурных напряжений, однако порог их предельных значений во времени снижается из-за старения структуры полимерного материала.

9. Разработана методика и исследована устойчивость защитных покрытий труб к действию атмосферных факторов на основе методических комплексов балльной оценки технического состояния для принятия решения о возможности их допуска к формированию аварийного запаса или необходимости вывода из его состава с последующей утилизацией.

10. Предложена методика прогнозирования предельных сроков сохраняемости полимерных покрытий в условиях северного климата при их регулярном обследовании в процессе сверхнормативного хранения на основе построения зависимостей контролируемых параметров, определение которых выполняется методами неразрушающего контроля для принятия решения о необходимости утилизации или возможности дальнейшего хранения в составе аварийного заноса.

11. Предложен алгоритм реализации организационно-технических мероприятий по совершенствованию методов прогноза и обеспечения длительного хранения защитных покрытий труб в атмосферных условиях северного климата, основные положения которого нашли отражение при разработке стандарта организации (СТО) ООО «Газпром Трансгаз Ухта» «Сроки хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях с использованием средств защитного укрытия», введенного в действие 01.01.2015 года.

Краткие выводы:

1. В результате проведенного анализа установлено отсутствие до настоящего времени системного методического комплекса для оценки технологического состояния полиэтиленовых покрытий труб, что предопределяет необходимость совершенствования методов обеспечения их сохраняемости при длительном хранении в атмосферных условиях северного климата на базе регулярного мониторинга контролируемых параметров до наступления предельного состояния.

2. Предложены методы оценки изменения механических свойств полимерных покрытий под воздействием северных климатических факторов, позволяющие получить закономерности для научного обоснования сроков хранения, кратного превышающих гарантийные обязательства изготовителя.

3. Разработан метод прогнозирования предельно допустимых сроков сохраняемости защитных покрытий труб путем регулярного мониторинга контролируемых параметров и отслеживания выработки ресурса сохраняемости в процессе длительного хранения.

4. Представлен методический комплекс на основе разработанного алгоритма организационно - технических мероприятий, основные положения которого включены в стандарт ООО «Газпром Трансгаз Ухта» «Сроки хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях с использованием средств защитного укрытия» (СТО 74.30-00159025-21-009-2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Агинея Р.В., Петровская М.Н., Саванько Е.А. Ультразвуковой контроль антикоррозионного покрытия трубопровода // Сб. науч. тр.: м-лы науч.-технич. конф., Ухта, 17-20 апр . 2007 г. В 2 ч. Ч. 1 / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 106-110.
- 2 Алешин Н. П. Физические основы акустических методов контроля. - М.: Изд-во. МВТУ, 1986. - 44 с.
- 3 Алешин Н. П., Лупачев В. Г. Ультразвуковая дефектоскопия: Справ. пособие.- Минск: Вышэйш. шк., 1987.- 264 с.
- 4 Амадуни А. Н. Методы и приборы для определения температурных коэффициентов линейного расширения материалов. - М.: Госкомстандарт, 1972. - 139 с.
- 5 Андрианов В.Р. Берман Э.А. Дефектоскоп для контроля сплошности изоляционных покрытий магистральных трубопроводов "Крона-1Р". - М.: МГЦТНИ, 1984.- 78 с.
- 6 Андрианов В.Р., Берман Э.А. Дефектоскоп "Крона-1Р" для контроля сплошности изоляционных покрытий трубопроводов. // Строительство трубопроводов. - 1984. - №1. - С. 25 – 29.
- 7 Андриксон Г. А., Калнрозе З. В., Уржумцев Ю. С. Прогнозирование ползучести полимерных материалов при случайных процессах изменения нагрузок и температурно-влажностных условий окружающей среды. // Механика полимеров. - 1976. - № 4. - С. 616—621.
- 8 Аппен А.А. Температуроустойчивые неорганические покрытия. – Л.: Химия, 1976. - 296 с.
- 9 Багрянский К. В., Добротна З. А., Хренов К. К. Теория сварочных процессов. - М.: Высшая школа, 1976. - 424 с.
- 10 Басин В. Е. Адгезионная прочность. - М.: Химия, 1981. - 208 с.
- 11 Басин В.Е. Адгезионная прочность. – М.: Химия, 1981. – 208 с.

- 12 Белый В. А., Егоренков Н. И., Плескачевский Ю. П. Адгезия полимеров к металлам. - Минск: Наука и техника, 1971. - 286 с.
- 13 Белый В.А., Егоренков Н.И., Плескачевский Ю.П. Адгезия полимеров к металлам. – Минск: Наука и техника, 1971. – 286 с.
- 14 Берштейн М. Л. Прочность стали. Серия «Успех современного металловедения». М.: Металлургия, 1974.
- 15 Борисов Б.И. Защитная способность изоляционных покрытий подземных трубопроводов. – М.: Недра, 1987. - 123 с.
- 16 Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. - М.: Наука, 1973. – 343 с.
- 17 Бурденков Г.А., Булатова Е.Г., Карбань О.В. Дисперсионные кривые моды a_0 в тонких пластинах // Дефектоскопия. - 1991. - №11. - С. 35-38.
- 18 Быков И. Ю., Цхадая Н. Д. Эксплуатационная надежность и работоспособность нефтегазопромысловых и буровых машин / учебное пособие. – М.: ЦентЛитНефтебаз, 2010. – 304 с.
- 19 Быков И.Ю. Техника экологической защиты Крайнего Севера при строительстве скважин. – Л.: Издательство ленинградского университета, 1991, 237 с.
- 20 Воронкова Л.В. Влияние структуры стали на скорость и коэффициент затухания ультразвука // Дефектоскопия. - 1991. - №2. - С.18-47.
- 21 ВРД 39-1.10-031-2001 Нормы аварийного и неснижаемого запаса труб, стальных газовых кранов, материалов, соединительных деталей и монтажных заготовок на газопроводах
- 22 Глаговский Б. А., Московенко И. Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. - Л.: Машиностроение, 1977. - 208 с.
- 23 Глаговский Б.А., Московенко И.Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
- 24 Глазков В. И. Искровой метод контроля сплошности изоляционных покрытий магистральных трубопроводов. - М.: ВНИИСТ, 1960. – 59с.
- 25 Глазков В.И. Искровой метод контроля сплошности изоляционных покрытий магистральных трубопроводов. – М.: ВНИИСТ, 1960. – 59 с.

26 ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. [Текст]. – Введ. 1980-12-01. – М. : Стандартиформ, 1980. – 11 с.

27 ГОСТ 13518-68. Пластмассы. Метод определения стойкости полиэтилена к растрескиванию под напряжением. [Текст]. – Введ. 1969-01-01. – М. : Стандартиформ, 1968. – 5 с.

28 ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. [Текст]. – Введ. 1971-01-01. – М. : Стандартиформ, 1969. – 58 с.

29 ГОСТ 16337-77. Полиэтилен высокого давления. – Введ. 01.01.1979 – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 66 с.

30 ГОСТ 16350-80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. [Текст]. – Введ. 1980-12-17. – М. : Стандартиформ, 1980. – 79 с.

31 ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. [Текст]. – Введ. 1981-12-08. – М. : Стандартиформ, 1981. – 25 с.

32 ГОСТ 16782-92. Пластмассы. Метод определения температуры хрупкости при ударе. [Текст]. – Введ. 1993-07-01. – М. : Стандартиформ, 1992. – 10 с.

33 ГОСТ 16783-71. Пластмассы. Метод определения температуры хрупкости при сдавливании образца, сложенного петлей. [Текст]. – Введ. 1972-01-01. – М. : Стандартиформ, 1971. – 7 с.

34 ГОСТ 24621-91. Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору). [Текст]. – Введ. 1993-01-01. – М. : Стандартиформ, 1991. – 9 с.

35 ГОСТ 24622-91. Пластмассы. Определение твердости. Твердость по Роквеллу. [Текст]. – Введ. 1993-01-01. – М. : Стандартиформ, 1991. – 11 с.

36 ГОСТ 25870-83. Макроклиматические районы земного шара с холодным и умеренным климатом. Районирование и статистические параметры климатиче-

ских факторов для технических целей. [Текст]. – Введ. 1983-07-14. – М. : Стандартиформ, 1983. – 178 с.

37 ГОСТ 26883-86. Внешние воздействующие факторы. Термины и определения. [Текст]. – Введ. 1987-07-01. – М. : Стандартиформ, 1987. – 11 с.

38 ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1989-11-15. – М. : Стандартиформ, 1989. – 19 с.

39 ГОСТ 30630.0.0-99. Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Общие требования. [Текст]. – Введ. 1999-05-28. – Минск. : Стандартиформ, 1999. – 28 с.

40 ГОСТ 427-75. Линейки измерительные металлические. – Введ. 01.01.1976. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 5 с.

41 ГОСТ 4670-91. Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика. [Текст]. – Введ. 1993-01-01. – М. : Стандартиформ, 1991. – 8 с.

42 ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сопоружения подземные. Общие требования к защите от коррозии [Текст]. – Введ. 2005-10-25. – М. : Стандартиформ, 2005. – 68 с.

43 ГОСТ 9.707-81. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. [Текст]. – Введ. 1983-01-01. – М. : Стандартиформ, 1981. – 82 с.

44 ГОСТ 9.708-83. Единая система защиты от коррозии и старения. Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов. [Текст]. – Введ. 1983-12-19. – М. : Стандартиформ, 1983. – 12 с.

45 ГОСТ 9.710-84. Единая система защиты от коррозии и старения. Старение полимерных материалов. Термины и определения. [Текст]. – Введ. 1984-12-18. – М. : Стандартиформ, 1984. – 10 с.

46 ГОСТ 9.716-91. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы определения изменения содержания пластификатора при старении. [Текст]. – Введ. 1992-01-01. – М. : Стандартиформ, 1991. – 22 с.

47 ГОСТ 9550-81. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе. [Текст]. – Введ. 1982-07-01. – М. : Стандартинформ, 1981. – 8 с.

48 ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии [Текст]. – Введ. 1998-04-23. – М. : Стандартинформ, 1998. – 52 с.

49 ГОСТ Р 51368-2011. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры. [Текст]. – Введ. 2012-07-01. – М. : Стандартинформ, 2011. – 21 с.

50 ГОСТ Р 51370-99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытание на воздействие солнечного излучения. [Текст]. – Введ. 1999-10-20. – М. : Стандартинформ, 1999. – 11 с.

51 ГОСТ Р 51909-2002. Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на транспортирование и хранение. [Текст]. – Введ. 2002-07-04. – М. : Стандартинформ, 2002. – 12 с.

52 ГОСТ Р 51910-2002. Методика исследования и проверки ускоренными методами влияния внешних воздействующих факторов на долговечность и сохранность технических изделий. Разработка и построение. [Текст]. – Введ. 2002-07-04. – М. : Стандартинформ, 2002. – 24 с.

53 ГОСТ Р 52079-2003. Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. ТУ. – Введ. 01.01.2004. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 28 с.

54 ГОСТ Р 52568-2006. Трубы стальные с защитными наружными покрытиями для магистральных газонефтепроводов. ТУ. – Введ. 01.01.2007 – М.: ФГУП Стандартинформ, 2006. – 24 с.

55 ГОСТ Р 52568-2006. Трубы стальные с защитными наружными покрытиями для магистральных газонефтепроводов. Технические условия. [Текст]. – Введ. 2006-09-20. – М. : Стандартинформ, 2006. – 20 с.

56 ГОСТ Р 52568-2006. Трубы стальные с защитными покрытиями для магистральных газонефтепроводов. Технические условия. [Текст]. – Введ. 2006-09-20. – М. : Стандартинформ, 2006. – 23 с.

57 Гриценко А.И., Харионовский В.В. Особенности сооружения трубопроводов в северных условиях // Строительство трубопроводов. - 1993. - №10-11. - С.21-22.

58 Гуревич С.Ю., Дадьцев В.Г., Каунов А.Д. Температурные зависимости скорости распространения продольных ультразвуковых волн в сталях.// Дефектоскопия. – 1985. - №10. - С. 46-49.

59 Детектирование отслоений защитных покрытий трубопроводов/ Трубопроводный транспорт нефти. -1996, № 2 - с. 37-39.

60 Дефектоскоп акустический. Руководство по эксплуатации. – г. Москва: ЗАО «Научно-исследовательский институт интроскопии», МНПО «Спектр». – 2001. – 47 с.

61 Дефектоскоп УД2-12(2.1). Руководство по эксплуатации. - Кишинев: НПО «Волна», 1992. – 95с.

62 Джон Р.С. НТЛР – новая система защиты от коррозии сварных соединений и трубопроводов на трассе, совместимая с трехслойным заводским полиэтиленовым покрытием (рекламный проспект). – Бельгия: Raychem Corporation, 1985. – 12с.

63 Дубровский М.В., Ежиков А.В., Асорей Раиль И.Х. Современные термоустойчивающиеся материалы // Нефтегаз. – 2005. – № 2. – С. 78-82.

64 Ермолов И.Н. Методики измерения затухания ультразвука: Обзор // Заводская лаборатория. - 1992. - №6. - С.26-30.

65 Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. - М.: Машиностроение, 1981. - 240 с.

- 66 Зайцев К.И., Шмелева И.А. Справочник по сварочно-монтажным работам при строительстве трубопроводов. - М.: Недра, 1982. – 354 с.
- 67 Захаров Н. Дело – труба. – Ж. «БОСС: Бизнес: Организация, Стратегия, Системы», № 1/2016. URL: <http://www.bossmag.ru/>
- 68 Зацепин И.И. Неразрушающий контроль. - Минск: Наука и техника, 1979. - 192 с.
- 69 Защита от коррозии, старения, биоповреждений машин, оборудования, сооружений: Справочник/ Под. ред. А. А. Герасименко. - Т. 1, 2. -М.: Машиностроение, 1987.
- 70 Защита трубопроводов от коррозии с использованием современных изоляционных покрытий / компания ЗАО «Анкорт». – URL www.ankort.ru/story.zphp
- 71 Зимон А. Д. Адгезия пленок и покрытий.- М.: Изд. «Химия», 1977. – 352 с.
- 72 Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика. М.: Высшая школа, 247с.
- 73 Исакович М. А. Общая акустика. - М.: Наука, 1973. – 573с.
- 74 Карякина М.И. Физико-химические основы процессов формирования и старения покрытий. – М.: Химия, 1980.
- 75 Карякина М.И. Физико-химические основы процессов формирования и старения покрытий. -М.: Химия, 1980.
- 76 Конелли Г., Желлар Г. Трехслойные трубопроводные покрытия для повышенных температур эксплуатации // Нефть, газ и нефтехимия. – 1990. – № 3. – С. 66-71 с.
- 77 Конелли Г., Желлар Г. Трехслойные трубопроводные покрытия для повышенных температур эксплуатации // Нефть, газ и нефтехимия. - 1990. - №3. - С. 66-71.
- 78 Королев М. В., Карпельсон А. Е. Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. - М.: Машиностроение, 1982. - 157 с.

- 79 Кудашев Ш.Р. Опыт применения изоляционных термоусаживающихся материалов корпорации Raychem // Строительство трубопроводов. - 1996. - №1. - С. 5-7.
- 80 Лепендин Л.Ф. Акустика. – М.: Машиностроение, 1979. – 226 с.
- 81 Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85. - М., 1985. – 52с.
- 82 Магистральные трубопроводы: СНиП III-42-80. - М.,1997. – 74с.
- 83 Мазона У. Физическая акустика. - М.: Мир, 1966. - 592с.
- 84 Максимов Р. Д., Соколов Е. А., Мочалов В. П. Влияние температуры и влажности на ползучесть полимерных материалов // Механика полимеров. – 1975. - № 6. - С. 976—982.
- 85 Методы неразрушающих испытаний. Пер. с англ. / под ред. Р. Шарпа. – М.: Мир, 1972. – 596 с.
- 86 Методы неразрушающих испытаний. Пер. с англ. / Под ред. Р. Шарпа. - М.: Мир, 1972. - 596 с.
- 87 Нейман М.Б. Старение и стабилизация полимеров. – М.: Наука, 1964. – 330 с.
- 88 Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. Клюева В.В. – М.: Машиностроение, 1995. – 488с.
- 89 Неразрушающий контроль металлов и изделия: Справочник / Под ред. Г.С. Самойловича. - М.: Машиностроение, 1976.-436 с.
- 90 Новые методы испытаний для оценки покрытий трубопроводов // Экспресс-информация Зарубежный опыт. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1995. – № 2. – С. 8-16.
- 91 Новые методы испытаний для оценки покрытий трубопроводов. // Экспресс информ. Зарубежный опыт. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. - 1995. - №2. - С. 8-16.
- 92 Пат. №2174641. Способ предохранения антикоррозионного покрытия при строительстве трубопроводов./ Шарыгин Ю.М., Теплинский Ю.А., Алиев Т.Т. (РФ) – 99125864. Заявлено 08.12.1999г. Приоритет от 08.12.1999г.

- 93 Перепечко И. И. Свойства полимеров при низких температурах. - М.: Химия, 1977. - 372 с.
- 94 Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1975, С.21 – 76.
- 95 Походня И.К., Шейнкин М.З., Шлепаков В.Н. Дуговая сварка неповоротных стыков магистральных трубопроводов. - М.: Недра, 1987. – 254 с.
- 96 Протасов В.Н. Полимерные покрытия в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1985. – 133 с.
- 97 Протасов В.Н. Полимерные покрытия в нефтяной промышленности. -М.: Недра, 1985.
- 98 Протасов В.Н. Полимерные покрытия нефтепромыслового оборудования: Справочное пособие. -М.: Недра, 1994, 219 с.
- 99 Ромейко В.С., Баталов В.Г., Готовцев В.И. Защита трубопроводов от коррозии. – М.: ВНИИМП, 1998. - 208 с.
- 100 Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. - М.: Машгиз, 1954. - 296 с.
- 101 Санжаровский А.Т. Методы определения механических и адгезионных свойств полимерных покрытий. – М.: Наука, 1974. – 274 с.
- 102 Санжаровский А.Т. Методы определения механических и адгезионных свойств полимерных покрытий. – М.: Наука, 1974. – 274 с.
- 103 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.
- 104 Сборник методик выполнения испытаний (измерений) при производстве наружного антикоррозионного полиэтиленового покрытия труб / Сост. А.И.Гриценко, В.К. Скубин– М.: ВНИИГАЗ, 1995. - 61с.
- 105 Синяговский И.С. Сопротивление материалов. – М.: Машгиз, 1974. – 638 с.

106Скудра А. М., Кирулис Б. А. Критерий адгезионной прочности при воздействии нормальных и касательных напряжений // Механика полимеров. – 1974. - №2. - С. 246—251.

107Скудра А.М., Кирулис Б.А. Критерий адгезионной прочности при воздействии нормальных и касательных напряжений // Механика полимеров. – 1974. – № 2. – С. 246 – 251.

108Скучек Е. Основы акустики. - М.: Наука, 1976. – 398 с.

109Справочник по пластическим массам / Под ред. В. М. Катаева. - М.: Химия, 1975. - 443 с.

110Стальные трубы с полимерным покрытием / компания ООО «Антикор-Полимер». – URL: www.antikorpolimer.ru/uslugi-page.htm.

111СТО Газпром 2-2.3-130-2007 «Технические требования к наружным антикоррозионным полиэтиленовым покрытиям труб заводского нанесения для строительства, реконструкции и капитального ремонта подземных и морских газопроводов с температурой эксплуатации до +80 °С»

112СТО Газпром 2-2.3-130-2007. Технические требования к наружным антикоррозионным полиэтиленовым покрытиям труб заводского нанесения для строительства, реконструкции и капитального ремонта подземных и морских газопроводов с температурой эксплуатации до +80 °С. – Введ.21.01.2008 – М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2007 – 18 с.

113СТО Газпром 2-3.5-454-2010 Правила эксплуатации магистральных газопроводов

114СТО Газпром РД 39-1.10-089-2004 Нормативы оснащения линейно-эксплуатационных служб (ЛЭС) и аварийно-восстановительных поездов (АВП) автомобильной, дорожно-строительной и специальной техникой для выполнения работ по техническому обслуживанию и аварийно-восстановительному ремонту магистральных газопроводов и продуктопроводов

115СТП 8828-156-99 Методика ультразвукового контроля качества нанесения заводского антикоррозионного покрытия на газопроводы диаметром 1020-1420 мм.

116 Стрижевский И.В., Зиневич А.М., Никольский К.К. Защита металлических сооружений от подземной коррозии. – М.: Недра, 1981. – 293 с.

117 Теплинский Ю. А., Быков И. Ю. Стойкость антикоррозионных покрытий труб в условиях Крайнего Севера. – СПб.: ООО «Инфо-да», 2004. – 296 с.

118 Теплинский Ю. А., Быков И.Ю. Стойкость антикоррозионных покрытий труб в условиях Крайнего Севера. – СПб.: ООО «Инфо-да». – 2004. – 296 с.

119 Теплинский Ю.А. Разработка метода акустического контроля и способов повышения работоспособности заводского антикоррозионного покрытия труб нефтегазового сортамента; Дисс... канд. тех. наук. – Ухта, 2002 – 203 с.

120 Теплинский Ю.А., Кузьбожев А.С., Воронин В.Н., Алиев Т.Т. Повышение надежности магистральных газопроводов на стадии нового строительства: Тез. докл. Межрегион. науч.-техн. конф. Проблемы добычи, подготовки и транспорта нефти и газа. – Ухта: УГТУ, 2000. – 64 с.

121 Теплинский Ю.А., Кузьбожев А.С., Попов В.А. Способ контроля качественных параметров полиэтиленового покрытия газопроводных труб большого диаметра. // Диагностика 99. Девятая Международная деловая встреча. – М.: ИРЦ Газпром, 1999. – С. 176-183.

122 Теплинский Ю.А., Шарыгин Ю.М., Алиев Т.Т. Особенности поведения заводского антикоррозионного полиэтиленового покрытия стальных труб // Повышение эффективности разработки и эксплуатации газоконденсатных месторождений. Решение проблем в транспорте газа: тез.– Ухта: Север-нипигаз, 1998. – С. 36-49.

123 Теплинский Ю.А., Шарыгин Ю.М., Алиев Т.Т. Особенности поведения заводского антикоррозионного полиэтиленового покрытия стальных труб // Сб. Повышение эффективности разработки и эксплуатации газоконденсатных месторождений. Решение проблем в транспорте газа: Тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. - Ухта: Севернипигаз, 1998. - С.36-49.

124 Тобольский А.С. Свойства и структура полимеров. - М.: Химия, 1964. - 322 с.

125 Трубные термоусаживающиеся муфты с высокотемпературной мастикой. Требования по антикоррозионной защите сварных стыков на трассе: Спецификация RT 1912. – Введ. 1.07.1987. – Бельгия, 1987. – 75 с.

126 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии: ГОСТ Р 51164-98. – М., 1998. - 41с.

127 Трубы ВУС / компания ООО «Гермес». – URL : www.company-germes.ru/izoljaciya_truboprovodov._vus._tip-

128 Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов: ГОСТ 20295-85.– М., 1986. – 15 с.

129 Трубы стальные электросварные прямошовные диаметром 1220 и 1420 мм с наружным полиэтиленовым антикоррозионным покрытием: ТУ-14-3-1954-94. – М., 1994. – 60 с.

130 ТУ-14-3-1954-94. Трубы стальные электросварные прямошовные диаметром 1220 и 1420 мм с наружным полиэтиленовым антикоррозионным покрытием. – М., 1994. – 60 с.

131 Тюлин В. Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука. - М.: Наука, 1976. - 254 с.

132 Ультразвуковой дефектоскоп с цифровым формирователем изображения дефектов SM1 SONO-CHECKER // Дефектоскопия. - 1993. - №7. - С.95-96.

133 Ультразвуковой дефектоскоп УД-2-12 в вопросах и ответах // Дефектоскопия. - 1992. - №3 - С. 94-95.

134 Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля: справочник / Под ред. И.Н. Ермолова. – М.: Машиностроение, 1986. – 277 с.

135 Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля: Справочник / Под ред. И. Н. Ермолова. - М.: Машиностроение, 1986. - 277 с.

136 ФЗ № 116-ФЗ О промышленной безопасности опасных производственных объектах [Текст]. – Введ. 1997-06-20. – М. : Стандартинформ, 1997. – 26 с.

- 137 Филатов И. С. Климатическая устойчивость полимерных материалов / Якутск, СО АН СССР. – М.: Наука, 1983. – 216 с.
- 138 Хрулев В. М. Клеи и пластики. - М.: Высшая школа, 1970. - 368 с.
- 139 Чернов Л. А. Волны в случайных неоднородных средах. - М.: Машиностроение, 1975. – 568 с.
- 140 Чухно А. А. К методике определения температурных напряжений в много-слойных пластинах при экспонировании // Сб. Атмосферостойкость и механические свойства полимеров при низких температурах. - Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1975. - С. 35-40.
- 141 Шкулов С.А., Крамарова Н.А. Определение антикоррозионных свойств битумного покрытия «ТРАНСКОР-ГАЗ» импедансным методом // Севергеоэкотех-2007: м-лы VIII Международ. молодёж. конф. (21-23 марта 2007 г., Ухта). В 3 ч. Ч. 2. – М.: УГТУ, 2007. – С. 191-194.
- 142 Шмелева И.А., Шейнкин М.З., Михайлов И.В. Дуговая сварка стальных трубных конструкций. - М.: Машиностроение, 1986. – 295 с.
- 143 Brockman W. Adhesion aspects of polymer coatings // Ed. K. Mittal. - Plenum Press, - 1983. - № 4. - P. 131—146.
- 144 Covering (Coating) of Steel Pipes and Section with Thermo Plastic Coating with Epoxy Resin Powder or Polyurethane Tar: DIN 3671.
- 145 Gaillard G. and Connelly G. Three-Layer Epoxy-Polyolefin Pipe Coatings // National Association of corrosion Engineers: Corrosion 88 Conference. - NACE Publications. Dept., Houston, Texas, 1988. - 309 p.
- 146 Gaillard G. and Connelly G. Three-Layer Polyolefin Pipe Coatings// Proc. 7th International Conference on the Internal and External Protection of Pipes.- Cracfield UK, BHRA, The Fluid Engineering Centre, 1987. - P. 41—46.
- 147 Nielsen L. Mechanical properties of polymers. - N. Y.: Beinhold, L. Chapman and Hall, 1962. - 274 p.
- 148 Polyethylene Coated Steel Pipes: JIS G3469.

149 Qualification test report of external polyethylene coating on saw pipe for gaskomplektimpex // Proc. Sumitomo Metal industries Ltd. Kashima Steel works. - 1994. - P.34-48.

150 The properties of newly developed polyethylene coating for large diameter line pipe // Proc. Sumitomo Metal industries Ltd. Kashima Steel works. - 1994. - P.75-87.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Стандарты ООО «Газпром трансгаз Ухта». Сроки хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях с использованием средств защитного укрытия. СТО 2014, Ухта / Титульный лист, предисловие, содержание, введение со списком разработчиков.

Приложение А
(обязательное)

620.193/197

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ГАЗПРОМ»

(ОАО «ГАЗПРОМ»)

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ УХТА»

(ООО «Газпром трансгаз Ухта»)

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СТАНДАРТЫ ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ УХТА»

**СРОКИ ХРАНЕНИЯ ТРУБ С ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ В АТМО-
СФЕРНЫХ УСЛОВИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ЗАЩИТНОГО
УКРЫТИЯ**

СТО 74.30-00159025-21-009-2014

ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ УХТА» ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА № <u>153</u>

Ухта 2014

Продолжение 1 Приложения А

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН	Филиалом ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта с участием специалистов ООО «Газпром трансгаз Ухта»
2 ВНЕСЕН	Производственным отделом защиты от коррозии ООО «Газпром трансгаз Ухта»
3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ	Приказом генерального директора ООО «Газпром трансгаз Ухта» от <u>«26» 01. 2015 г. № 49</u>
4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ	
5 СРОК ДЕЙСТВИЯ	5 лет

Распространение настоящего стандарта осуществляется в соответствии с действующим законодательством и с соблюдением правил, установленных ООО «Газпром трансгаз Ухта»

Продолжение 2 Приложения А

Стандарт ООО «Газпром трансгаз Ухта»

Содержание

1	Область применения.....	1
2	Нормативные ссылки.....	1
3	Термины и определения.....	3
4	Обозначения и сокращения.....	4
5	Организация процесса хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях.....	5
6	Порядок периодического контроля состояния защитных покрытий труб сверхнормативного хранения	7
7	Прогнозирование сроков сверхнормативного хранения труб с защитными покрытиями	9
8	Требования к защитным укрытиям труб	14
	Приложение А (справочное) Градация состояния защитного покрытия труб по характеристикам поверхностных трещин	15
	Приложение Б (справочное) Градация состояния клеевого слоя покрытия, выступающего на торцевую кромку покрытия	17
	Приложение В (справочное) Стандартная форма ВИК защитного покрытия труб	19
	Приложение Г (рекомендуемое) Контроль состояния поверхности защитного покрытия труб	20
	Приложение Д (рекомендуемое) Имитационное моделирование изменения свойств защитных покрытий при атмосферном хранении	22
	Приложение Е (рекомендуемое) Оценка состояния материала защитного покрытия труб методом инфракрасной спектроскопии.....	24
	Приложение Ж (рекомендуемое) Оценка состояния материала защитного покрытия труб по параметрам ультразвукового метода.....	26
	Приложение И (справочное) Прогнозирование допустимого срока хранения труб с защитными покрытиями по результатам натуральных испытаний.....	29
	Приложение К (справочное) Организация хранения труб в штабелях с использованием защитных укрытий.....	32
	Библиография.....	34

Продолжение 3 Приложения А

Стандарт ООО «Газпром трансгаз Ухта»

Введение

Настоящий стандарт разработан с целью обеспечения сохранности защитных покрытий труб при хранении в атмосферных условиях за счет установления сроков и порядка их сверхнормативного хранения.

Стандарт разработан в соответствии с Перечнем приоритетных научно-технических проблем ОАО «Газпром» на 2011 – 2020 гг., утвержденным Председателем Правления ОАО «Газпром» А. Б. Миллером (№ 01-114 от 14.10.2011 г.) и Программой научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ОАО «Газпром» на 2013 г., утвержденной Председателем Правления ОАО «Газпром» А. Б. Миллером (№01-174 от 09.04.2013).

Разработка стандарта проводилась по договору с ООО «Газпром трансгаз Ухта» № 06-750 от 19.08.2013 «Обоснование сроков хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях с использованием средств защитного укрытия».

Настоящий стандарт разработан авторским коллективом в составе: А. С. Кузьбожев, И. В. Шишкин, С. А. Шкулов, И. Н. Бирилло, В. А. Авдеев (филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта), С. М. Колтаков, А. А. Ивонин, И. А. Меркурьева, А. Л. Пак (ООО «Газпром трансгаз Ухта»), И. Ю. Быков, М. М. Бердник (Ухтинский государственный технический университет).