

Федеральное государственное бюджетное
учреждение высшего образования
«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.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта -2018

Диссертация выполнена на кафедре «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов» ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет».

Научный руководитель

Быков Игорь Юрьевич, доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник Республики Коми.

Официальные оппоненты

Спиридович Евгений Апполинариевич, советник генерального директора АО «Гипрогазцентр» по промбезопасности, доктор технических наук, старший научный сотрудник.

Козлов Дмитрий Игоревич, ведущий инженер отдела «Надежность и ресурс Северного коридора газотранспортной системы», кандидат технических наук.

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ), г. Уфа.

Защита состоится «22» июня 2018 года в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 при Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», а также на сайте вуза по адресу www.ugtu.net в разделе «Наука→Диссертации».

Автореферат разослан «19» мая 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Д. А. Борейко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

3. Предложено математическое выражение
$$F_{отр}^* = \frac{F_{отр} [\Delta L + L(1 - \cos \alpha)]}{L \cdot b} - 1,67 \cdot k_p \cdot a \cdot b \cdot \Delta L \cdot e^{-0,5t} \left. \vphantom{F_{отр}^*} \right\} \frac{b}{(1 - \cos \alpha)}$$
 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 деградиционных 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 нефтепромышленной 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.

Основное содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и цель диссертационной работы.

В первой главе проанализирован опыт реализации существующих процессов обеспечения сохранности и оценки деградации полимерных покрытий труб при атмосферном хранении. В исследование этой проблемы внесли вклад такие ученые и специалисты, как И. Н. Андронов, Р. В. Агиней, В. Е. Басин, И. Н. Бирилло, Б. В. Будзуляк, И. Ю. Быков, В. А. Динков, Ю. В. Илатовский, А. С. Кузьбожев, В. Н. Протасов, А. Т. Санжаровский, Ю. А. Теплинский, В. В. Харионовский, А. М. Шарыгин, В. М. Шарыгин, W. Brokman, G. Gaillard, L. Nielsen и др.

Применительно к полимерным защитным покрытиям сохранность представляет свойство сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность выполнять антикоррозионные функции в течение и после хранения труб в составе аварийных запасов.

Эти свойства в соответствии с ГОСТ Р 31448-2012 регламентируются конкретной номенклатурой параметров (толщина, адгезия к стали, прочность при разрыве, относительное удлинение и др.), а неизменность этих параметров в течение заданного времени служит показателем надежности защитных покрытий в процессе хранения.

Оценка изменения физико-механических параметров полимерных материалов под действием климатических факторов регламентируется нормативными документами и использует методы параллельного проведения испытаний в лабораторных и атмосферных условиях, при этом изучаются изменение механических свойств и структуры материалов под воздействием температур, кислорода, влаги и солнечной радиации. Эти испытания основаны на использовании стандартных методик, позволяющих измерять прочностные свойства, твердость, силу адгезии полимерных покрытий. Обоснование комплекса таких методик является одной из задач диссертационной работы.

Свойство сохраняемости защитных покрытий оценивают исходя из анализа прочностных показателей: характеристик механических свойств, величины внутренних напряжений и прочности сцепления (адгезии) покрытия с металлом труб. От того, в какой пропорции находятся эти показатели, зависит эксплуатационное поведение защитного покрытия. Процессы изменения этих пропорций, связанные с макромолекулярными и физико-химическими превращениями, являются деградационными, формируются латентно (скрытно) или практически мгновенно, но закономерности их развития изучены пока в недостаточной мере. Изучение изменения этих закономерностей является исходной задачей диссертационного исследования, обуславливающей возможность увеличения установленных сроков хранения,кратно превышающих гарантийные обязательства изготовителя.

Существующие нормативные документы не содержат методик по оценке предельных сроков сохраняемости полимерных покрытий в процессе их длительного хранения в атмосферных условиях северного климата. Между тем, существуют значительные резервные запасы труб с полиэтиленовыми покрытиями заводского изготовления, сроки хранения которых установлены экспертно и не имеют научного обоснования. Совершенствование методов обеспечения сроков сохраняемости полимерных покрытий является основной задачей диссертационного исследования.

Существующие подходы к обеспечению сохраняемости полимерных покрытий направлены на выбор их наиболее эффективных конструкций, подбор качества материалов, совершенствование технологии нанесения полимеров на поверхность трубы.

Однако до настоящего времени остаются несистематизированными возможности оценки технологического состояния покрытий при их длительном хранении в атмосферных условиях северного климата. Исходя из анализа, такая оценка может базироваться на системном мониторинге контролируемых параметров до наступления их предельного состояния. Разработка нормативного документа, регламентирующего порядок обоснования сроков хранения

защитных покрытий труб в атмосферных условиях северного климата является окончательной задачей диссертационной работы.

Во второй главе представлен комплекс методик для оценки изменения механических свойств полимерных покрытий труб при длительном хранении в условиях северного климата, включающий методики испытаний на растяжение, твердость, прочность адгезии и внутренние напряжения тепловой природы.

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.

Для исследования твердости эластичных материалов (резины, пластмассы) используют методы вдавливания стальных сфер по ГОСТ4670-91 (метод Бринелля). Твердость по Бринеллю (НВ) – определяется как отношение нагрузки F на сферический индентор (шарик) к площади поверхности его отпечатка $S_{от}$ на испытуемом материале ($HV=F/S_{от}$).

Методика определения прочности адгезии регламентируется ГОСТ Р 411-77. Метод заключается в определении усилия F отслаивания полосы шириной b (10-40мм) от поверхности трубы и расчете величины адгезии A как отношения измеренных показателей: $A=F/b$.

В третьей главе рассмотрен процесс оценки деградиационных изменений механических свойств полимерных покрытий в условиях северного климата.

Влияние низких температур на изменение механических свойств защитных полимерных покрытий с 4-х, 7-ми и 11-летним сроками хранения труб на открытых площадках в условиях умеренного климата (II_5) оценивалось методом лабораторных испытаний контрольных образцов на растяжение и разрыв в соответствии с ГОСТ 11262-80 (рисунок 1) и отличаются стабильностью прочностных показателей в рассматриваемом промежутке времени, превышая предельно допустимые значения, регламентированные ГОСТ 31448-2012.

Полученные кривые деформации испытанных образцов экструзионного полимерного покрытия по виду отличаются от кривых 1-го типа, регламентированных ГОСТ 11262-80 для пластмасс, и имеют два выпуклых экстремума, соответствующие пределу текучести при растяжении $\sigma_{рт}$ и показателю прочности при разрыве $\sigma_{рр}$, при этом показатели пластичности $\sigma_{рт}$ превышают значения показателей прочности на разрыв $\sigma_{рр}$ (рисунок 1, а). Из этого рисунка видно также, что 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).

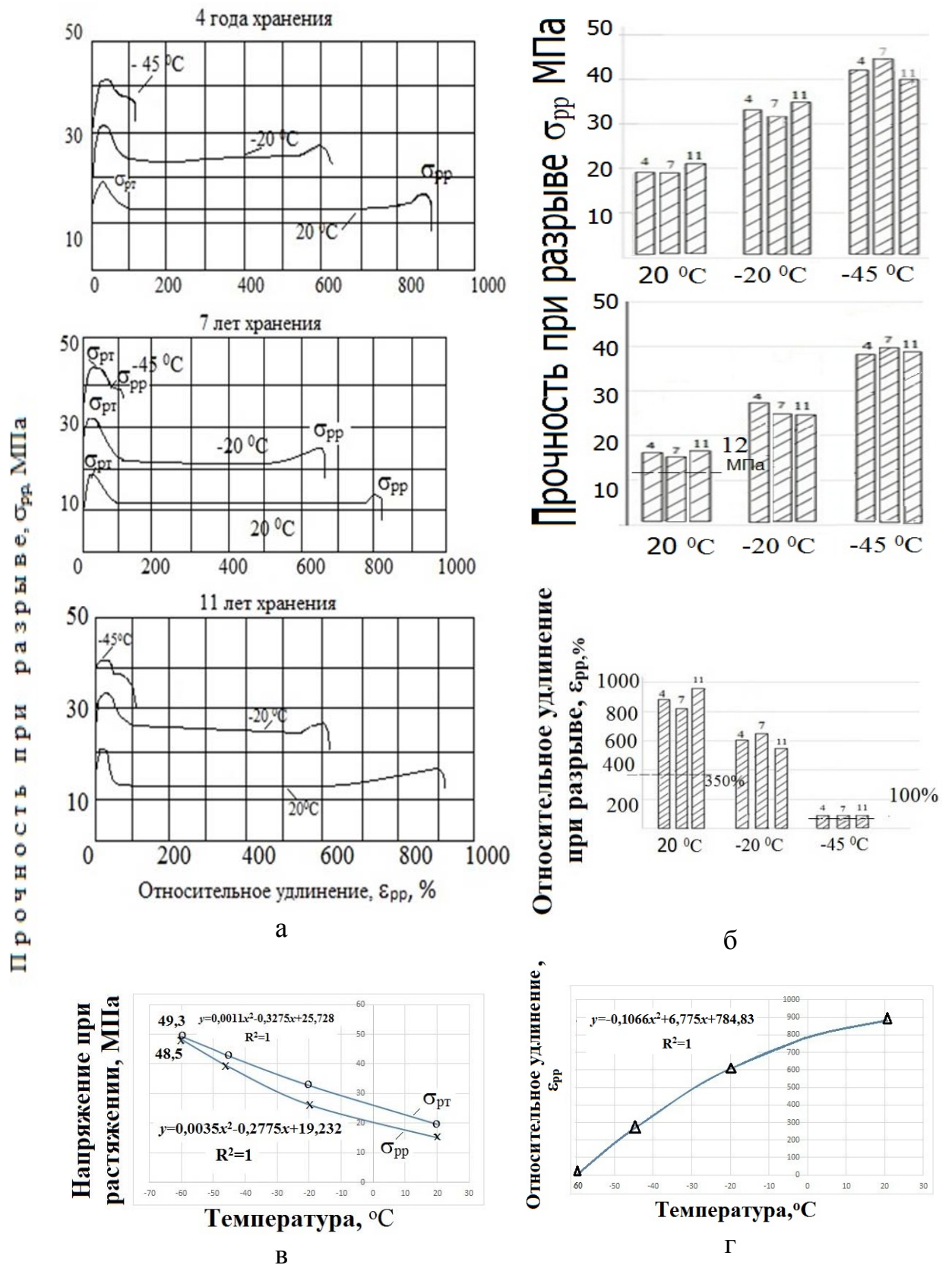


Рисунок 1. Влияние низких температур на изменение механических свойств защитных покрытий

На основе удовлетворительной однородности полученных результатов лабораторных испытаний (8-10% для $\sigma_{рт}$ и σ_{pp} ; 12-13% для показателя ϵ_{pp})

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 П₅ (рисунок 1, б).

При этом абсолютные значения параметра относительного удлинения ε при снижении температуры от +20 °С до -45 °С закономерно снижаются, а параметры $\sigma_{рт}$ и $\sigma_{пр}$ возрастают. Это хорошо демонстрируется обобщенным графиком динамики напряжений в функции отрицательных температур (рисунок 1, в). По характеру этого графика можно заключить, что полимерное защитное покрытие труб остается работоспособным в исследованном промежутке времени и при температурах до -45 °С с прогнозным пределом охрупчивания при -60 °С (рисунок 1, г).

Результаты оценки деградационных изменений защитных покрытий под воздействием северных климатических факторов в условиях умеренно-холодного П₄ и умеренного П₅ климатов представлены на рисунке 2.

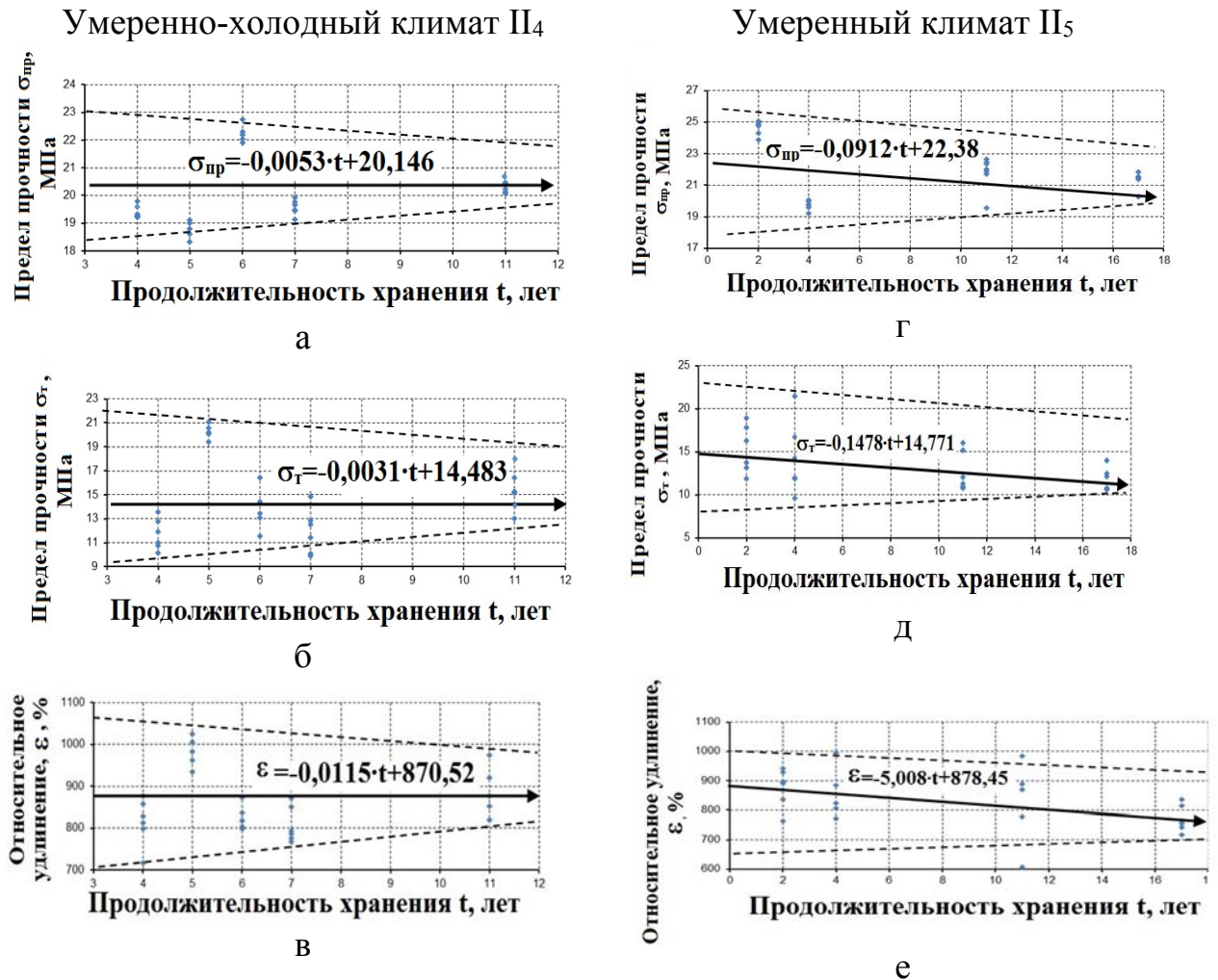


Рисунок 2. Сохраняемость механических свойств защитных покрытий во времени хранения в различных климатических зонах

Из-за разброса измеряемых значений сохраняемость механических свойств оценивается общетрендовыми тенденциями по средним значениям.

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 свидетельствует о латентном развитии деградиационных процессов в их структуре.

При этом механические показатели не выходят за пределы допустимых значений в наблюдаемом промежутке времени (до 17 лет) и превышают их по пределу прочности на растяжение в 1,37 раза, причём характер латентного ухудшения механических свойств интенсивнее в той климатической зоне (II₅), где больше показатель инсоляции. Однако оценить срок предельной сохраняемости защитных покрытий по результатам выполненных исследований невозможно.

Прогноз деградации адгезионной прочности клеевого слоя покрытий выполняется на основе рекомендаций А. Д. Зимона с учетом различия температур при отборе образцов на площадках хранения и последующих механических испытаний в лабораторных условиях. Для этой цели разработана математическая модель, учитывающая влияние температурного фактора при определении истинной работы разрушения (рисунок 3).

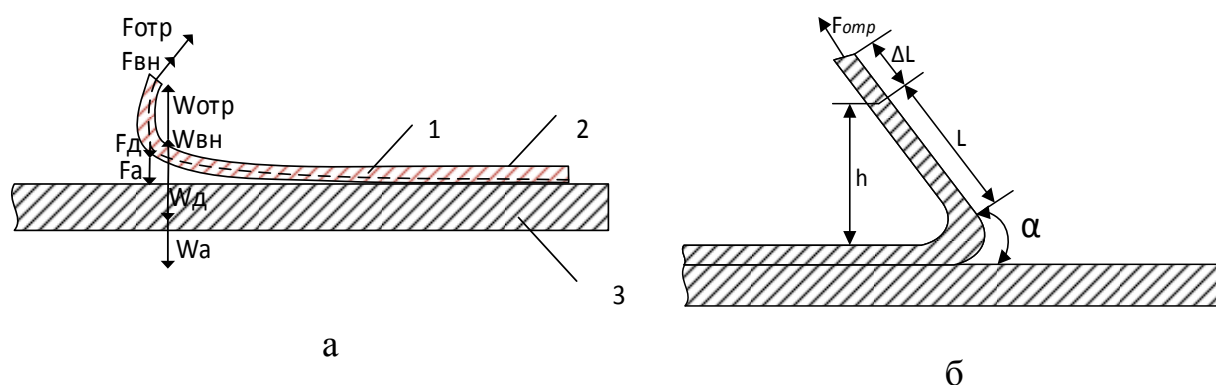


Рисунок 3. Расчетная модель

Как видно из рисунка 3, а работа отрыва $W_{отр}$ полосы составит:

$$W_{отр} = W_a + W_d - W_{вн}, \quad (2)$$

где W_a – работа разрушения клеевого слоя; W_d – работа деформирования полосы при отрыве; $W_{вн}$ – работа на преодоление внутренних напряжений в полосе отрыва.

С другой стороны, из рисунка 3, б следует, что полная работа $W_{отр}^n$ отрыва полосы площадью $L \cdot b$ под действием усилия $F_{омп}$ с учетом удлинения на величину ΔL при перемещении на расстояние h , составит:

$$W_{отр}^n = F_{омп} \cdot h, \quad (3)$$

$$\text{где:} \quad h = L + \Delta L - x; \quad x = L \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

Тогда окончательно с учетом удлинения:

$$W_{omp}^n = F_{отр} [\Delta L + L(1 - \cos \alpha)] \quad (5)$$

Без учета удлинения ($\Delta L = 0$) при усилнии отрыва F_{omp}^n на длину полосы L , полная работа W_{omp}^{n*} отслаивания составит:

$$W_{omp}^{n*} = F_{omp}^* (1 - \cos \alpha) L \quad (6)$$

Работа деформации отслаиваемой полосы определится как:

$$W_{\delta} = a \cdot b \cdot L \cdot W_{y\delta i} \quad (7)$$

где $W_{y\delta i}$ – удельная работа деформации определяемая экспериментально (рисунок 5,а) и для всех типов исследованных покрытий с 2000 по 2012 год составившая:

$$W_{y\delta i} = 0,0135 \frac{\Delta L}{L} = k_p \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (8)$$

Влияние температуры t на изменение удельной работы деформации определилось из деформационных кривых И.С. Филатова для полимерных материалов (рисунок 4, б). При этом коэффициент температурного влияния получил вид (рисунок 4, в):

$$k_t = 0,6 \cdot e^{0,5t} \quad (9)$$

В этом случае:

$$W_{y\delta i(t)} = \frac{k_p}{k_t} \cdot \frac{\Delta L}{L} = \frac{k_p \cdot \Delta L}{0,6 \cdot e^{0,5t} \cdot L} = 1,67 k_p \frac{\Delta L}{L} \cdot e^{-0,5t} \quad (10)$$

Тогда из (7) работа деформации отслаиваемой полосы при её отрыве с учетом коэффициента температурного влияния составит:

$$W_{\delta}^* = 1,67 \cdot k_p \cdot a \cdot b \cdot \Delta L \cdot e^{-0,5t} \quad (11)$$

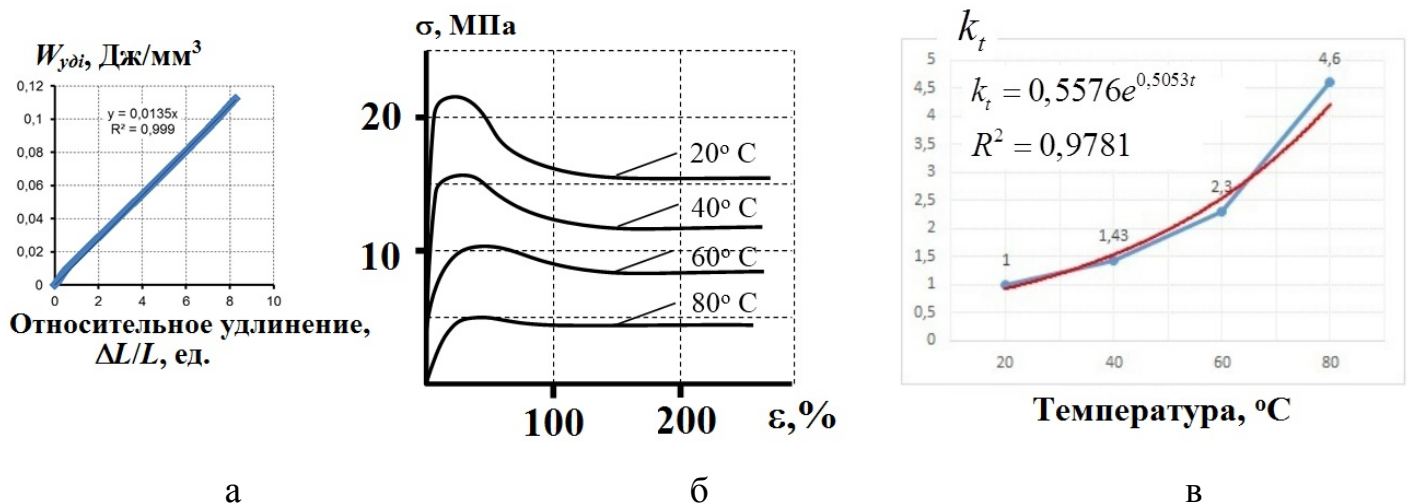


Рисунок 4. Результаты экспериментальных определений

Теперь из выражения (2) можно определить полную работу W_a^n разрушения адгезионного слоя:

$$W_a^n = W_{omp}^n - W_{\partial(t)} = F_{omp} [\Delta L + L(1 - \cos \alpha) - 1,67 \cdot k_p \cdot a \cdot v \cdot \Delta L \cdot e^{-0,5t}]. \quad (12)$$

Предполагается, что $W_{omp}^{n*} = W_a^n$:

Это равенство имеет вид;

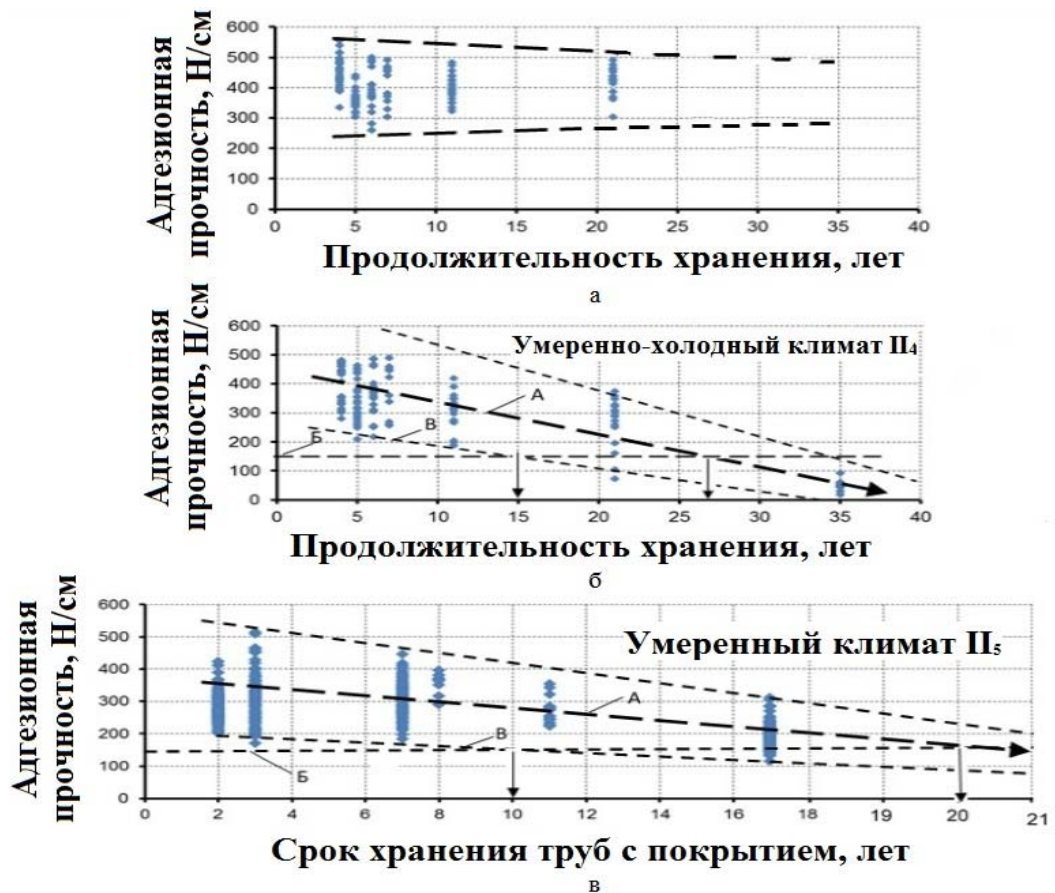
$$F_{omp} \cdot (1 - \cos \alpha)L = F_{omp} [\Delta L + L(1 - \cos \alpha)] - 1,67 \cdot k_p \cdot a \cdot v \cdot \Delta L \cdot e^{-0,5t}. \quad (13)$$

Отсюда истинное усилие отрыва полосы, приходящееся на единицу её ширины (F_{omp}^* / b), определяется из выражения:

$$F_{omp}^* = \frac{F_{отр} [\Delta L + L(1 - \cos \alpha)] - 1,67 \cdot k_p \cdot a \cdot b \cdot \Delta L \cdot e^{-0,5t}}{L \cdot b} \cdot b. \quad (14)$$

Истинная сила F_{omp}^* отрыва полосы, приходящаяся на единицу её ширины, является величиной, по которой регламентируется прочность адгезии, измеряемая в Н/см.

Сущность выражения (14) продемонстрирована на рисунке 5, а график



А – тренд изменения адгезионной прочности в процессе хранения защитных покрытий; Б – допустимое (нормативное) значение адгезионной прочности; В – нижняя граница измеренного интервала.

Рисунок 5. Адгезионная прочность

которого построен по результатам измерений без учета температуры в момент отбора образцов. На графиках рисунков 5, б и 5, в построения трендов выполнены по средним значениям с учетом температурной поправки, заложенной в выражении (14).

Полученные тренды характеризуют поступательное снижение адгезионной прочности в процессе длительного хранения, при этом темп снижения более интенсивный в климатической зоне П₅ (умеренный климат). По общетрендовым минимальным и средним значениям можно ориентировочно определить время сохраняемости адгезионной прочности покрытий, которые по результатам исследований составляют 15-27 лет в умеренно-холодной зоне П₄ и 10-20 лет в зоне умеренного климата П₅. Такая неопределенность свидетельствует о том, что проблема оценки деградации физико-механических свойств адгезионного слоя должна решаться с использованием других методических и диагностических подходов.

Характер изменения температурных напряжений, возникающих в теле полимерной оболочки при снижении температуры до -47 °С, исследовался с целью выявления способности защитных покрытий сохранять исправное состояние в этих условиях.

Схема действующих напряжений представлена на рисунке 6.

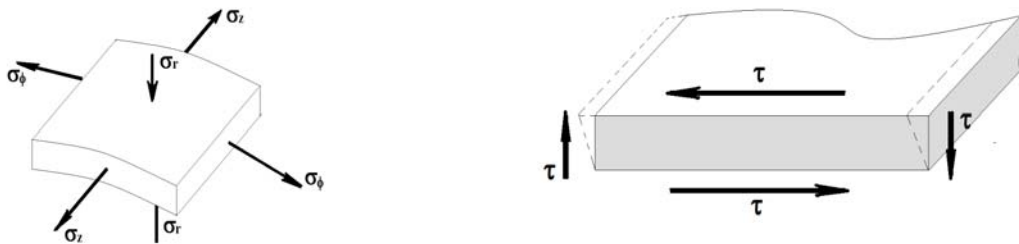


Рисунок 6. Схема действующих напряжений

Для количественной оценки температурных напряжений разработана расчетная деформационная модель.

Алгоритм расчета:

а) в продольном направлении z-z

- деформация растяжения

$$\varepsilon_{z_nm} = (\beta_m - \beta_n) \Delta t ; \quad (15)$$

- напряжение растяжения

$$\sigma_{z_nm} = E_n \cdot \varepsilon_{z_nm} = E_n (\beta_m - \beta_n) \Delta t ; \quad (16)$$

б) в радиальном направлении r-r

- относительная деформация сжатия

$$\varepsilon_{r_nm} = \beta_r \Delta t ; \quad (17)$$

- напряжение сжатия

$$\sigma_{r_nm} = E_n \cdot \varepsilon_{r_nm} = E_n \beta_n \Delta t ; \quad (18)$$

в) в кольцевом направлении φ - φ

- относительная кольцевая деформация

$$\varepsilon_{\varphi_nm} = \frac{(D_n + \delta_{n_o})^2 [(\beta_m - \beta_n) \Delta t]}{(D_n + \delta_{n_o})^2}; \quad (19)$$

- кольцевые напряжения

$$\sigma_{\varphi_nm} = E_n \cdot \varepsilon_{\varphi_nm} = \frac{E_n (D_n + \delta_{n_o})^2 [(\beta_m - \beta_n) \Delta t]}{(D_n + \delta_{n_o})^2}; \quad (20)$$

г) касательные напряжения по толщине r-r

$$\tau_{zr} = \frac{E_n}{1 + \mu} \arctg \left(\frac{\varepsilon_{z_nm}}{\varepsilon_{r_nm}} \right); \quad \tau_{\varphi r} = \frac{E_n}{1 + \mu_n} \arctg \left(\frac{\varepsilon_{\varphi_nm}}{\varepsilon_{r_nm}} \right) \quad (21)$$

Расчёт выполняется в программном комплексе MathCad. Результаты расчётов представлены на рисунке 7.

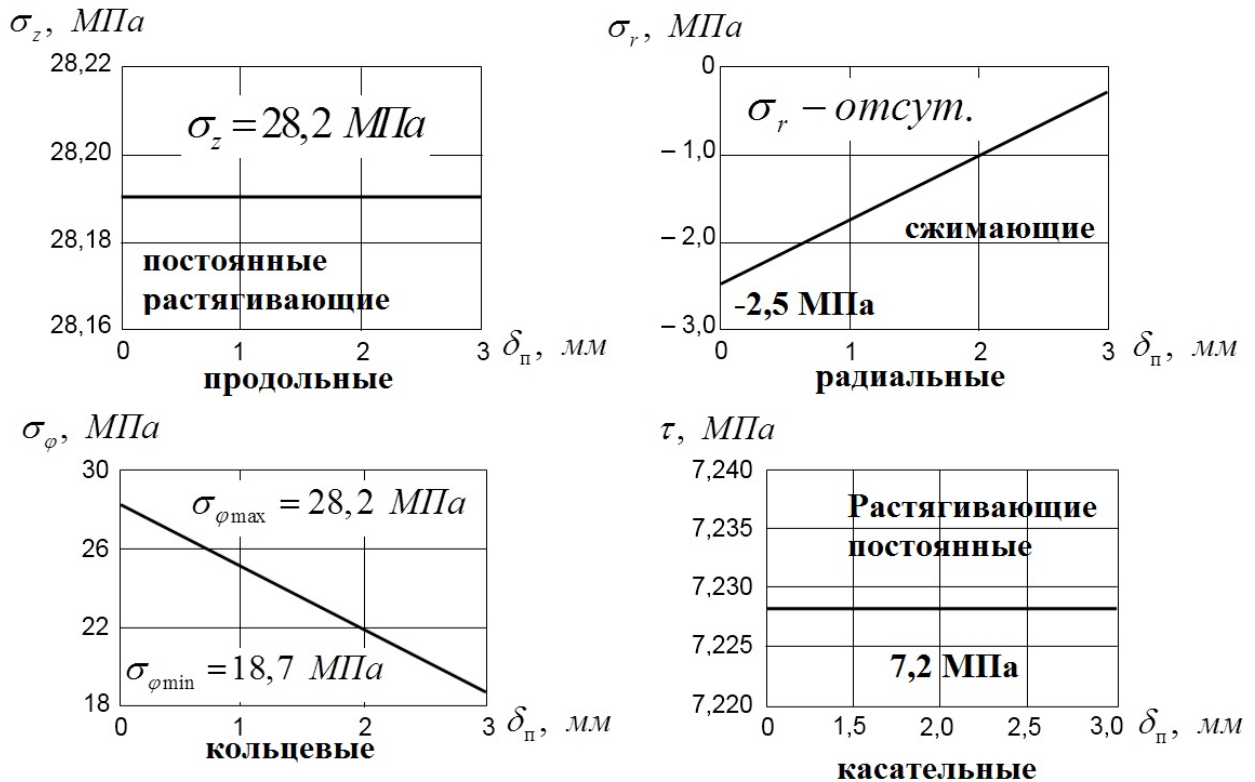


Рисунок 7. Температурные напряжения

Как видно, 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. При этом предельное значение

напряжений σ_p^t для рассматриваемого материала и рассматриваемой температуры ($t=-47^\circ\text{C}$) можно определить из адаптированного выражения:

$$\sigma_p^t = \sigma_p^{T_0} \left(\frac{T_{пл} - t}{T_{пл} - T_0} \right)^n, \quad (22)$$

где $\sigma_p^{T_0}$ - известный предел прочности при некоторой начальной температуре T_0 ; $T_{пл}$ - температура плавления; n - экспериментальный параметр, равный 1,2.

Если принять $\sigma_p^{T_0} = 22...32$ МПа (ГОСТ 16338-85) при $T_0=20^\circ\text{C}$ и температура плавления материала $T_{пл}=130^\circ\text{C}$, то предел его прочности при $t=-47^\circ\text{C}$ составит $\sigma_p^{(-47)} = 38,9...56,6$ МПа, что превышает полученные значения максимальных продольных напряжений ($\sigma_z = 28,2$ МПа) в 1,7-2,0 раза. Дополнительные расчеты показывают, что предельных значений температурные напряжения полимерного покрытия достигают при температуре -87°C , это означает, что сохраняемость физико-механических свойств полимерных покрытий обеспечиваются в полной мере при вероятных минимальных температурах северных климатических зон (до -54°C для холодного климата I_2).

В четвертой главе рассматривается процесс прогнозирования сроков сохраняемости полимерных покрытий в северных условиях. Порядок проведения прогнозирования представлен на рисунке 8.



Рисунок 8. Порядок прогнозирования

В основу этого процесса положен принцип регулярного мониторинга контролируемых параметров механических свойств. В качестве таких параметров приняты твердость по Бринеллю HB , относительное удлинение ε и адгезионная прочность A .

Контролируемые параметры представляют собой регулярные показатели текущих механических свойств исследуемых защитных покрытий, значения которых сравниваются с допустимыми значениями физико-механических характеристик в соответствии с ГОСТ Р 31448-2012. До тех пор, пока показатели контролируемых параметров не превышают нормативных значений, исследуемые защитные покрытия труб относят к категории работо-

значений, исследуемые защитные покрытия труб относят к категории работо-

способных и допускают к дальнейшему хранению в составе аварийных запасов. С учетом этого предложен метод прогнозной оценки предельных сроков сохраняемости защитных покрытий по текущим значениям контролируемых параметров.

Для этой цели рассчитываются:

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

$$\varphi_{\tau_i} = \frac{X_{\tau_i} \cdot 100}{X_0}, \% ; \quad (23)$$

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

$$\varphi_{\delta_i} = \frac{|[X] - X_0|}{[X]} \cdot 100\% , \quad (24)$$

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

$$\varphi_{\delta_i} = \frac{[X]}{X_0} \cdot 100\% , \quad (25)$$

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 9).

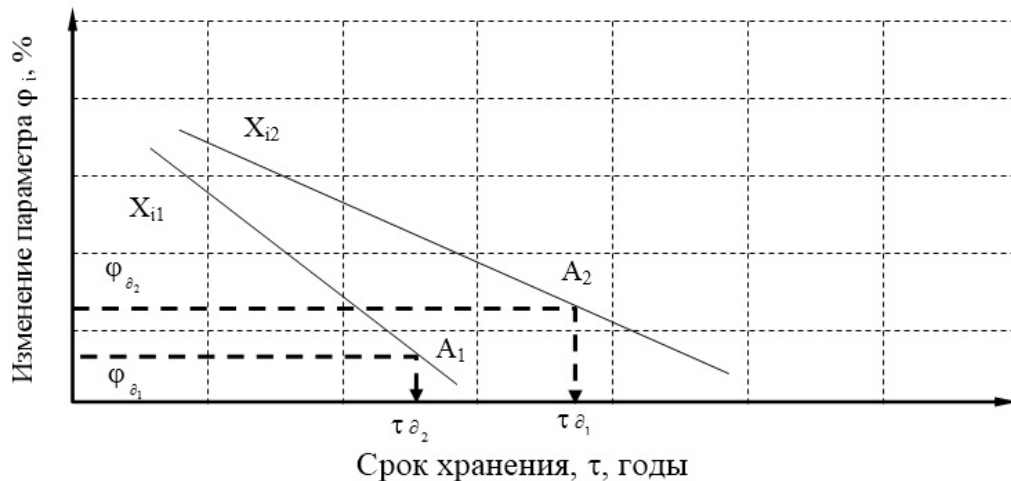


Рисунок 9. Диаграмма прогнозирования сроков сохраняемости защитных покрытий по контролируемым параметром $X_{i1}, X_{i2}...$

4). Предельный срок хранения определяется по условию пересечения контролируемого параметра $X_i (X_1, X_2...)$ с прямой $\varphi_{\delta_i} (\varphi_{\delta_{i1}}, \varphi_{\delta_{i2}}...)$, ограничивающей

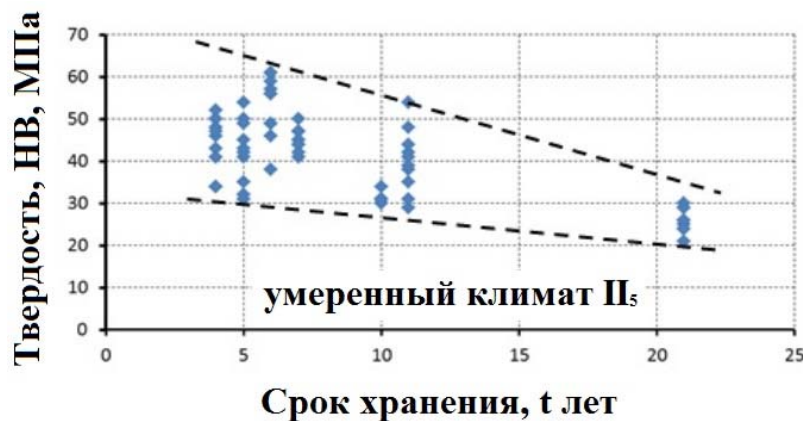
его минимально допустимое значение, в точке $A_i (A_1, A_2 \dots)$ с последующей проекцией этой точки на временную ось $\tau_{oi} (\tau_{o1}, \tau_{o2} \dots)$. Перпендикуляр этой проекции $A_i \tau_{oi} (A_1 \tau_1, A_2 \tau_2 \dots)$ отсекает примерное прогнозное значение предельного времени $\tau_{oi} (\tau_{o1}, \tau_{o2} \dots)$ хранения защитного покрытия в соответствующих климатических условиях.

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

Проекция точки $A_{(1,2,\dots)}$ пересечения прямых $\varphi_{o(1,2,\dots)}$ и $X_{i(1,2,\dots)}$ на ось абсцисс отсекает отрезок, равный прогнозируемому значению предельно допустимого срока хранения $\tau_{o(1,2)}$.

Пример прогнозирования сроков сохраняемости защитного покрытия по контролируемому параметру твердости НВ приводится ниже:

1. Рассматриваются результаты временного мониторинга контролируемого параметра НВ в процессе хранения трубы с защитным покрытием в условиях умеренного климата П₅ (рисунок 10):



а

Рисунок 10. Результаты измерения твердости по Бринеллю защитного покрытия труб аварийных запасов с различными сроками хранения: а – климатическая зона П₅ (умеренный климат)

2. Определяются среднестатистические значения измеренных параметров НВ в заданные моменты времени, например, $\tau=5$ лет и $\tau=21$ год:

$$НВ_{(5)} = 45 \text{ МПа}; НВ_{(21)} = 27 \text{ МПа}.$$

3. Экспериментально находится зависимость параметра НВ от предела текучести σ_{pr} исследуемых образцов при растяжении (рисунок 11).

4. Находится зависимость $\sigma_{pr} = f(НВ)$:

$$\sigma_{pr} = \frac{НВ - 10,584}{1,7381}$$

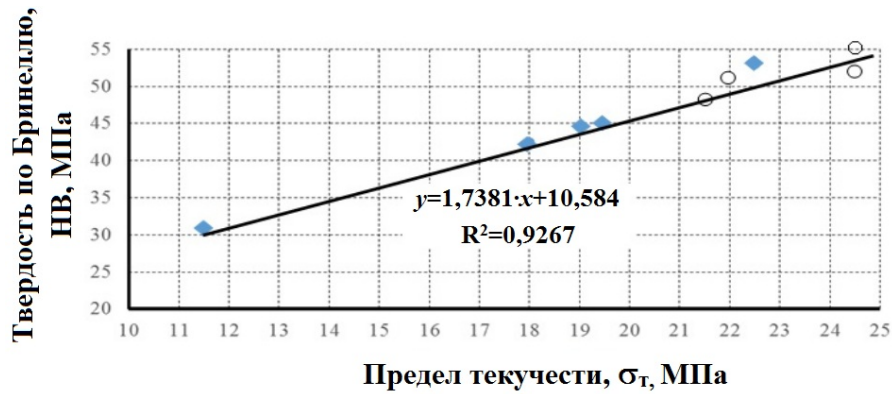


Рисунок 11. Твердость по Бринеллю материала защитного покрытия в зависимости от предела текучести: \circ – образцы из зоны умеренно-холодного климата П₄; \blacklozenge – образцы из зоны умеренного климата П₅

и вычисляются значения σ_{pt} для $\tau=5$ лет и $\tau=21$ год:

$$\sigma_{pt(5)} = 19,8 \text{ МПа} ; \sigma_{pt(21)} = 9,4 \text{ МПа} .$$

5. Рассчитываются коэффициенты $\varphi_{\tau i}$ для времени $\tau=5$ лет и $\tau=21$ год, а также допустимый коэффициент $\varphi_{\partial i}$:

$$\varphi_{(5)} = 77 \% ; \varphi_{(21)} = 36,6 \% ; \varphi_{(\partial i)} = 27,9 \% .$$

На основе этих расчетов выстраивается диаграмма (рисунок 12):



Рисунок 12. Графическое прогнозирование предельного срока сохраняемости защитного покрытия труб по контролируемому параметру твердости

Из диаграммы видно, что прогнозный срок сохраняемости защитного покрытия по параметру твердости HV составляет $\tau_{\partial} = 24,5 \text{ года}$.

Аналогично вычисляются прогнозные сроки сохраняемости по другим контролируемым параметрам, например, по параметрам относительного удлинения ϵ и прочности адгезии A, которые могут быть представлены на совмещенном графике (рисунок 13):



Рисунок 13. Совмещенный график прогнозной оценки предельного срока сохраняемости защитных покрытий труб по контролируемым параметрам: НВ – твердости; ε – относительному удлинению; А – адгезионной прочности

Из графика видно, что предельный срок хранения контролируемых защитных покрытий для условий умеренного П₅ климата составляет по прогнозу 22-26 лет.

В пятой главе рассмотрены вопросы совершенствования методов обеспечения сохраняемости защитных полимерных покрытий труб в условиях длительного хранения, которая определяется агрессивностью влияния атмосферных факторов: температурой, фазовыми превращениями влаги, солнечной радиацией. Методическая взаимосвязь этих факторов позволяет сформулировать системный комплекс рекомендаций по мониторингу сохраняемости покрытий с учетом стадий формирования аварийного запаса труб и последующего периодического контроля в процессе хранения.

В соответствии с ГОСТ 31448-2012 (таблица 3, п.1) первоначальным этапом оценки технического состояния защитных покрытий труб на соответствие техническим требованиям является контроль внешнего вида. Это требование и положено в основу сформулированного комплекса рекомендаций по контролю защитных покрытий труб при отборе на хранение и последующем хранении в составе аварийных запасов.

1). При отборе на хранение для формирования аварийного запаса труб методический комплекс включает:

- балльную оценку внешнего состояния покрытий по результатам визуального измерительного контроля (микроскопия, линейные измерения, блеск, цвет, волнистость, шероховатость, микротрещинность поверхности);
- оценку состояния кромок защитного покрытия и клеевого (адгезионного) слоя на наличие отслаиваний с помощью стальных щупов или акустических дефектоскопов;
- обследование всей поверхности защитного покрытия на наличие отслоений методом акустического зондирования.

По результатам реализации этого комплекса составляется перечень выявленных дефектов и повреждений, оцениваемый в баллах, что позволяет принять решение: а) о возможности допуска защитного покрытия к

длительному хранению (сумма баллов <1); б) о необходимости ремонта или защиты от атмосферных воздействий (сумма баллов $1 \dots 2$); в) о невозможности принятия защитного покрытия на длительное хранение (сумма баллов > 2).

Критериальная таблица для балльной оценки защитных покрытий труб при отборе на хранение приведена в тексте диссертации.

2). При последующем хранении мониторинг сохраняемости защитных покрытий труб проводится в два этапа и также оценивается балльными критериями.

Первый этап включает балльную оценку выявленных изменений и повреждений, полученных в ходе визуально-измерительного контроля (шероховатость, цвет, блеск, протяженность и ширина раскрытия микротрещин; при этом оцениваются также сдвиг торца покрытия, волнистость, механические повреждения, глубина микротрещин).

Для этой цели в тексте диссертации приведена критериальная таблица с балльной оценкой контролируемых показателей.

Если общая первичная оценка не превышает $\leq 1,3$ балла, защитное покрытие находится в удовлетворительном состоянии и пригодно для дальнейшего хранения.

Если общая оценка превышает $> 1,3$ балла, защитное покрытие подвергается дополнительному контролю на втором этапе. При этом оценивается число повреждений, их площадь и степень локализации на поверхности покрытия; наличие отслаиваний и глубина трещин. Результаты также переводятся в оценочный балл специальной критериальной таблицы, приведенной в тексте диссертации.

Если расчетная сумма баллов по этой таблице меньше < 20 , покрытие подлежит ремонту на месте хранения. Трубы с отремонтированными покрытиями являются пригодными для дальнейшего хранения. При превышении расчетной суммы баллов > 20 , покрытие является непригодным для дальнейшего хранения, очищается с трубы механическим способом и утилизируется.

Весь порядок организационно-технических мероприятий по совершенствованию методов обеспечения длительного хранения защитных покрытий труб в атмосферных условиях северного климата представлен в виде алгоритма (рисунок 14), основные положения которого отражены при разработке стандарта организации (СТО) ООО «Газпром Трансгаз Ухта» «Срок хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях с использованием средств защитного укрытия», введенного в действие 01.01.2015 г.

Основные 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

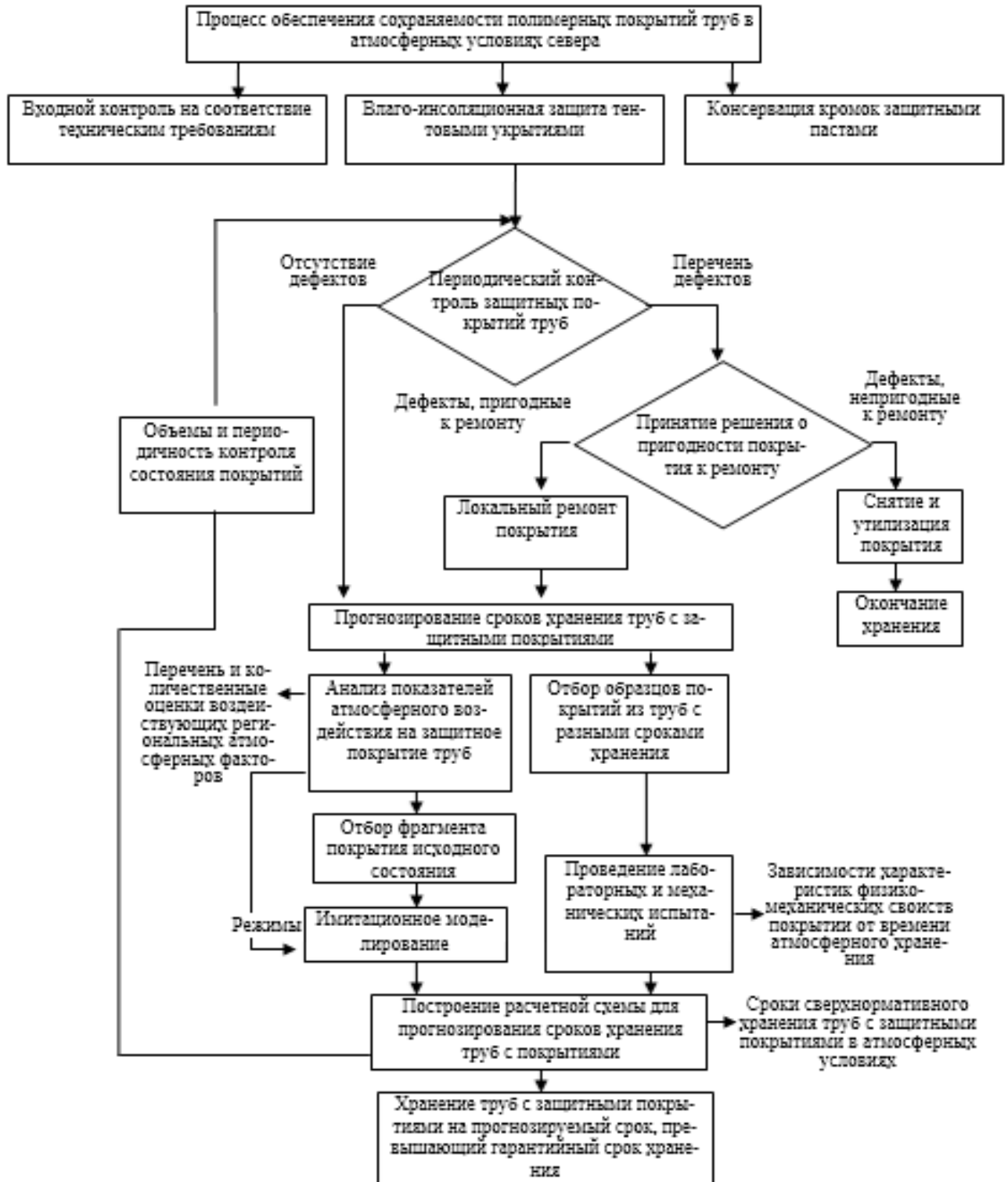


Рисунок 14. Алгоритм организационно-технических мероприятий по обеспечению длительного хранения труб с защитными покрытиями в атмосферных условиях

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, кратно 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).

Основные положения и наиболее значимые результаты диссертации опубликованы в следующих работах

- в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Пак А. Л. Проблемы резервирования труб с заводскими защитными покрытиями в аварийных запасах северных газопроводов (Текст) / И. Ю. Быков, А. Л. Пак // Инженер - нефтяник. – 2014. – № 2. – с. 26–30.

2. Пак А. Л. О причинах возникновения трещин в полиэтиленовых заводских покрытиях труб при хранении в условиях низких температур (Текст) / И.Ю. Быков, А. Л. Пак // Инженер - нефтяник. – 2014. – № 2. – с. 30–33.

3. Пак А. Л. Проблемы обеспечения сохранности заводских покрытий труб при перевозке автотранспортом (Текст) / И.Ю. Быков, А.Л. Пак // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ВНИИОЭНГ. – 2014. – № 9. – с. 28–31.

4. Пак А. Л. Оценка внутренних напряжений при нанесении полимерных покрытий на стальные трубы с применением автоматизированного алгоритма (Текст) / И.Ю. Быков, М.М. Бердник, А.Л. Пак // Инженер - нефтяник. – 2014. – № 4. – с. 38–44.

5. Пак А. Л. Распределение внутренних напряжений в полимерных покрытиях стальных труб при атмосферном хранении в условиях отрицательных температур (Текст) / М.М. Бердник, И. Ю. Быков, А.Л. Пак // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – №2. – с. 80-85.

6. Пак А. Л. Сохраняемость параметров полимерных покрытий труб при атмосферном хранении (Текст) / И. Ю. Быков, А. Л. Пак, И.Ф. Чупров // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2016. – № 4. – с. 20–22.

- в других публичных изданиях:

1. Пак А. Л. Анализ процессов релаксации внутренних напряжений в полиэтиленовых покрытиях труб при нагреве по характеристикам механических свойств (Текст) / И. Ю. Быков, А. Л. Пак // В сб. науч. трудов: Материалы научно-технической конференции (22-25 апреля 2014 г., Ухта): в 5 ч.; ч. 1. – Ухта: УГТУ, 2014. – с. 127-131.