

На правах рукописи

Азаров Владимир Александрович



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ
АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ГЛАДКОСТНОГО
ХЛАДОСТОЙКОГО ФТОРОПЛАСТОВОГО ПОКРЫТИЯ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Пряхин Евгений Иванович

Официальные оппоненты:

Бреки Александр Джалильевич

доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», международный научно-образовательный центр «BaltTribopolytechnic», профессор;

Бобкова Татьяна Игоревна

кандидат технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», дирекция, учёный секретарь института.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Защита диссертации состоится **24 декабря 2025 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 октября 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время одним из известных способов повышения эффективности работы магистральных газопроводов является применение внутренних гладкостных покрытий, эффективность применения которых зависит от состава и технологии их нанесения на внутреннюю поверхность трубы. Внутренние гладкостные покрытия позволяют снизить потери давления природного газа при трении о стенку трубопровода, а также обеспечивают противокоррозионную защиту внутренней полости трубопровода.

Согласно Указу Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» актуальным является переход к ресурсосберегающим технологиям, к которым можно отнести использование внутренних гладкостных покрытий газопроводов. Помимо этого применение газопроводов с гладкостным внутренним покрытием согласуется с политикой ПАО «Газпром» в области энергетической эффективности и энергосбережения, утвержденной постановлением Правления ПАО «Газпром» от 11 октября 2018 г. № 39.

На данный момент наиболее широкое распространение в качестве внутренних гладкостных покрытий магистральных газопроводов получили эпоксидные покрытия, которые склонны к охрупчиванию и потере эластичности при низких климатических температурах от -20°C.

Предполагается, что в ближайшие годы большинство разрабатываемых или планируемых к разработке месторождений природного газа будут находиться в зонах Крайнего Севера и Арктики, которые характеризуются экстремальными климатическими условиями, принципиально осложняющими транспортировку природного газа по стальным магистральным трубопроводам большого диаметра потребителям. Из-за экстремально низких климатических температур, достигающих – 60°C, применяемые для повышения эффективности транспортировки газа внутренние гладкостные эпоксидные покрытия оказываются малопригодными из-за их охрупчивания и

снижения эластичности, что может приводить к потере адгезии покрытия и его отслаиванию от стальной поверхности. Кроме этого, добыча природного газа из указанных выше регионов связана с ростом доли жирного природного газа, транспортировка которого более энергоёмка, что приводит к необходимости применения гладкостных покрытий. Таким образом, совместное влияние факторов экстремальных климатических условий и повышения доли транспортировки жирного природного газа приводит к снижению эффективности и надёжности работы существующих трубопроводных систем в указанных условиях их эксплуатации.

В связи с вышеперечисленными факторами для разрабатываемых или планируемых к разработке месторождений природного газа, располагающихся в районах Крайнего Севера и Арктики, требуется применение нового варианта покрытия, которое сможет эксплуатироваться в данных специфичных условиях. Одним из перспективных вариантов являются покрытия на основе фторсодержащих полимеров, которые обладают рядом ценных свойств, в том числе при низких температурах. Но существенным недостатком покрытий на основе фторопластовых полимеров является их низкая адгезионная способность взаимодействия со стальной поверхностью. Поэтому для применения таких покрытий в качестве внутренних гладкостных покрытий магистральных газопроводов требуется разработка технологии повышения адгезионной прочности покрытия, которая позволит её обеспечить за счёт создания упорядоченной морфологии поверхности при применении лазерной обработки взамен пескоструйной с последующим нанесением промежуточного адгезионного слоя.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами применения внутренних гладкостных покрытий для повышения эффективности и надёжности работы магистральных газопроводов, а также изучением их свойств занимались такие отечественные и зарубежные ученые, как С. Ю. Сальников, В. М. Простокишин, А. Б. Васенин, А.Д. Седых, Л.Г. Белозеров, З.Т. Галиуллин, А. Р. Махмутов, А.В. Сальников, Y. Luo, C. Cui, M.I. Abdou, X. Wang, Y. Wan, N. Taghavi, W. Wu, E. Sletfjerdings и другие.

Несмотря на большой вклад в развитие данного научного направления, основные труды большинства ученых были посвящены рассмотрению и модифицированию гладкостных покрытий на основе эпоксидных полимеров. Изучение данных покрытий опиралось на применение в умеренных климатических условиях, без учёта возможности их эксплуатации в условиях Крайнего Севера и Арктики. Незначительное число работ, посвящённое применению фторопластовых покрытий в нефтегазовой отрасли, не рассматривали данное покрытие в качестве гладкостного, что можно связать с трудностью обеспечения его адгезии со стальной поверхностью. Таким образом, требуется произвести научный поиск и предложить новые варианты технических и технологических решений для применения гладкостных покрытий на основе фторопластовых полимеров при обеспечении их высокой адгезии к стальной поверхности.

Вопросами предварительной подготовки поверхности перед нанесением различных полимерных покрытий занимались такие отечественные и зарубежные учёные, как С.Я. Грилихес, А. Б. Тулинов, А. В. Мележик, Т. К. Коростелева, Г. П. Алексюк, К.С. Надиров, И.А. Старостина, В.П. Вейко, Z. Gao, M. Baby, K. Zhang, O. Bouledroua, G. Bahlakeh и другие.

Научные труды отечественных и зарубежных учёных во многом способствовали повышению качества адгезионного сцепления наносимых на стальные изделия функциональных покрытий. Однако повышение адгезии фторопластовых полимерных покрытий к стальной поверхности в целях его применения в качестве внутреннего гладкостного покрытия магистральных газопроводов не рассматривалось. Применение фторопластового покрытия для данных целей остаётся недостаточно изученным.

Таким образом, для применения покрытий на основе фторопластовых полимеров в качестве внутренних гладкостных покрытий магистральных газопроводов требуется разработка специальной технологии подготовки стальной поверхности, а также дальнейшая проверка свойств покрытий, нанесённых на обработанную стальную поверхность, базирующаяся на комплексе специальных экспериментальных исследований.

Объект исследования

Внутренние гладкостные покрытия магистральных газопроводов на основе эпоксидных и фторсодержащих полимеров.

Предмет исследования

Технология предварительной подготовки стальной поверхности для повышения адгезии фторопластового покрытия с целью его применения в качестве внутреннего гладкостного покрытия магистральных газопроводов в условиях Крайнего Севера и Арктики.

Цель работы

Разработка технологии подготовки поверхности стальных изделий для обеспечения высокой адгезионной прочности наносимого гладкостного покрытия на основе фторопластовых полимеров, позволяющего повысить надёжность транспортировки природного газа в условиях Крайнего Севера и Арктики.

Идея работы заключается в подготовке поверхности стальных изделий, включающей операции предварительной лазерной обработки и «холодного» фосфатирования, для нанесения гладкостного фторопластового покрытия для обеспечения его высокой адгезионной прочности.

Задачи исследования

Достижение поставленной в работе цели достигается решением следующих задач.

1. Провести научный анализ существующих технических решений в области гладкостных полимерных покрытий магистральных газопроводов, а также способов повышения адгезии полимерных покрытий к стальной поверхности.
2. Установить зависимость шероховатости и морфологии обработанной поверхности от параметров лазерного излучения.
3. Разработать технологию подготовки стальной поверхности к нанесению полимерного фторопластового покрытия для обеспечения его высокой адгезии.
4. Провести экспериментальные исследования по оценке адгезионной прочности фторопластового покрытия, нанесённого на поверхность, обработанную по разработанной

технологии, включающей предварительную лазерную обработку и «холодное» фосфатирование.

5. Провести экспериментальные исследования по оценке физико-механических и защитных свойств фторопластовых покрытий на предмет соответствия требованиям газовой промышленности и возможности применения в условиях Крайнего Севера и Арктики.

6. Провести оценку гидравлической эффективности покрытия на основе фторопластовых полимеров.

Научная новизна

1. Установлена зависимость шероховатости и морфологии обработанной поверхности от параметров лазерной обработки (мощности лазерного излучения, скорости лазерного луча и линиатуры (плотности заливки)) при фиксированном значении частоты лазерного излучения $f = 40$ кГц.

2. Определены режимы предварительной лазерной обработки и состав «холодного» фосфатирования стальной поверхности, при сочетании которых обеспечивается наибольшее значение адгезионной прочности фторопластового покрытия.

3. Установлено повышение физико-механических свойств фторопластового покрытия, нанесённого на обработанную по разработанной технологии стальную поверхность, по сравнению с применяющимся в качестве гладкостного эпоксидным покрытием, а также установлена возможность применения фторопластовых покрытий при особых условиях эксплуатации газопроводов в районах Крайнего Севера.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) по пунктам: п. 3. «Разработка научных основ выбора металлических, неметаллических и композиционных материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации деталей, изделий машин и конструкций», п. 5. «Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и

внешней среды», п. 11. «Разработка функциональных покрытий различного назначения и методов управления их свойствами и качеством».

Теоретическая и практическая значимость работы

1. На основании установленной зависимости шероховатости обработанной стальной поверхности от параметров лазерной обработки при фиксированном значении частоты выявлено, что наибольшее влияние на её величину и морфологию поверхности оказывают мощность лазерного излучения, линиятура (плотность заливки), а также совместное влияние скорости лазерного луча и линиятуры.

2. Разработана технология предварительной подготовки стальной поверхности перед нанесением полимерного покрытия, включающая лазерную обработку по выбранным режимам и «холодное» фосфатирование составом Мажеф (25 г/л), $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (35 г/л), NaF (7 г/л) и позволяющая повысить адгезионную прочность фторопластового покрытия к поверхности в среднем на 80% по сравнению с абразивной обработкой.

3. Рекомендовано применение фторопластового покрытия в качестве внутреннего гладкостного покрытия магистральных газопроводов в условиях Крайнего Севера и Арктики на основании выполненной комплексной оценки его физико-механических и защитных свойств.

4. Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению на предприятии ООО «НПП ВОЛО» в виде рекомендаций для предварительной подготовки стальной поверхности перед нанесением полимерных лакокрасочных покрытий, что подтверждено актом о внедрении результатов диссертации от 08.09.2025.

5. Результаты диссертационной работы подтверждены патентом на изобретение № RU 2828891 C1 «Способ подготовки поверхности углеродистых и низколегированных сталей к нанесению полимерных покрытий» от 21.10.2024.

Методология и методы исследований

Исследования были основаны на существующих данных в области предварительной подготовки стальной поверхности к

нанесению полимерных покрытий, статистических методах, методиках планирования эксперимента и стандартных методах исследования свойств покрытий.

Экспериментальные исследования по разработке технологии повышения адгезии фторопластового покрытия к стальной поверхности проводились при помощи комплекса стандартного оборудования и методов. К ним можно отнести предварительную лазерную обработку стальной поверхности экспериментальными режимами при помощи лазерного комплекса МиниМаркер2 с дальнейшим изучением морфологии обработанной поверхности на микроскопе Leica DMIL HC и измерением шероховатости при помощи профилометра HOMMEL TESTER T1000; «холодное» фосфатирование стальной поверхности выбранными составами с дальнейшим изучением поверхности и измерением шероховатости; оценку адгезии нанесённого покрытия на обработанную поверхность при помощи метода решётчатых надрезов и при помощи адгезиметра Elcometer 108 Hydraulic Adhesion Tester методом отрыва.

Экспериментальные исследования по оценке физико-механических и защитных свойств покрытий проводились при помощи следующего оборудования и методов: оценка ударной прочности при помощи прибора «Константа-У1»; оценка прочности при растяжении прибора «Константа-ШЭ»; оценка изгибной прочности при помощи прибора «ПРОМТ ИЗГИБ»; испытаний на хладостойкость и стойкость к изменению гидравлического и газового давления; оценка защитных свойств при помощи испытаний на водостойкость, стойкость в растворителе и стойкость к воздействию солевого тумана в камере SF-260; испытание на сплошность покрытия электроискровым методом дефектоскопом Elcometer 23; измерение шероховатости с дальнейшим определением коэффициента эквивалентной шероховатости.

Положения, выносимые на защиту

1. Предварительная лазерная обработка по экспериментально установленным режимам с дальнейшим «холодным» фосфатированием стальной поверхности составом Мажеф (25 г/л), $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (35 г/л), NaF (7 г/л) позволяет

повысить прочность адгезионного сцепления фторопластового покрытия со стальной поверхностью в среднем на 80% по сравнению с абразивной обработкой.

2. Экспериментально обосновано применение внутреннего гладкостного хладостойкого фторопластового покрытия магистральных газопроводов, нанесённого на стальную поверхность по разработанной технологии, позволяющей повысить за счет высокой адгезионной прочности покрытия надёжность эксплуатации магистральных газопроводов в условиях Крайнего Севера и Арктики.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена необходимым объёмом методов математического планирования эксперимента, использованием стандартных методов исследований, достаточным объёмом экспериментальных исследований на сертифицированном и поверенном оборудовании, а также апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и публикациях в рецензируемых изданиях.

Апробация результатов диссертации проводилась на 7 научно-практических мероприятиях, в том числе на 4 международных: XI Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства (г. Минск, декабрь 2022 г.); XXI Молодежная научная конференция «Функциональные Материалы: Синтез, Свойства, Применение», посвящённая 75-летию юбилею Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова (с международным участием) (г. Санкт-Петербург, декабрь 2023 г.); III Всероссийская научная конференция «Транспорт и хранение углеводородов - 2024» (г. Санкт-Петербург, апрель 2024 г.); V Всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных «Транспорт и хранение углеводородов» (г. Омск, апрель 2024 г.); V Международная научная конференция «Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах» (г. Санкт-Петербург, декабрь 2024 г.); XIII Молодежная международная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (г. Москва, май 2025 г.); Международный симпозиум «FLAMN-2025

Fundamentals of laser assisted micro- and nanotechnologies» (г. Санкт-Петербург, июнь 2025 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, установлении зависимости шероховатости и морфологии обработанной поверхности от режимных параметров лазерной обработки и выборе режимов обработки; разработке технологии предварительной подготовки стальной поверхности к нанесению покрытия, включающей операции предварительной лазерной обработки и «холодного» фосфатирования, проведении экспериментальных исследований по оценке физико-механических и защитных свойств покрытий, формулировании выводов и защищаемых положений по итогу работы.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 120 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 42 рисунка и 9 таблиц.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность за помощь и наставничество при подготовке диссертации научному руководителю, заведующему кафедрой МиТХИ, д.т.н., профессору Пряжину Е.И.; коллективу и аспирантам кафедры МиТХИ за ценные советы; семье и друзьям за неоценимую поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна работы, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор отечественных и зарубежных источников, посвящённых проблематике применения внутренних гладкостных покрытий магистральных газопроводов, а также существующим способам обеспечения адгезии покрытий к стальным поверхностям. На основании проведённого анализа сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

Во второй главе описаны применяемые материалы, оборудование и методы для проведения экспериментальных исследований, которые включают исследования по разработке технологии повышения адгезии фторопластового покрытия к стальной поверхности и исследования физико-механических и защитных свойств изучаемых покрытий.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования по разработке технологии повышения адгезионной прочности фторопластового покрытия. Произведена оценка влияния параметров лазерного излучения на шероховатость обрабатываемой поверхности. Установлены режимы обработки лазером и состав «холодного» фосфатирования, при которых обеспечивается максимальный рост адгезионной прочности.

В четвертой главе представлены экспериментальные исследования по оценке физико-механических и защитных свойств рассматриваемых покрытий с целью обоснования возможности их применения для газопроводов в условиях Крайнего Севера и Арктики. Произведена оценка гидравлической эффективности покрытий.

В заключении отражены основные выводы по результатам работы.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Предварительная лазерная обработка по экспериментально установленным режимам с дальнейшим «холодным» фосфатированием стальной поверхности составом Мажеф (25 г/л), $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (35 г/л), NaF (7 г/л) позволяет повысить прочность адгезионного сцепления фторопластового покрытия со стальной поверхностью в среднем на 80% по сравнению с абразивной обработкой.

В результате аналитического обзора показано, что фторопластовые покрытия, предполагаемые к использованию в качестве внутренних гладкостных покрытий магистральных газопроводов в условия Крайнего Севера и Арктики, обладают целым рядом ценных свойств, но их недостатком является низкая адгезия к покрываемым стальным поверхностям.

Для повышения адгезионной прочности покрытия к стальной поверхности была предложена комплексная схема предварительной обработки поверхности, включающая операции предварительной лазерной обработки и «холодного» фосфатирования.

Для обоснования режимов лазерной обработки, позволяющих достигнуть упорядоченной морфологии и достаточной величины шероховатости, была проведена экспериментальная оценка влияния основных параметров лазера на данные показатели.

В качестве экспериментальных образцов использовались пластины из стали марки Ст3, а обработка проходила на лазерном комплексе МиниМаркер 2. Каждый из исследуемых образцов обрабатывался в 3 прохода. Первые два прохода выполнялись перпендикулярно друг другу для получения упорядоченного рельефа при варьируемых параметрах лазерного излучения. Для первых двух проходов в каждом эксперименте величины мощности, скорости лазерного луча и линейности (плотности заливки) являлись одинаковыми. Последний проход (3-й) представлял собой режим «зачистки», позволяющий удалить окалину, оксиды и другие сопутствующие загрязнения.

В исследовании варьировались такие параметры лазерного излучения, как мощность лазерного луча (P) (нижний уровень – 10 Вт, верхний уровень – 18 Вт), скорость перемещения лазерного луча (v) (нижний уровень – 400 мм/с, верхний уровень – 800 мм/с),

линиатура (плотность заливки) (h) (нижний уровень – 15 линий/мм, верхний уровень – 20 линий/мм). Частота лазерного излучения (f) была выбрана равной 40 кГц. Данная величина позволяет происходить абляции материала без риска перегрева, кроме этого, импульсы не перекрывают друг друга при высокой скорости перемещения лазерного луча.

По результатам полного факторного эксперимента была получена математическая зависимость, описывающая влияние мощности лазерного луча, его скорости и линиатуры (плотности заливки) на шероховатость обрабатываемой поверхности, выражающаяся формулой 1:

$$Ra = 4,015 + 0,2175P - 0,004275v - 0,114h - 0,007Ph + 0,00019vh - 0,0004375Pv + 0,000025Pvh. \quad (1)$$

По абсолютной величине коэффициентов уравнения в закодированных переменных установлено, что наибольшее влияние на величину получаемой шероховатости оказывают мощность лазерного излучения, линиатура (плотность заливки) и совместное влияние скорости и линиатуры. На основании проведённых опытов по определению шероховатости и уравнения регрессии получены зависимости шероховатости стальной поверхности от мощности лазерного излучения, его скорости и линиатуры (рисунок 1), а также взаимного влияния исследуемых факторов (рисунок 2).

При изучении морфологии обрабатываемой стальной поверхности установлено, что наилучший результат по величине шероховатости, степени очистки и морфологии образованного микрорельефа достигается при следующих значениях изучаемых режимных параметров основных проходов ($f = 40$ кГц, $P = 18$ Вт, $v = 800$ мм/с, $h = 20$ лин/мм). На рисунке 3 приведён внешний вид обработанной поверхности. По сравнению с широко применяемой пескоструйной обработкой (рисунок 4) данный микрорельеф является упорядоченным с равномерной величиной шероховатости без резких пиков и впадин, которые могут привести к нестабильному качеству нанесённого покрытия.

Поскольку фторопластовые покрытия характеризуются слабой адгезионной способностью взаимодействия со стальными поверхностями, то для повышения их адгезионной прочности к

покрываемой поверхности требуется применение дополнительных адгезионных слоёв. В качестве дополнительного адгезионного слоя для повышения величины шероховатости обработанной лазером поверхности, повышения её адсорбционной способности и создания развитого микрорельефа использовалось «холодное фосфатирование». Обработка поверхности проводилась 4-мя различными составами. Результаты представлены в таблице 1. На рисунке 5 представлены фотографии микрорельефа поверхности после фосфатирования изучаемыми составами. Далее на обработанные стальные образцы была нанесена фторопластовая эмаль ФП-566 в 3 слоя. Измеренная толщина покрытия в среднем составила 110-130 мкм. Оценка адгезии покрытия проводилась при помощи методов решётчатого надреза и отрыва. Адгезия покрытия, определённая методом решётчатых надрезов, составила 1 балл для всех случаев измерения на обработанной поверхности. Результаты измерения адгезии методом отрыва представлены в таблице 2, а примеры отрывов на рисунке 6. Во всех рассматриваемых случаях установлено действительное увеличение прочности адгезионного сцепления фторопластового покрытия с поверхностью образца в 1,6-1,8 раза по сравнению с образцами, обработанными абразивной обработкой. Наименьшая площадь отрыва покрытия от образца и наибольшее среднее усилие отрыва наблюдается при предварительной лазерной обработке и «холодном» фосфатировании составом №4, что можно связать с более развитым микрорельефом и большей величиной шероховатости. Таким образом, рекомендуется применять данную комплексную обработку, включающую операции лазерной обработки и «холодного» фосфатирования для повышения адгезии фторопластовых лакокрасочных покрытий (на примере эмали ФП-566).

2. Экспериментально обосновано применение внутреннего гладкостного хладостойкого фторопластового покрытия магистральных газопроводов, нанесённого на стальную поверхность по разработанной технологии, позволяющей повысить за счет высокой адгезионной прочности покрытия надёжность эксплуатации магистральных газопроводов в условиях Крайнего Севера и Арктики.

Для подтверждения возможности эксплуатации покрытий на основе фторопластовых полимеров в качестве внутренних гладкостных покрытий магистральных газопроводов в условиях Крайнего Севера и Арктики была проведена оценка ряда базовых свойств покрытий.

Испытание фторопластового покрытия происходило на образцах, обработанных согласно разработанной технологии обработки, а эпоксидных покрытий на образцах, обработанных при помощи пескоструйной обработки.

Оценка ударной прочности фторопластового и эпоксидного покрытий показала большую ударную прочность фторопластового покрытия при стандартной и отрицательной температуре (рисунок 7): на эпоксидном покрытии образовались дефекты в виде трещин при более низкой высоте падения бойка (рисунок 8). Кроме этого, данный вид испытания подтвердил высокую адгезию фторопластового к стальной поверхности. Сравнительные испытания эпоксидного и фторопластового покрытия на прочность при растяжении (микрофотография покрытий после испытания представлена на рисунке 9) и изгибную прочность показали большую эластичность фторопластовых покрытий. Большая ударпрочность и эластичность фторопластовых покрытий может позволить повысить надёжность и срок службы эксплуатации магистральных газопроводов с внутренним покрытием. Более высокие механические свойства фторопластовых покрытий обусловлены внутренним составом и строением полимера, которые определяют меньшую склонность к накоплению внутренних напряжений в покрытии.

Кроме этого, фторопластовое покрытие выдержало испытание на стойкость к изменению гидравлического и газового давления, что позволяет судить о возможности его применения в качестве внутреннего покрытия газопроводов. На рисунке 10 представлена поверхность покрытия после 10 циклов испытаний на стойкость к изменению газового давления.

Результаты испытаний фторопластового покрытия на хладостойкость и ряд защитных свойств (водостойкость, стойкость в растворителе, стойкость к воздействию солевого тумана, испытание

на сплошность электроискровым методом) представлены в таблице 3. На рисунке 11 представлен пример испытаний образцов в камере соляного тумана. Во всех случаях покрытие выдержало испытание и сохранило адгезию 1 балл к поверхности, что свидетельствует о высоких защитных свойствах и хладостойкости фторопластового покрытия. Пример оценки адгезии методом решётчатых надрезов представлен на рисунке 12.

По результатам определения коэффициента эквивалентной шероховатости эпоксидного и фторопластового покрытий установлено, что данные покрытия имеют примерно одинаковый потенциал для обеспечения гидравлической эффективности газопровода, ограниченный толщиной вязкого ламинарного подслоя потока. Оценка потерь давления по длине газопровода при использовании внутреннего гладкостного покрытия, показала снижение потерь давления примерно в 1,5 раза относительно газопровода без покрытия, что особенно актуально при транспортировке этансодержащего газа, транспортировка которого более энергоёмка. На рисунке 13 представлен график потерь давления по длине газопровода при использовании внутреннего гладкостного покрытия и без него.

Таким образом, установлено, что фторопластовое покрытие, нанесённое на стальную поверхность, обработанную по разработанной технологии, обладает необходимым набором свойств для применения в качестве внутреннего гладкостного покрытия магистральных газопроводов в условиях Крайнего Севера и Арктики с целью повышения надёжности их эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлены новые научно-технологические решения по обеспечению адгезионной прочности фторопластовых лакокрасочных покрытий, наносимых на стальную поверхность, обработанную по разработанной специальной технологии подготовки, которые могут использоваться в качестве внутренних гладкостных покрытий магистральных газопроводов для повышения надёжности их работы в условиях Крайнего Севера и Арктики, что

имеет существенное значение для перспективного развития газового комплекса страны.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы.

1. Проведённый научный анализ существующих технических решений в области применения внутренних гладкостных покрытий газопроводов показал, что на данный момент наибольшее распространение получили эпоксидные покрытия, которые характеризуются склонностью к охрупчиванию и растрескиванию при низких температурах. По результатам обзора выбран перспективный вариант гладкостного покрытия на основе фторопластовых полимеров, а также методы подготовки стальной поверхности для обеспечения адгезионной прочности покрытия.

2. Установлена зависимость шероховатости и морфологии стальной поверхности от мощности лазерного луча, его скорости и линиатуры. Показано, что наибольшее влияние на шероховатость и морфологию обработанной стальной поверхности оказывают мощность лазерного излучения, линиатура, а также совместное влияние скорости и линиатуры.

3. Разработана технология предварительной обработки стальной поверхности перед нанесением покрытия, включающая операции лазерной обработки по выбранным режимам и «холодного» фосфатирования для создания развитого микрорельефа поверхности.

4. Установлено, что наилучшие результаты адгезионной прочности достигаются при нанесении фторопластового покрытия на стальную поверхность, обработанную по выбранным режимам лазерной обработки и «холодным» фосфатированием, имеющим состав: Мажеф (соль: марганец, железо, фосфор) (25 г/л), $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (35 г/л), NaF (7 г/л).

5. Рекомендовано применение внутренних гладкостных хладостойких фторопластовых покрытий для магистральных газопроводов, эксплуатируемых в районах Крайнего Севера и Арктики, на основании комплексной оценки физико-механических и защитных свойств (в соответствии с нормативными документами)

фторопластового покрытия на образцах, обработанных при помощи разработанной технологии предварительной подготовки.

6. На основании сравнительной оценки коэффициента эквивалентной шероховатости фторопластового и эпоксидного покрытий установлено, что их гидравлическая эффективность сопоставима и ограничена толщиной вязкого ламинарного подслоя газового потока в трубопроводе. Показано, что применение внутреннего гладкостного покрытия позволяет снизить потери давления на трения газового потока примерно в 1,5 раза, что особенно актуально при транспортировке этансодержащего газа, являющегося ценным сырьём для газохимических производств.

Перспективой дальнейших исследований является проработка технологических аспектов применения разработанной технологии предварительной подготовки поверхности на различных видах сталей для подготовки поверхности трубопровода перед нанесением фторопластового покрытия в качестве внутреннего гладкостного покрытия.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Пряхин, Е.И. Применение внутренних покрытий с целью повышения эффективности транспортировки природного газа и снижения коррозионных повреждений стенки трубопровода / Е. И. Пряхин, **В. А. Азаров**, А. П. Петкова, С. А. Модестова // Нефтегазовое дело. – 2023. – Т. 21, № 6. – С. 236-251. – DOI 10.17122/ngdelo-2023-6-236-251.

2. **Азаров, В. А.** Обеспечение адгезии фторопластового покрытия к стальной подложке / **В. А. Азаров**, Е. И. Пряхин // Дизайн. Материалы. Технология. – 2024. – № 1(73). – С. 160-165. – DOI 10.46418/1990-8997_2024_1(73)_160_165.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Пряхин, Е. И. Повышение адгезии фторопластовых покрытий к стальным поверхностям труб с перспективой их использования в газотранспортных системах / Е. И. Пряхин,

В. А. Азаров // Черные металлы. – 2024. – № 3. – С. 69-75. – DOI 10.17580/chm.2024.03.11.

4. Pryakhin, E. I. Comparative analysis of the use of epoxy and fluoroplastic polymer compositions as internal smooth coatings of the inner cavity of steel main gas pipelines / E. I. Pryakhin, **V. A. Azarov** // CIS Iron and Steel Review. – 2024. – Vol. 28. – pp. 93-98. – DOI 10.17580/cisisr.2024.02.16.

5. Пряхин, Е. И. Исследование защитных свойств фторопластовых полимерных составов на стальных образцах с целью перспективы их применения для внутренних покрытий магистральных газопроводов / Е. И. Пряхин, **В. А. Азаров** // Черные металлы. – 2025. – № 4. – С. 62-66. – DOI 10.17580/chm.2025.04.10.

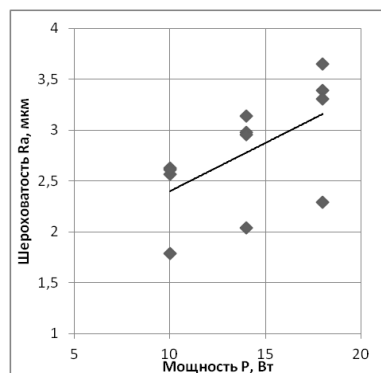
Публикации в прочих изданиях:

6. **Азаров, В. А.** Перспективы использования предварительной лазерной обработки поверхности трубопроводов перед нанесением покрытий / **В. А. Азаров**, М. С. Иванов // Транспорт и хранение углеводородов - 2024 : Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 03–05 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2024. – С. 4-6.

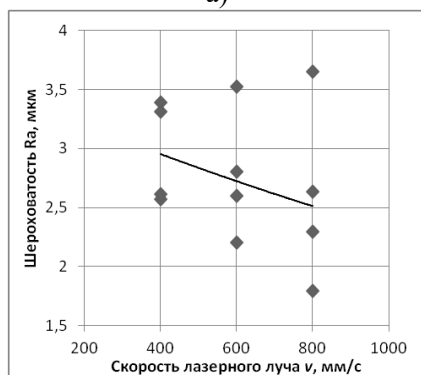
7. **Азаров, В. А.** Возможности повышения адгезии перспективных гладкостных покрытий газопроводов / **В. А. Азаров** // Транспорт и хранение углеводородов : Тезисы докладов V Всероссийской научно-технической конференции молодых учёных, Омск, 26 апреля 2024 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2024. – С. 117-119.

Патент:

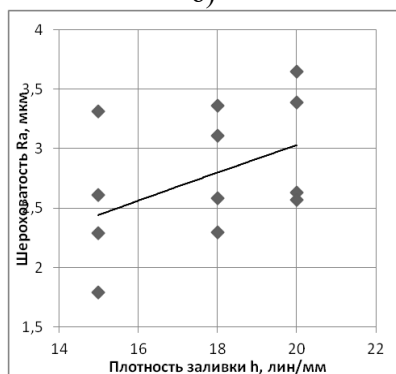
8. Патент № 2828891 Российская Федерация, МПК В23К 26/00 (2014.01); СПК В23К 26/00 (2024.08). Способ подготовки поверхности углеродистых и низколегированных сталей к нанесению полимерных покрытий. Заявка № 2024111457 : заявл. 25.04.2024 : опубл. 21.10.2024 / Е. И. Пряхин, **В. А. Азаров** ; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 11 с.



а)

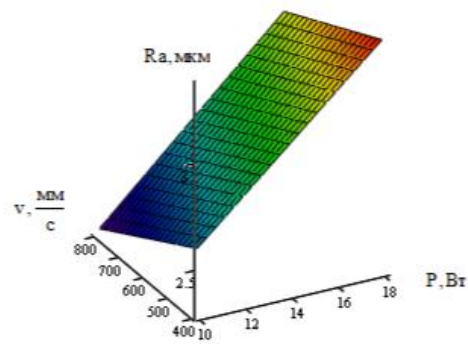


б)

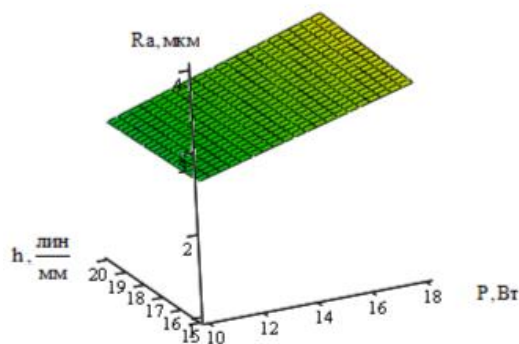


в)

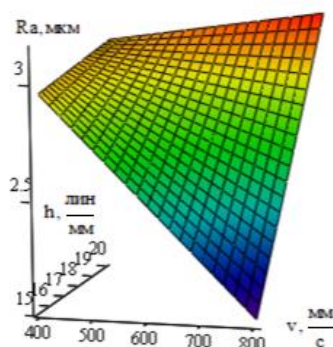
Рисунок 1 – Зависимость шероховатости от: мощности лазерного луча (P) (а), скорости лазерного луча (v) (б), линииатуры (плотности заливки) (h) (в)



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Зависимость шероховатости от: мощности лазерного излучения (P) и скорости лазерного луча (v) (а), мощности лазерного излучения (P) и линииатуры (плотности заливки) (h) (б), скорости лазерного луча (v) и линииатуры (плотности заливки) (h) (в)

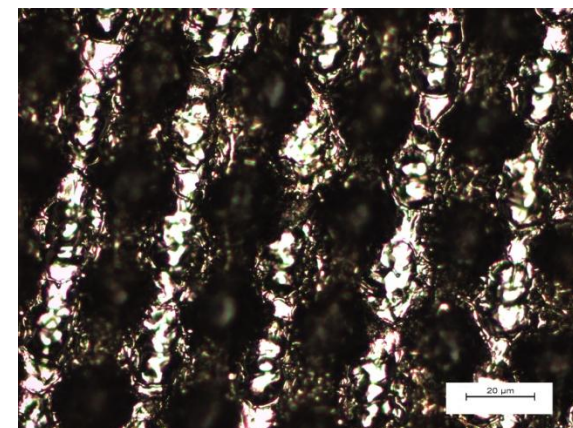


Рисунок 3 – Поверхность стального образца после предварительной лазерной обработки по выбранным режимам, увеличение $\times 20$

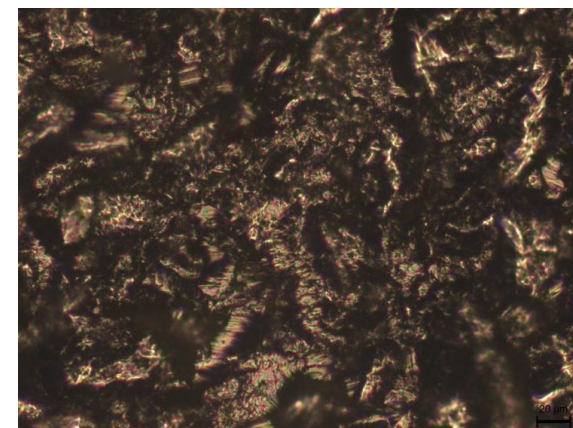


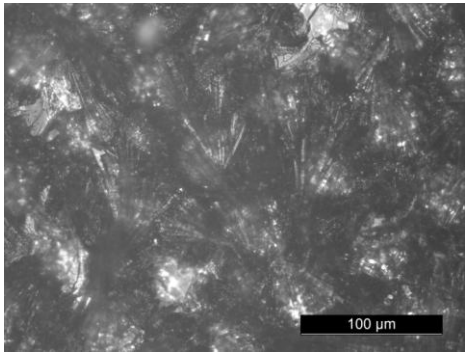
Рисунок 4 – Микрорельеф поверхности, получаемый после пескоструйной обработки, увеличение $\times 20$

Таблица 1 – Результаты формирования фосфатных плёнок при «холодном» фосфатировании изучаемыми составами

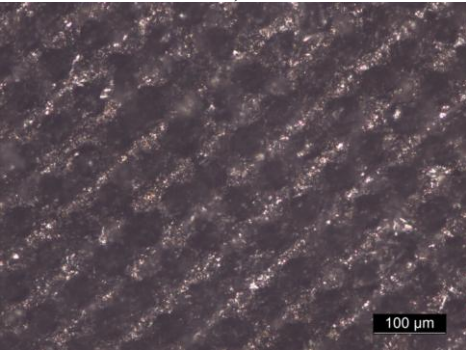
Состав	Средняя величина шероховатости $\bar{R}_a$, мкм	Внешний вид поверхности
Состав №1 (ZnO (19 г/л), H ₃ PO ₄ (40 г/л), NaNO ₂ (1 г/л))	4,12	Равномерная фосфатная плёнка не сформирована
Состав №2 (H ₃ PO ₄ (40 г/л), Zn(NO ₃) ₂ •6H ₂ O (200 г/л), Na ₂ SO ₄ (8 г/л), ZnO (15 г/л))	5,22	Формирование равномерной фосфатной плёнки
Состав №3 (Мажеф (соль: марганец, железо, фосфор) (45 г/л); Zn(NO ₃) ₂ •6H ₂ O (65 г/л); NaNO ₃ (3 г/л))	4,76	Формирование равномерной фосфатной плёнки
Состав №4 (Мажеф (соль: марганец, железо, фосфор) (25 г/л), Zn(NO ₃) ₂ •6H ₂ O (35 г/л), NaF (7 г/л))	6,58	Формирование равномерной фосфатной плёнки

Таблица 2 – Результаты измерения адгезии фторопластового покрытия методом отрыва

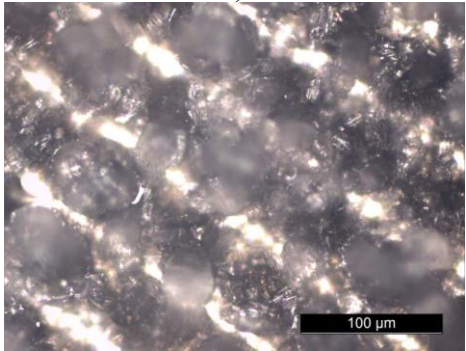
Вид обработки	$\bar{R}_a$, мкм	Среднее усилие отрыва, МПА	Средняя площадь отрыва покрытия от пластины, %
Абразивно-обработанный образец (необработанный разработанной технологией)	0,74	4,65	80-90
Предварительная лазерная обработка по выбранным режимам + фосфатирование составом №2	5,22	8,32	75-80
Предварительная лазерная обработка по выбранным режимам + фосфатирование составом №3	4,76	7,45	65-75
Предварительная лазерная обработка по выбранным режимам + фосфатирование составом №4	6,58	8,71	40-60



а)

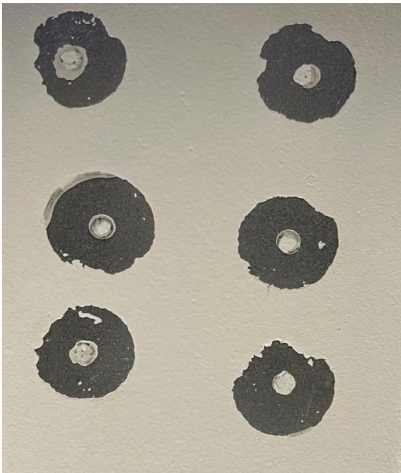


б)

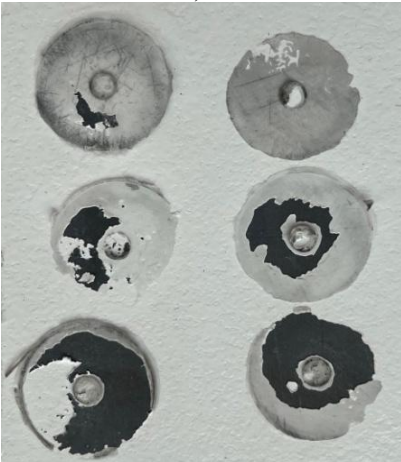


в)

Рисунок 5 – Микрорельеф поверхности после фосфатирования составом №2, увеличение x20 (а); микрорельеф поверхности после фосфатирования составом №3, увеличение x10 (б); микрорельеф поверхности после фосфатирования составом №3, увеличение x20 (в)



а)



б)

Рисунок 6 – Поверхности образцов после испытания на адгезию методом отрыва: образце после фосфатирования составом №2 (а) и образце после фосфатирования составом №4 (б)

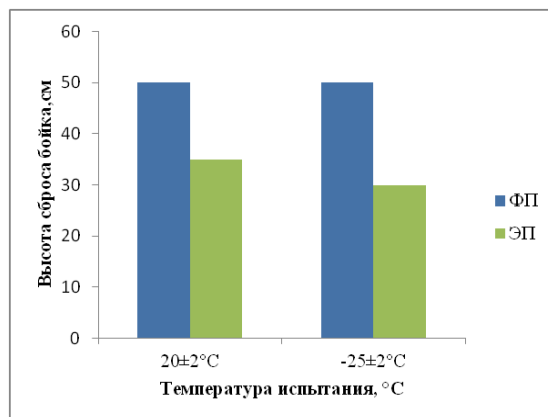
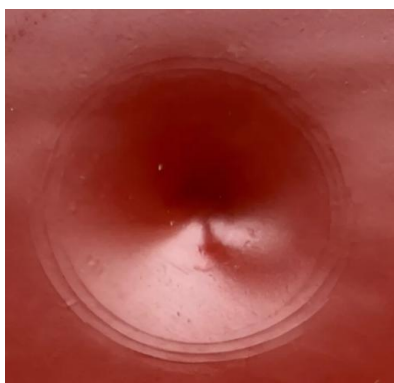
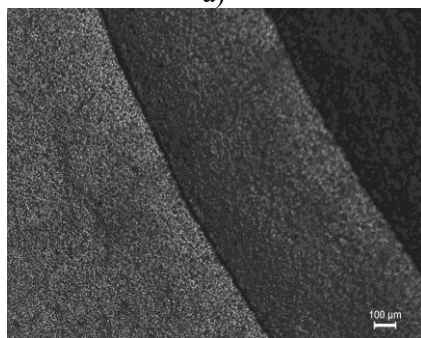


Рисунок 7 – Результаты измерения ударной прочности исследуемых покрытий

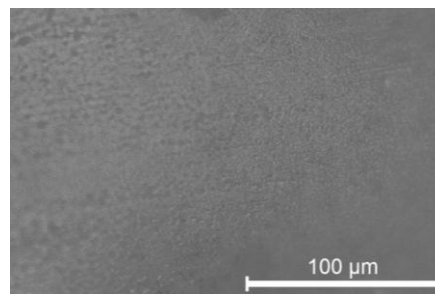


а)

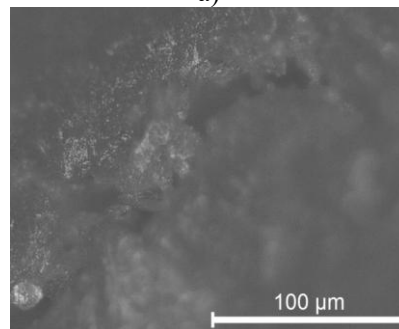


б)

Рисунок 8 - Повреждение эпоксидного покрытия после удара на макрофотографии (а) и при увеличении x10 (б)



а)



б)

Рисунок 9 - Микрофотографии покрытий после испытания на растяжение: микрофотография фторопластового покрытия, увеличение x20 (а) и микрофотография эпоксидного покрытия, увеличение x20 (б)



а)



б)

Рисунок 10 – Макрофотография участка поверхности образца после 10 циклов испытаний (а) и фотография поверхности образца после 10 циклов испытаний при увеличении x10 (б)



Рисунок 11 – Образцы в камере соляного тумана после испытания

Таблица 3 - Результаты испытаний на защитные свойства и стойкость к воздействию низких температур (хладостойкость)

Вид испытания	Результат	Балл адгезии
Испытание на водостойкость в течение 240 часов	Отсутствие отслоений, вздутий	1 балл
Испытание на стойкость к воздействию растворителя в течение 2 часов	Отсутствие отслоений, вздутий	1 балл
Испытание на стойкость к воздействию соляного тумана в течение 240 часов	Отсутствие отслоений, вздутий	1 балл
Испытание на сплошность электроискровым методом	Отсутствие пропусков в покрытии	Не измерялась
Испытание на воздействие низких температур	Отсутствие отслоений, вздутий	1 балл

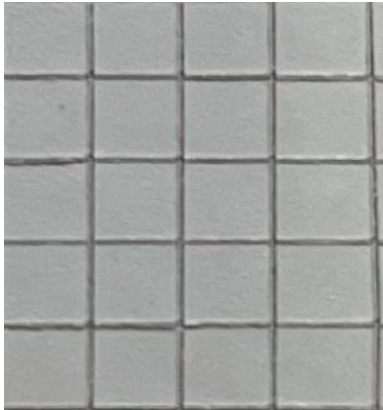


Рисунок 12 - Пример оценки адгезии методом решётчатого надреза после выдержки образца в воде в течение 240 часов

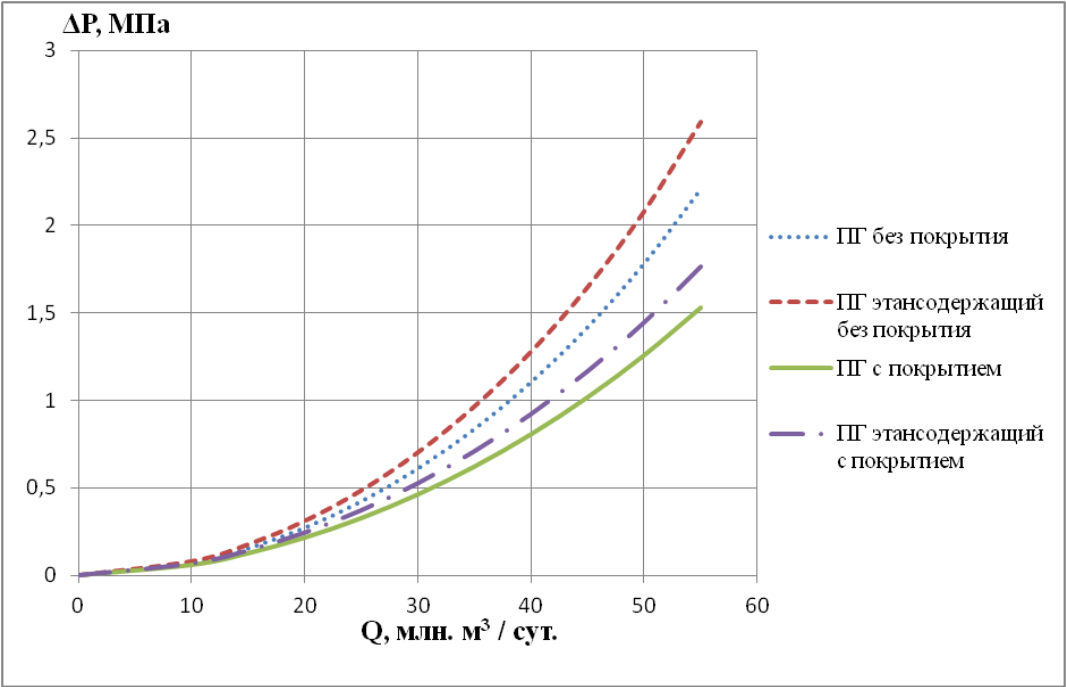


Рисунок 13 - График изменения потерь давления при выбранной длине газопровода при росте производительности: объёмный расход – Q, млн. м³/сут.; потери давления – ΔP, МПа