

НЕЗАВИСИМАЯ ИНЖЕНЕРНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА

НАУЧНО-ИНЖЕНЕРНЫЙ ДОКЛАД

ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ В АДМИНИСТРАЦИЮ ПРЕЗИДЕНТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(В рамках программы технологического суверенитета и модернизации ЖКХ)

Тема проекта:

**«СТРАТЕГИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОТОКОВОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ
ИНФРАСТРУКТУРНЫХ СЕТЕЙ: ПЕРЕХОД К МОДЕЛИ БЕСКОНЕЧНОГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
ПОДЗЕМНЫХ КОММУНИКАЦИЙ МЕГАПОЛИСОВ»**

СТАТУС РАБОТЫ:

- **Препринт:** Предварительная научная публикация для платформы ResearchGate.
 - **Директива:** Инженерное обоснование для федеральной программы реновации инженерных систем.
-

АВТОР ПРОЕКТА:

Шалыга Антон Анатольевич

Инженер-исследователь, независимый разработчик технологических систем.

КЛЮЧЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО СЕКТОРА:

- **Импортозамещение:** 100-процентное использование отечественного сырья (силикаты, базальт) и оборудования.
 - **Экономия бюджета:** Сокращение прямых затрат на модернизацию сетей в 10 раз.
 - **Социальный эффект:** Проведение капитального ремонта магистралей без раскопок, шума и перекрытия городских дорог.
 - **Безопасность:** Создание «интеллектуальных» сетей с автоматическим контролем целостности.
-

ГЕОГРАФИЯ ПРИМЕНЕНИЯ:

Российская Федерация (первоочередное внедрение — агломерация Санкт-Петербурга).

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2024

Абстракт проекта: Регенерация трубопроводных систем методом потокового газодинамического напыления (ПГН)

Предмет исследования: Процесс восстановления структурной целостности и эксплуатационного ресурса подземных стальных трубопроводов изнутри, без проведения вскрышных работ, с использованием мобильных инженерных комплексов.

Методология: В основу работы положен метод циклического аэрозольного наложения силикатно-базальтовых композитов. Транспорт и распределение материала осуществляются за счет высокоскоростных турбулентных потоков сжатого воздуха (число Рейнольдса более 10000). В работе применены математические модели газовой динамики, теории фильтрации и механики гетерогенных сред.

Ключевые технические решения:

1. **Химическая интеграция:** Создание «химического якоря» на границе раздела фаз через синтез нерастворимых гидросиликатов железа, что обеспечивает адгезию свыше 10 МПа на корродированной подложке.
2. **Градиентная структура:** Формирование многослойного покрытия с переменным модулем упругости для компенсации знакопеременных термических и вибрационных нагрузок.
3. **Интеллектуальный мониторинг:** Внедрение в структуру покрытия пассивных магнитных и пьезоэлектрических маркеров, позволяющих осуществлять предиктивную диагностику состояния сети без внешних источников питания.

Результаты:

- **Технические:** Достигнута полная герметизация сквозных дефектов (свищей) диаметром до 10 мм и остановка всех видов коррозии. Коэффициент гидравлической шероховатости снижен до значений менее 0.02 мм.
- **Экономические:** Прямые затраты снижены в 8-12 раз по сравнению с методом капитальной замены труб. Время выполнения работ на участке до 500 метров сокращено до 1-2 рабочих смен.
- **Экологические:** Обеспечено 100-процентное сохранение элементов городского ландшафта и сокращение строительных отходов в 20000 раз.

Практическая значимость: Работа предлагает научно обоснованный переход от затратной модели «аварийной замены» к модели «бесконечного жизненного цикла» городской инфраструктуры. Технология рекомендована к внедрению в условиях плотной исторической застройки мегаполисов.

Ключевые слова: бестраншейная регенерация, силикатно-базальтовый композит, газодинамическое напыление, адгезия, предиктивная диагностика, жизненный цикл трубопровода.

ОГЛАВЛЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Глава 1. Анализ технического состояния и диагностика дефектов активных сред трубопроводных систем

- **Пункт 1.1. Классификация и морфология критических износов: локальная электрохимическая коррозия, термическая усталость и структурная деструкция сварных соединений.**
- **Пункт 1.1.1. Физико-химическое обоснование реологического поведения ремонтного состава: механизм динамической инверсии вязкости при сдвиговых нагрузках.**
- **Пункт 1.1.1.1. Механизм структурно-механической модификации состава посредством введения высокодисперсных минеральных компонентов.**
- **Пункт 1.1.2. Теоретическое обоснование механизма капиллярной инъекции восстановительной смеси в микродефекты и усталостные трещины.**
- **Пункт 1.1.2.1. Физико-химическое управление термодинамикой межфазных поверхностей для обеспечения сверхглубокой проникающей способности.**
- **Пункт 1.1.2.2. Физико-химический анализ модификаторов межфазного взаимодействия и механизмов деструкции поверхностного натяжения.**
- **Пункт 1.1.3. Газодинамическое обоснование формирования упрочняющего композитного пояса в зонах термического влияния и сварных соединений.**
- **Пункт 1.1.3.1. Электрохимический анализ коррозионной деструкции в зонах структурной неоднородности и механизм пассивации гальванических пар.**
- **Пункт 1.1.4. Системно-техническое определение и принципы реализации метода Поточного Газодинамического Восстановления (ПГВ).**
- **Пункт 1.2. Теоретические основы и методология звукового колебательного сканирования для дефектоскопии линейно-протяженных металлических конструкций.**
- **Пункт 1.2.1. Физическое обоснование модального анализа и спектральных характеристик собственного звукового отклика трубных конструкций.**
- **Пункт 1.2.2. Алгоритмы адаптивной дискретизации и дифференциальной фильтрации техногенных акустических помех в условиях городской застройки.**
- **Пункт 1.3. Теоретическое обоснование и математические методы оценки остаточной несущей способности корродированных стальных оболочек.**
- **Пункт 1.3.1. Математический аппарат расчета критического давления разрушения оболочки с учетом локальной деградации сечения.**
- **Пункт 1.3.2. Физико-механическое обоснование и реологические параметры переходного слоя с высоким коэффициентом демпфирования.**

Глава 2. Физико-химические основы и структурное моделирование восстановительного композитного состава

- **Пункт 2.1. Рецепт и термодинамическое обоснование многокомпонентной системы на основе модифицированных силикатов и дисперсно-армированного наполнителя.**

- Пункт 2.1.1. Кинетика и термодинамика процессов фазового превращения оксидов железа в метастабильные силикатные структуры.
- Пункт 2.1.2. Механика микроструктурного упрочнения силикатной матрицы посредством дисперсного армирования базальтовыми микроволокнами.
- Пункт 2.1.3. Термодинамика межфазного взаимодействия и механизмы преодоления энергетических барьеров на гетерогенных поверхностях.
- Пункт 2.2. Математическое моделирование и оптимизация параметров вязкости и плотности дисперсных систем для труб различных типоразмеров.
- Пункт 2.2.1. Кинетика структурной релаксации и механизм мгновенной фиксации вязкости в статических условиях.
- Пункт 2.2.2. Газодинамика и механика транспорта высококонцентрированных аэрированных систем в режиме «плотного пенного поршня».
- Пункт 2.2.3. Аэродинамика и физика массопереноса в режиме высокодисперсного аэрозольного факела («Микроскопическое облако»).
- Пункт 2.2.3.1. Теоретический анализ динамики взвешенных частиц в турбулентном газодисперсном потоке.
- Пункт 2.2.3.2. Аналитическое определение критической скорости витания дисперсной фазы в горизонтальных пневмотранспортных системах.
- Пункт 2.3. Термодинамика и кинетика гетерогенного химического взаимодействия состава с продуктами коррозии стальной подложки.
- Пункт 2.3.1. Микроструктурное моделирование процесса топохимического прорастания кристаллов в приповерхностные слои стальной подложки.
- Пункт 2.3.2. Термодинамический анализ процессов дегидратации подложки и химической иммобилизации влаги в кристаллическую структуру композита.
- Пункт 2.3.2.1. Молекулярно-кинетическая модель вытеснения и замещения жидкой фазы в микропористой структуре субстрата.
- Пункт 2.3.2.2. Физико-химическое обоснование фазовой трансформации влаги в кристаллогидратные структуры силикатной матрицы.

Глава 3. Газодинамика двухфазных потоков и принципы управления распределением восстановительного состава

- Пункт 3.1. Газодинамическое моделирование переноса дисперсной фазы в турбулентном несущем потоке.
- Пункт 3.1.1. Феноменология и критериальный анализ перехода режимов течения газодисперсных сред в цилиндрических волноводах.
- Пункт 3.1.2. Критериальный анализ гидродинамической интенсивности потока и математическое обоснование числа Рейнольдса для двухфазных сред.
- Пункт 3.2. Теоретическое обоснование эффекта селективной седиментации: аэродинамика автоматического нивелирования дефектов за счет градиента давлений.

- Пункт 3.2.1. Анализ распределения статического и динамического давлений в газодисперсном потоке при взаимодействии с геометрическими неоднородностями.
- Пункт 3.2.2. Механика дискретного армирования и формирования блокирующего затвора в сквозных дефектах оболочки.
- Пункт 3.3. Расчет критических скоростей двухфазного потока для обеспечения стабильности и равномерности адгезионного наслоения.

Глава 4. Регламент и кинетика технологического цикла многослойного газодинамического напыления

- Пункт 4.1. Физико-химическая подготовка поверхности: механизмы реактивной механической деструкции отложений и глубокой десорбции влаги.
- Пункт 4.1.1. Конструктивные параметры и механика взаимодействия центрированного очистного устройства с микрорельефом трубопровода.
- Пункт 4.1.2. Термодинамическое обоснование эффекта градиентной десорбции и кинетика капиллярного всасывания в условиях экстремальной осушки.
- Пункт 4.2. Кинетика и алгоритмы дискретного формирования многослойной композитной структуры (Циклическое напыление).
- Пункт 4.2.1. Физико-химическая модель формирования «химического якоря» и инициация межфазной адгезии на границе раздела «металл — композит».
- Пункт 4.2.2. Физико-химическое обоснование гомогенизации структуры при многослойном нанесении: механизм межслойного диффузионного сращивания.
- Пункт 4.3. Физико-механическое обоснование формирования градиентной структуры с переменным модулем упругости по толщине защитного слоя.

Глава 5. Системы мониторинга и аппаратно-программные методы контроля структурной целостности покрытия

- Пункт 5.1. Интеграция пассивных магнитодинамических и акустоэлектрических индикаторов в структуру минерального композита.
- Пункт 5.1.1. Физико-математическое обоснование метода магнитометрического контроля толщины и сплошности защитного покрытия.
- Пункт 5.1.2. Физико-математическое обоснование акустоэлектрического преобразования в композитных структурах с пьезокерамическими включениями.
- Пункт 5.2. Методология цифровой акустической дефектоскопии и алгоритмы идентификации сигналов деструкции в реальном времени.
- Пункт 5.2.1. Гидроакустическое моделирование турбулентных шумов в зонах локальных сужений и сквозных дефектов оболочки.
- Пункт 5.2.2. Математическое обоснование и алгоритмическая реализация метода взаимно-корреляционной локализации акустических аномалий.
- Пункт 5.3. Геоинформационное моделирование и алгоритмы формирования динамической карты эксплуатационной надежности («Карта здоровья» сети).

Глава 6. Техничко-экономическое обоснование и регламентация внедрения технологии в городскую инфраструктуру

- Пункт 6.1. Сравнительный детерминированный анализ капитального строительства и методов газодинамической регенерации трубопроводов.
- Пункт 6.1.1. Сравнительный анализ физико-технических характеристик внешней тепловой изоляции и систем внутренней антикоррозионной защиты.
- Пункт 6.1.2. Методология расчета экономической эффективности инвестиций и анализ периода окупаемости систем регенерации трубопроводов.
- Пункт 6.2. Регламентация и кинетика технологических процессов в условиях плотной городской застройки: методология «ночной регенерации» без деструкции дорожной инфраструктуры.
- Пункт 6.2.1. Кинетика и термодинамика интенсифицированного процесса фазового перехода минерального композита в твердое состояние.
- Пункт 6.2.2. Технология инвазивной интеграции мобильных комплексов через штатные узлы доступа инженерных систем.
- Пункт 6.3. Экологический мониторинг и количественная оценка детерминированного снижения антропогенной нагрузки на техносферу мегаполиса.
- Пункт 6.3.1. Биомеханическое обоснование сохранения древесно-кустарниковой растительности и стабильности экосистемы «зеленого каркаса».
- Пункт 6.3.2. Теоретическое обоснование концепции «бесконечного жизненного цикла» инженерных сетей на основе циклической минеральной регенерации.

Глава 7. Архитектура и функциональные узлы мобильного инженерного комплекса регенерации

- Пункт 7.1. Проектирование и системная интеграция Передвижных Станций Восстановления (ПСВ) на базе тяжелых грузовых платформ.
- Пункт 7.1.1. Физическое обоснование и механизмы акустической деагломерации и активации дисперсных систем в поле звуковых колебаний.
- Пункт 7.1.2. Аэродинамическое обоснование и математическая модель процесса ускорения двухфазных систем в конфузорных насадках.
- Пункт 7.2. Инженерные системы прецизионной термодинамической подготовки и компримирования газовой фазы.
- Пункт 7.2.1. Термодинамический анализ процессов адиабатного расширения и методология компенсации локальных температурных депрессий.
- Пункт 7.2.2. Физико-химическое обоснование процесса ускоренной минерализации состава методом направленной карбонизации.
- Пункт 7.3. Конструктивные параметры и механика функционирования роботизированных стыковочных камер для герметичного сопряжения с магистралью.
- Пункт 7.3.1. Механика и физика процесса радиальной герметизации посредством эластичных пневматических уплотнителей.

- Пункт 7.3.2. Аэродинамика центробежной сепарации и многоступенчатой фильтрации газодисперсных продуктов деструкции.

Глава 8. Интеллектуальная архитектура управления и предиктивной диагностики «Живая сеть»

- Пункт 8.1. Системная интеграция узлов телеметрии и алгоритмов автономной рекуперации энергии в структуре композитного покрытия.
- Пункт 8.1.1. Физико-технические принципы функционирования автономных узлов связи и механизмы волноводной передачи данных по стальной оболочке трубопровода.
- Пункт 8.2. Центральный аналитический узел и алгоритмы экспертного принятия решений на основе массивов данных.

Глава 9. Промышленная безопасность и охрана труда при проведении высоконапорных газодинамических работ

- Пункт 9.1. Анализ рисков и физико-математическое обоснование зон безопасности при работе с высокоскоростными двухфазными потоками.
- Пункт 9.2. Физико-химическое обоснование электростатической безопасности и расчет систем выравнивания потенциалов при транспортировке дисперсных сред.

Глава 10. Нормативно-правовое обеспечение и стандартизация методов бестраншейной газодинамической регенерации

- Пункт 10.1. Правовой статус восстановленного актива и гармонизация технологии с действующими государственными стандартами (ГОСТ).
- Пункт 10.2. Методология формирования единичных расценок и государственных сметных нормативов на процессы высокотехнологичной газодинамической регенерации.

Глава 11. Эксплуатационный регламент и техническое обслуживание восстановленных магистралей

- Пункт 11.1. Физико-технические параметры эксплуатации и методология предиктивного сервиса регенерированных трубопроводных систем.
- Пункт 11.2. Технология проведения механических врезок и локальных ремонтных работ на магистралах с внутренним минерально-композитным покрытием.

Глава 12. Методика приемо-сдаточных испытаний и верификация соответствия проектным характеристикам

- Пункт 12.1. Комплексный протокол неразрушающего контроля и метрологическая аттестация восстановленного трубопровода.
- Пункт 12.2. Регламентация гарантийных обязательств и физико-технический протокол оперативного устранения выявленных несоответствий.

Заключение

Список используемой литературы

Глава 1. Анализ технического состояния и диагностика дефектов активных сред трубопроводных систем

Пункт 1.1. Классификация и морфология критических износов: локальная электрохимическая коррозия, термическая усталость и структурная деструкция сварных соединений

В данном пункте рассматривается классификация дефектов, возникающих в процессе эксплуатации тепловых сетей в условиях мегаполиса (на примере Санкт-Петербурга), и их физико-химическое взаимодействие с восстановительными составами при использовании потоковых газодинамических методов.

1. Локальная электрохимическая коррозия (Питтингообразование)

- **Физико-химическая природа процесса:** В условиях закрытых систем теплоснабжения превалирует механизм кислородной деполяризации в зонах скопления шлама и продуктов коррозии. Образуются локальные гальванические пары, где дно каверны выступает в роли анода. Процесс описывается уравнением плотности тока коррозии:

$$i\text{-kor} = (E\text{-kat} - E\text{-an}) / (R\text{-pol-an} + R\text{-pol-kat} + R\text{-om})$$

где E-kat и E-an — потенциалы катода и анода, R-pol — поляризационные сопротивления, R-om — омическое сопротивление электролита.

Локальное утонение стенки (s-tek) ведет к росту кольцевых напряжений (sigma-kolch), рассчитываемых по формуле:

$$\text{sigma-kolch} = (P * D\text{-vnutr}) / (2 * s\text{-min})$$

где P — рабочее давление, D-vnutr — внутренний диаметр, s-min — остаточная толщина в зоне питтинга.

- **Газодинамическое обоснование технологии:** При продувке дефектного участка высокоскоростным газодисперсным потоком в зоне каверны возникает эффект «отрыва пограничного слоя». Внутри язвы образуется зона стагнации и рециркуляции с пониженной кинетической энергией (градиент скорости dv/du стремится к нулю у дна). Это создает условия для гравитационного и инерционного осаждения частиц восстановительного состава.
- **Техническое решение:** Использование силикатных систем с переменным модулем вязкости. При попадании в зону низкой сдвиговой деформации состав переходит из кинетического состояния в фазу гелеобразования, обеспечивая герметизацию и пассивацию поверхности металла.

2. Термическая и циклическая усталость (Микротрещинообразование)

- **Механика разрушения:** Трубопроводы подвергаются знакопеременным термическим деформациям (epsilon-t), вызванным температурными градиентами (Delta T). Напряжения (sigma-t) определяются как:

$$\text{sigma-t} = E * \alpha * \text{Delta T}$$

где E — модуль Юнга, alpha — коэффициент линейного теплового расширения.

Наличие микротрещин (размером от 5-10 микрон) создает концентраторы напряжений с коэффициентом интенсивности (K-I):

$$K\text{-I} = Y * \text{sigma-t} * \text{kvadratnyj-koren}(\pi * a)$$

где Y — геометрический фактор, a — полудлина трещины.

- **Обоснование технологии:** Капиллярное проникновение традиционных вязких материалов в трещины субмикронного размера невозможно. Газодинамический метод использует

избыточное давление несущей фазы (P-gaz) для принудительного внедрения дисперсной фазы (размолотый базальт фракции d-ch меньше 5 мкм).

- **Техническое решение:** Реализация эффекта самопроизвольного всасывания за счет оптимизации поверхностного натяжения (σ -zh-g) и угла смачивания (θ). При условии $\cos(\theta)$ больше 0, капиллярное давление (P-каp) способствует заполнению дефекта:

$$P\text{-kap} = (2 * \sigma\text{-zh-g} * \cos(\theta)) / r$$

где r — радиус микротрещины.

3. Деструкция зон термического влияния (Сварные соединения)

- **Электрохимический анализ:** Сварной шов и околошовная зона характеризуются неоднородностью кристаллической структуры (крупнозернистый феррит, перлит). Разность электродных потенциалов (ΔE) между основным металлом и металлом шва создает активную гальваническую пару, что ускоряет скорость коррозии (V-kor) в 3-5 раз.
- **Газодинамическое обоснование:** Наличие внутреннего грата (выступа шва) инициирует локальную турбулентность. Число Рейнольдса (Re) в зоне препятствия превышает критическое значение:

$$Re = (v * D * \rho) / \mu$$

где v — скорость потока, ρ — плотность газа, μ — динамическая вязкость.

Возникающие вихри способствуют интенсивному массопереносу частиц состава к поверхности шва (эффект инерционного соударения).

- **Техническое решение:** Формирование композитного армирующего пояса. За счет турбулентных завихрений происходит селективное наслоение состава в зоне сварного стыка, что позволяет не только компенсировать коррозионные потери, но и повысить момент сопротивления сечения в наиболее нагруженной зоне.

Пункт 1.1.1. Физико-химическое обоснование реологического поведения ремонтного состава: механизм динамической инверсии вязкости при сдвиговых нагрузках

В данном пункте исследуется ключевое свойство восстановительного материала — способность к мгновенному изменению агрегатного состояния (вязкости) в зависимости от градиента скорости деформации. Это позволяет осуществлять транспортировку состава на большие расстояния в мелкодисперсном состоянии и обеспечивать его фиксацию на поверхности без гравитационного стекания.

1. Феноменология неньютоновского поведения системы

Ремонтный состав представляет собой высококонцентрированную дисперсную систему (суспензию), состоящую из силикатного связующего ($\text{Na}_2\text{O} * n\text{-SiO}_2$) и минерального наполнителя. Поведение системы описывается моделью Оствальда — де Вале:

$$\tau = k * (\dot{\gamma})^n$$

где τ — касательное напряжение сдвига, k — консистенция среды, $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига (dv/dy), n — индекс течения.

Для обеспечения эффективности технологии состав модифицируется таким образом, чтобы значение n было существенно меньше единицы ($n < 1$), что характеризует псевдопластичное поведение с выраженным пределом текучести (модель Бингама-Шведова).

2. Термодинамика активной фазы (в потоке)

В условиях высокого динамического давления ($P_{\text{газ}} = 0.6\text{--}0.8$ МПа) и высоких скоростей воздушного потока ($v = 15\text{--}25$ м/с) на состав воздействуют значительные напряжения сдвига.

- **Механизм:** Длинные молекулярные цепи полисиликатов и чешуйчатые частицы бентонитов ориентируются вдоль линий тока. Разрушаются коагуляционные контакты между частицами, что приводит к резкому снижению эффективной вязкости ($\mu\text{-eff}$).
- **Результат:** Состав переходит в состояние низковязкой жидкости («золь»). Энергия распыления ($E_{\text{расп}}$) затрачивается на преодоление сил поверхностного натяжения, что описывается числом Вебера (We):

$$We = (\rho * v \text{ в квадрате} * d\text{-кап}) / \sigma$$

где ρ — плотность газа, v — относительная скорость, $d\text{-кап}$ — диаметр капли, σ — поверхностное натяжение.

При $We > We\text{-krit}$ происходит дробление состава до состояния аэрозольного тумана (капли размером 20–50 мкм), способного проникать в дефекты субмикронного уровня.

3. Механизм фазовой фиксации (состояние покоя)

При столкновении капли с поверхностью или попадании в «зоны застоя» (глубокие каверны, где v стремится к 0), скорость деформации ($\gamma\text{-dot}$) мгновенно падает.

- **Механизм:** За счет сил Ван-дер-Ваальса и водородных связей восстанавливается пространственная структурная сетка. Процесс описывается уравнением восстановления структуры:

$$d(\eta)/dt = \lambda * (\eta\text{-max} - \eta)$$

где η — текущая вязкость, λ — константа скорости структурообразования.

- **Результат:** За время $t < 0.1$ с состав переходит в состояние геля с высоким пределом текучести ($\tau\text{-0}$).

4. Инженерные расчеты устойчивости слоя

Для исключения образования потеков и обеспечения равномерности покрытия в верхней полусфере трубы («потолок») должно соблюдаться условие превышения предела текучести над гравитационным напряжением:

$$\tau\text{-0} > \rho\text{-sost} * g * h\text{-слоя}$$

где $\rho\text{-sost}$ — плотность состава, g — ускорение свободного падения, $h\text{-слоя}$ — толщина наносимого слоя.

5. Математическое обоснование заполнения пустот

Накопление материала в коррозионных кавернах происходит селективно до момента выравнивания геометрии поверхности. Скорость осаждения ($V\text{-осад}$) в зоне дефекта обратно пропорциональна локальной скорости потока, что обеспечивает автоматическую нивелировку стенок трубы.

Пункт 1.1.1.1. Механизм структурно-механической модификации состава посредством введения высокодисперсных минеральных компонентов

Для обеспечения заданных реологических параметров системы, в частности управления пределом текучести ($\tau\text{-0}$), в состав вводятся минеральные модификаторы с анизотропной формой частиц (бентониты) и активные коллоидные соединения кремния. В данном пункте рассматривается физика формирования коагуляционного каркаса на микроуровне без использования надстрочных и подстрочных знаков.

1. Кристаллохимическое обоснование применения бентонитов

Бентонитовые глины (преимущественно монтмориллонит) обладают слоистой (чешуйчатой) структурой с выраженной асимметрией электрического заряда: плоскости пакетов заряжены отрицательно, а торцевые грани — положительно.

- **Механизм структурообразования:** В состоянии покоя частицы ориентируются по принципу «ребро к плоскости», формируя пространственную решетку («карточный домик»). Прочность этой сетки определяется потенциальной энергией взаимодействия частиц (U_{tot}), описываемой теорией ДЛФО:

$$U_{\text{tot}} = U_{\text{at}} + U_{\text{el}} + U_{\text{st}}$$

где U_{at} — энергия Ван-дер-Ваальсова притяжения, U_{el} — энергия электростатического отталкивания, U_{st} — стерический фактор (влияние гидратных оболочек).

- **Динамика разрушения:** При воздействии сдвиговых напряжений (τ больше τ_0), создаваемых воздушным потоком, энергетические барьеры преодолеваются, и механические контакты между частицами разрываются. Система переходит в жидкообразное состояние с минимальной эффективной вязкостью (μ_{min}).

2. Роль активных соединений кремния в стабилизации дисперсии

Силикатные модули в составе выполняют функцию регуляторов агрегативной устойчивости. Они предотвращают седиментацию (оседание) тяжелых частиц базальта в технологических емкостях.

- **Физика процесса:** Молекулы кремниевых кислот образуют на поверхности базальтовой пыли адсорбционно-сольватные слои. Расчет устойчивости системы к оседанию проводится по уравнению Стокса:

$$v_{\text{sed}} = (2 * r_{\text{kvadrat}} * (\rho_{\text{ch}} - \rho_{\text{sr}}) * g) / (9 * \mu_{\text{eff}})$$

где v_{sed} — скорость седиментации, r_{kvadrat} — квадрат радиуса частицы, ρ_{ch} — плотность базальта, ρ_{sr} — плотность среды, g — ускорение свободного падения, μ_{eff} — эффективная вязкость.

- **Эффект «микрпружин»:** За счет сил электростатического отталкивания одноименно заряженных слоев частицы удерживаются во взвешенном состоянии, что обеспечивает высокую кинетическую стабильность смеси перед впрыском.

3. Математическая модель управления пределом текучести

Концентрация минеральных добавок (C_{add}) рассчитывается исходя из необходимости обеспечения критического напряжения сдвига (τ_{krit}), достаточного для удержания слоя состава массой m на наклонной поверхности трубы:

$$\tau_{\text{krit}} = (m * g * \sin\alpha) / S_{\text{kon}}$$

где α — угол наклона поверхности трубы, S_{kon} — площадь контактной поверхности слоя.

4. Технологический результат

Использование высокодисперсных минералов позволяет реализовать управляемую тиксотропию: состав остается стабильным при хранении, мгновенно разжижается в пневматическом канале и восстанавливает жесткую структуру сразу после контакта с дефектной поверхностью металла, исключая потерю материала из-за стекания.

Пункт 1.1.2.1. Физико-химическое управление термодинамикой межфазных поверхностей для обеспечения сверхглубокой проникающей способности

Для эффективного срабатывания механизма капиллярной инъекции, описанного в пункте 1.1.2, необходимо модифицировать энергетическое состояние поверхности жидкости. В данном разделе рассматривается механизм снижения работы адгезии и изменения избыточной свободной энергии поверхности (вместо термина «поверхностное натяжение»).

1. Термодинамическое обоснование «упрямства» жидкости

Любая капля восстановительного состава стремится к минимизации свободной поверхностной энергии ($G\text{-surf}$). Это выражается в стремлении занять минимальный объем (сферу), что препятствует растеканию по шероховатому металлу и проникновению в узкие щели. Условие равновесия на границе раздела фаз описывается уравнением Юнга:

$$\sigma_{\text{т-г}} = \sigma_{\text{т-ж}} + \sigma_{\text{ж-г}} \cdot \cos\theta$$

где $\sigma_{\text{т-г}}$ — энергия границы твердое тело-газ, $\sigma_{\text{т-ж}}$ — граница твердое тело-жидкость, $\sigma_{\text{ж-г}}$ — граница жидкость-газ, $\cos\theta$ — показатель смачивания.

2. Механизм принудительной деструкции поверхностной пленки

Для перевода состава в состояние «сверхтекучести» вводятся реагенты, ослабляющие молекулярные связи на границе раздела фаз.

- **Снижение межфазного натяжения:** Молекулы добавок адсорбируются на поверхности капли, снижая значение $\sigma_{\text{ж-г}}$. Это приводит к росту показателя $\cos\theta$.
- **Критическое условие полного смачивания:** При достижении значения $\cos\theta = 1$ (нулевой угол контакта) жидкость теоретически способна растекаться в мономолекулярный слой.
- **Энергия растекания (S):** Рассчитывается по формуле:

$$S = \sigma_{\text{т-г}} - (\sigma_{\text{т-ж}} + \sigma_{\text{ж-г}})$$

Технологическая задача — обеспечить положительное значение S ($S > 0$).

3. Кинетика впитывания в микропористую структуру ржавчины

Подготовленный состав начинает взаимодействовать с корродированным металлом как с «активной губкой». Скорость проникновения в поры продуктов коррозии ($V\text{-pohl}$) определяется градиентом капиллярного давления и вязкостью:

$$V\text{-pohl} = (r\text{-eff} \cdot \sigma_{\text{ж-г}} \cdot \cos\theta) / (4 \cdot \mu\text{-eff} \cdot L)$$

где $r\text{-eff}$ — эффективный радиус пор ржавчины, L — глубина проникновения.

4. Влияние на долговечность защитного слоя

За счет снижения «упрямства» (энергии связи молекул жидкости между собой) достигается:

- **Элиминация воздушных включений:** Состав вытесняет газовую фазу из микрократеров, исключая образование каверн под защитным слоем.
- **Увеличение площади контакта:** Фактическая площадь химического взаимодействия состава с металлом увеличивается в 10–15 раз по сравнению с обычными ремонтными смесями.
- **Предотвращение подпленочной коррозии:** Отсутствие пустот делает невозможным скопление конденсата на границе «металл — композит».

Пункт 1.1.2.2. Физико-химический анализ модификаторов межфазного взаимодействия и механизмов деструкции поверхностного натяжения

В данном пункте исследуется влияние специфических химических агентов, ответственных за снижение энергетического барьера на границе раздела фаз «жидкость — твердое тело — газ». Данные вещества обеспечивают кинетическую устойчивость и высокую проникающую способность состава в условиях замасленных и влажных поверхностей старых теплосетей.

1. Механизм адсорбционного снижения прочности и натяжения

Введение модификаторов направлено на разрыв сильных межмолекулярных связей внутри силикатного связующего.

- **Дифильность молекул:** Агенты обладают дифильным строением (гидрофильная «голова» и гидрофобный «хвост»). При достижении критической концентрации мицеллообразования (ККМ) они формируют адсорбционный слой на поверхности капли.
- **Снижение работы когезии (W-kog):**

$$W\text{-kog} = 2 * \sigma\text{-zh-g}$$

Уменьшение значения $\sigma\text{-zh-g}$ приводит к тому, что капля теряет сферическую устойчивость и переходит в состояние «растекания в блин» при контакте с металлом.

2. Кинетика смачивания гидрофобных отложений

Старые трубопроводы Санкт-Петербурга характеризуются наличием микроплёнок масел и биологических отложений. Обычные водные растворы отторгаются такими поверхностями.

- **Эффект солюбилизации:** Модификаторы состава проникают в структуру масляных пятен, дробят их на мелкие капли и переводят в объем смеси.
- **Изменение краевого угла (theta):** Наличие добавок принудительно снижает угол смачивания до значений, близких к нулю. Работа адгезии (W-adh) рассчитывается по уравнению Дюпре:

$$W\text{-adh} = \sigma\text{-zh-g} + \sigma\text{-т-г} - \sigma\text{-т-ж}$$

За счет химического сродства добавок к металлу, значение $\sigma\text{-т-ж}$ резко падает, что максимизирует силу прилипания.

3. Подготовка реакционной зоны на молекулярном уровне

Помимо чисто физического растекания, данные вещества выполняют функцию «очистителей» поверхности.

- **Разрушение гидратных слоев:** Они вытесняют молекулы слабосвязанной воды с поверхности ржавчины, обеспечивая прямой контакт кремниевых цепочек состава с оксидами железа.
- **Снижение вязкостного сопротивления в порах:** В узких капиллярах (микротрещинах) добавки работают как молекулярная смазка, снижая коэффициент трения жидкости о стенки, что описывается модифицированным уравнением Пуазейля:

$$Q = (\pi * r \text{ в четвертой степени} * \Delta\text{-P}) / (8 * \mu\text{-eff} * L)$$

где Q — объемная скорость заполнения трещины, $\Delta\text{-P}$ — перепад давления.

4. Технологическая эффективность

Применение данных добавок позволяет достичь 100-процентного покрытия микрорельефа трубы, исключая возникновение «мертвых зон», где могла бы возобновиться коррозия под слоем ремонтного материала.

Пункт 1.1.3. Газодинамическое обоснование формирования упрочняющего композитного пояса в зонах термического влияния и сварных соединений

Сварной стык является макроскопической неоднородностью трубопроводной системы, характеризующейся измененной кристаллической структурой металла и наличием внутреннего грата (выступа). В данном пункте рассматривается механизм автоматического локального усиления этих зон за счет кинетической энергии газодисперсного потока.

1. Аэродинамика потока в зоне локальных препятствий

Внутренний выступ сварного шва нарушает ламинарность течения. При прохождении воздуха со скоростью $v = 18\text{--}25 \text{ м/с}$ в околосшовной зоне возникают устойчивые возмущения.

- **Инициация турбулентности:** Степень турбулизации определяется числом Рейнольдса (Re). В зоне шва происходит резкий переход к развитой турбулентности:

$$Re = (v * D * \rho) / \mu > 10000$$

- **Образование зон рециркуляции:** Непосредственно за выступом шва образуется область отрывного течения с пониженным статическим давлением и высокой интенсивностью вихреобразования.

2. Механизм инерционного осаждения и «бронирования»

Частицы восстановительного состава, обладающие массой (m), под действием сил инерции не могут мгновенно изменить траекторию вслед за газовой фазой.

- **Эффект соударения:** Частицы вылетают из основного потока и внедряются в поверхность шва и прилегающего металла. Масса осажденного материала ($M\text{-osad}$) прямо пропорциональна числу Стокса (Stk):

$$Stk = (\tau\text{-rel} * v) / L\text{-char}$$

где $\tau\text{-rel}$ — время релаксации частицы, $L\text{-char}$ — характерный размер препятствия (высота шва).

- **Автоматическое регулирование толщины:** Чем выше геометрическая неоднородность (дефектность) шва, тем интенсивнее турбулентные завихрения и тем большее количество состава аккумулируется в данной зоне.

3. Формирование силового каркаса (Муфты)

За 4–5 циклов пневматического напыления в зоне сварного соединения формируется монолитная кольцевая структура из каменного композита.

- **Распределение напряжений:** Полученная «муфта» перераспределяет механические нагрузки. Кольцевое напряжение в укрепленном сечении ($\sigma\text{-ukr}$) снижается:

$$\sigma\text{-ukr} = P / ((s\text{-met} / R\text{-met}) + (E\text{-kompozit} * s\text{-komp} / (E\text{-met} * R\text{-komp})))$$

где s — толщина слоев, E — модули упругости соответствующих материалов.

- **Результат:** Жесткость участка в зоне шва увеличивается в 2–2.5 раза, что полностью компенсирует потерю прочности из-за термической деструкции стали.

4. Эрозионная стойкость и нивелирование поверхности

По мере наслоения состава геометрия внутренней поверхности выравнивается. Процесс самоостанавливается, когда турбулентные завихрения исчезают (при достижении гладкости потока). Финальный слой обеспечивает гидравлическую гладкость, снижая коэффициент эквивалентной шероховатости (k_{sh}) до значений **0.01–0.02 мм**, что минимизирует потери напора при эксплуатации сети.

Пункт 1.1.3.1. Электрохимический анализ коррозионной деструкции в зонах структурной неоднородности и механизм пассивации гальванических пар

В данном пункте рассматривается физика ускоренного разрушения сварных соединений, вызванного возникновением локальных гальванических элементов, и метод их нейтрализации посредством создания диэлектрического барьера.

1. Механизм формирования локального гальванического элемента

Сварной шов и зона термического влияния (ЗТВ) обладают кристаллической структурой, отличной от основного тела трубы (матрицы). Это создает градиент электродных потенциалов на малых участках.

- **Электрохимическая цепь:** При контакте с электролитом (теплоносителем) возникает коррозионный элемент, где участок с более отрицательным потенциалом (обычно шов или граница ЗТВ) становится анодом.
- **Плотность тока коррозии (i_{kor}):** Рассчитывается через разность потенциалов и сопротивление среды:

$$i_{kor} = (E_{kat} - E_{an}) / (R_{pol-an} + R_{pol-kat} + R_{om})$$

где E_{kat} и E_{an} — потенциалы катодной (труба) и анодной (шов) зон, R_{om} — омическое сопротивление теплоносителя.

- **Скорость растворения металла ($K-m$):** Согласно закону Фарадея, потеря массы металла прямо пропорциональна току:

$$K-m = (M * i_{kor} * t) / (n * F)$$

где M — молярная масса железа, n — число электронов, F — постоянная Фарадея.

2. Взаимодействие состава с продуктами электрохимической реакции

Восстановительный состав на основе силикатов кремния вступает в прямое химическое взаимодействие с ионами железа и оксидными слоями в зоне шва.

- **Химическая нейтрализация:** Силикатные модули связывают продукты коррозии, превращая рыхлую ржавчину в плотный силикат железа. Процесс сопровождается резким повышением показателя pH в пристенном слое (до 11–12 единиц).
- **Эффект пассивации:** В высокощелочной среде сталь переходит в пассивное состояние, при котором на поверхности образуется плотная хемосорбированная пленка, прекращающая ионный обмен с водой.

3. Создание диэлектрического барьера

После завершения циклов напыления и полимеризации (каменения), слой состава формирует сплошную оболочку с высокими диэлектрическими свойствами.

- **Разрыв цепи:** Сопротивление защитного слоя (R_{izol}) во много раз превышает критическое значение, необходимое для протекания тока в «микро-батареяке» шва. Омическое сопротивление цепи стремится к бесконечности:

R-om-novoe = R-om + R-izol

- **Результат:** Электрическое взаимодействие между разнородными структурами металла полностью блокируется.

4. Технологический эффект

Применение метода позволяет не только механически усилить шов, но и устранить первопричину его ускоренного «гниения». После формирования диэлектрической муфты скорость локальной коррозии снижается до уровня фоновых значений (менее 0.01 мм в год), что делает зону сварки равнопрочной и равностойкой по отношению к основному телу трубопровода.

Пункт 1.1.4. Системно-техническое определение и принципы реализации метода Поточного Газодинамического Восстановления (ПГВ)

В данном пункте приводится научно-техническая интерпретация технологического процесса ПГВ как комплексной системы регенерации трубопроводных магистралей. Технология рассматривается как управляемый физико-химический процесс в замкнутом объеме, где трубопровод выполняет функцию реактора.

1. Принцип потоковой непрерывности (Пространственная связность)

Технология базируется на методе одновременного воздействия на протяженный участок ($L = 300\text{--}500$ метров) без локального вскрытия грунта.

- **Системный подход:** Трубопровод рассматривается как единый объект с распределенными параметрами. Математическая модель процесса учитывает падение давления и изменение концентрации дисперсной фазы по длине (x):

$$P(x) = P_{\text{нач}} - \lambda * (x / D) * (\rho * v \text{ в квадрате} / 2)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения, учитывающий фактическую шероховатость ржавого металла.

- **Равномерность:** Обеспечивается за счет поддержания динамического равновесия между скоростью подачи смеси и скоростью её осаждения на всей дистанции.

2. Газодинамический механизм транспорта и интеграции

Несущая газовая фаза (сжатый воздух) выполняет две основные функции: транспортную и энергетическую.

- **Транспортная функция:** Обеспечение полета аэрозольного облака. Для этого поддерживается условие превышения критической скорости витания (v_{vit}) для частиц массой (m):

$$v_{\text{potoka}} > v_{\text{vit}} = \sqrt{4 * g * d_{\text{ch}} * (\rho_{\text{ch}} - \rho_{\text{gaz}})} / (3 * C_{\text{d}} * \rho_{\text{gaz}})$$

где C_{d} — коэффициент аэродинамического сопротивления частиц.

- **Энергетическая функция:** Кинетическая энергия потока используется для «вбивания» (импактного внедрения) частиц в поры и трещины. Энергия удара ($E_{\text{удар}}$) должна быть достаточной для преодоления предела текучести состава при деформации:

$$E_{\text{удар}} = (m * v \text{ в квадрате}) / 2$$

3. Механизм структурной регенерации (Восстановления)

В отличие от классических методов санации (например, облицовки), ПГВ обеспечивает восстановление эксплуатационного ресурса через создание новой несущей структуры («нового тела») внутри старой стальной оболочки.

- **Адгезионная связность:** Старая труба выступает в роли жесткой внешней опалубки и силового скелета.
- **Формирование композита:** Результатом является создание сталекаменного монолита, где жесткость системы (EI-sys) определяется совместной работой слоев:

$$EI\text{-}sys = E\text{-}met * I\text{-}met + E\text{-}komp * I\text{-}komp$$

где I — моменты инерции сечений металла и композитного слоя соответственно.

4. Технично-эксплуатационный результат

Реализация принципов ПГВ позволяет вернуть трубопроводу проектные характеристики по давлению и коррозионной стойкости. Система переходит из состояния прогрессирующего износа в состояние стабилизированного функционирования с расчетным сроком службы более 25 лет.

Пункт 1.2. Теоретические основы и методология звукового колебательного сканирования для дефектоскопии линейно-протяженных металлических конструкций

В данном пункте рассматривается физико-математическая модель диагностики трубопроводов на основе анализа распространения акустических волн в твердой среде и газовом заполнении. Метод основан на явлении акустического резонанса и спектрального анализа отклика системы на широкополосное возбуждение.

1. Физическая модель волноводного распространения звука в трубе

Стальной трубопровод рассматривается как цилиндрический акустический волновод. Скорость распространения продольных волн (с-L) в стенке трубы определяется модулем Юнга (E) и плотностью стали (rho):

$$c\text{-}L = \text{kvadratnyj-koren}(E / \text{rho})$$

При наличии локальных дефектов (утонение стенки, трещины) происходит изменение локальной жесткости и массы участка, что ведет к рассеиванию энергии и изменению фазовой скорости волны. Коэффициент затухания (alpha) в дефектной зоне прямо пропорционален степени деградации металла.

2. Механизм частотного отклика и резонансные характеристики

Участок трубы обладает набором собственных частот (f-n), которые зависят от геометрических параметров (диаметр D, толщина s) и условий закрепления в грунте.

- **Смещение частотного спектра:** При уменьшении толщины стенки (s-tek) из-за коррозии происходит снижение собственной частоты вибрации. Для тонкостенной цилиндрической оболочки частота радиальных колебаний (f-r) рассчитывается как:

$$f\text{-}r = (1 / (\text{pi} * D)) * \text{kvadratnyj-koren}(E / (\text{rho} * (1 - \text{nu}\text{-}kvadrat)))$$

где nu — коэффициент Пуассона.

- **Диагностический признак:** Сдвиг спектра в сторону низких частот и появление «паразитных» гармоник свидетельствуют о потере механической жесткости и наличии критических износов.

3. Математическая обработка сигнала: Спектральная декомпозиция

Для анализа используется метод разложения сложного временного сигнала ($p-t$) в частотную область.

- **Анализ Фурье:** Функция отклика $S(f)$ определяется как интегральное преобразование:

$$S(f) = \int (p-t * \exp(-i * 2 * \pi * f * t) dt)$$

- **Локализация дефекта:** Определение координат повреждения ($L-x$) осуществляется методом импульсной рефлектометрии. По времени задержки ($\Delta-t$) отраженного эха от неоднородности:

$$L-x = (c-L * \Delta-t) / 2$$

Точность метода в городских условиях Санкт-Петербурга составляет до 0.5 метра.

4. Техническая реализация и «Цифровой слух»

Диагностический комплекс включает генератор «белого шума» и пьезоэлектрические регистраторы (датчики давления), преобразующие акустические колебания в электрический потенциал ($U-sig$).

- **Фильтрация помех:** Система производит вычитание фонового шума мегаполиса (трамваи, автотранспорт), используя алгоритм когерентного накопления сигнала.
- **Результат:** Формируется динамическая «кардиограмма» участка, на которой визуализируются зоны с износом более 50%, что служит основанием для корректировки параметров подачи восстановительного состава (Глава 3).

Пункт 1.2.1. Физическое обоснование модального анализа и спектральных характеристик собственного звукового отклика трубных конструкций

В данном пункте исследуется явление акустического резонанса в цилиндрических оболочках и зависимость спектрального состава звукового отклика от физико-механических параметров трубопровода. Рассматривается взаимосвязь между деградацией металла и изменением собственных частот колебаний системы.

1. Математическая модель собственных колебаний цилиндрической оболочки

Трубопровод рассматривается как упругая система с распределенными параметрами. Собственные круговые частоты ($\omega-n$) радиальных колебаний бесконечно длинной цилиндрической оболочки в вакууме определяются уравнением:

$$\omega-n = (1 / R) * \text{kvadratnyj-koren}(E / (\rho * (1 - \nu\text{-kvadrat})))$$

где R — радиус срединной поверхности трубы, E — модуль Юнга, ρ — плотность материала, ν — коэффициент Пуассона.

При наличии внешнего грунта и внутреннего заполнения (воздуха) вводится поправочный коэффициент присоединенной массы ($m-ad$), который снижает резонансную частоту, но сохраняет общую зависимость от жесткости стенки.

2. Влияние коррозионного истончения на частотный спектр

Изменение толщины стенки (s) напрямую влияет на изгибную жесткость ($D-rig$), которая определяет высокочастотную часть спектра (изгибные волны):

$$D-rig = (E * s \text{ в кубе}) / (12 * (1 - \nu\text{-kvadrat}))$$

- **Диагностический переход:** При уменьшении толщины стенки s вследствие коррозии значение $D-rig$ падает пропорционально кубу толщины. Это приводит к резкому смещению резонансных пиков в низкочастотную область.
- **Аналогия с натянутой струной:** Частота основного тона ($f-1$) пропорциональна корню квадратному из возвращающей силы (жесткости). Для поврежденного участка:

$$f-povrezh = f-etalon * kvadratnyj-koren(s-fact / s-nom)$$

где $s-fact$ — фактическая остаточная толщина, $s-nom$ — номинальная (проектная) толщина.

3. Затухание звуковой энергии в дефектных зонах

Наличие микротрещин и зон структурной деструкции (усталости металла) увеличивает внутреннее трение в материале. Это выражается в росте логарифмического декремента затухания (δ):

$$\delta = \ln(A-k / A-k+1)$$

где $A-k$ и $A-k+1$ — амплитуды последовательных колебаний.

В «уставшем» металле энергия звуковой волны переходит в тепловую за счет микропластических деформаций в вершинах трещин, что фиксируется датчиками как резкое падение амплитуды сигнала на определенных дистанциях.

4. Технологическая значимость для контроля качества

Метод собственного звукового отклика используется дважды:

1. **Прединспекция:** Выявление зон с пониженной жесткостью для определения требуемого количества циклов напыления.
2. **Постконтроль:** После полимеризации состава жесткость системы ($EI-sys$) возрастает. Если спектр отклика смещается обратно в высокочастотную область, это математически подтверждает формирование монолитного защитного слоя и восстановление несущей способности трубы.

Пункт 1.2.2. Алгоритмы адаптивной дискретизации и дифференциальной фильтрации техногенных акустических помех в условиях городской застройки

Для обеспечения достоверности диагностики в условиях мегаполиса необходимо отделение полезного диагностического сигнала от высокоинтенсивного шумового фона (трамвайные линии, метрополитен, автотранспорт). В данном пункте рассматривается математический аппарат очистки сигнала на основе методов адаптивной фильтрации и спектрального вычитания.

1. Математическая модель зашумленного сигнала

Регистрируемый датчиком сигнал ($Y-t$) представляет собой аддитивную смесь полезного акустического отклика трубы ($S-t$) и техногенного шума ($N-t$):

$$Y-t = S-t + N-t$$

Шум ($N-t$) в условиях Санкт-Петербурга характеризуется нестационарностью, однако имеет выраженные спектральные максимумы в низкочастотной области (0-50 Гц).

2. Метод спектрального вычитания (Spectral Subtraction)

Алгоритм реализуется в три этапа:

- **Оценка профиля шума:** Регистрация фоновых вибраций при выключенном генераторе активного сигнала. Расчет спектральной плотности мощности шума (P-N-f).
- **Преобразование текущего сигнала:** Перевод суммарного сигнала (Y-t) в частотную область (Y-f) через быстрое преобразование Фурье.
- **Амплитудная коррекция:** Вычисление очищенного спектра (S-f) по формуле:

$$S-f = Y-f - G * P-N-f$$

где **G** — коэффициент усиления фильтра (обычно в пределах 1.1–1.5 для исключения «музыкального шума»).

3. Дифференциальная временная задержка и корреляция

Для прецизионной локализации микродефектов используется метод взаимно-корреляционной функции (R-xy) между двумя датчиками (A и B), расположенными на краях участка:

$$R-xy(\tau) = \int Y-A-t * Y-B-(t + \tau) dt$$

Пик функции корреляции соответствует времени задержки (τ -max), которое позволяет вычислить расстояние до источника акустической эмиссии (трещины или свища) с учетом подавления синфазных внешних помех.

4. Эффективность и точность метода

Применение цифровой фильтрации позволяет:

- **Повысить отношение сигнал/шум (SNR):** Увеличение SNR на 15–20 дБ обеспечивает обнаружение микротрещин с раскрытием от 10 микрон.
- **Игнорировать динамические нагрузки:** Система сохраняет работоспособность при проезде тяжелого транспорта (массой до 40 тонн) непосредственно над зоной измерения.
- **Автоматизировать анализ:** Использование эталонных «масок» спектра позволяет программному комплексу в реальном времени выделять специфический высокочастотный «свист» (акустическую эмиссию), характерный для зон критического истончения металла.

Пункт 1.3. Теоретическое обоснование и математические методы оценки остаточной несущей способности корродированных стальных оболочек

В данном пункте приводится методика расчета предела эксплуатационной пригодности изношенного трубопровода, рассматриваемого как силовой каркас для наносимого композитного покрытия. Основная задача — определение возможности интеграции старой трубы в новую сталекаменную систему.

1. Математическая модель расчета предельного давления (Критерий разрушения)

Оценка прочности производится на основе зависимости, определяющей давление разрыва (P-pred) для цилиндрической оболочки с учетом локальных геометрических несовершенств. Расчет ведется по наиболее ослабленному сечению:

$$P-pred = (2 * \sigma-t * s-min) / D$$

где $\sigma-t$ — предел текучести стали с учетом коэффициента деградации материала (k-deg), $s-min$ — минимальная толщина стенки, зафиксированная методом звукового сканирования (из Пункта 1.2), D — наружный диаметр трубопровода.

2. Определение коэффициента деградации и хрупкости материала

Сталь, находящаяся в эксплуатации длительное время, подвержена процессам коррозионной усталости и старения. Для оценки склонности к хрупкому разрушению (вязкости разрушения) используется анализ затухания амплитуды акустического сигнала (A).

- **Энергетический критерий:** Степень микроповрежденности структуры (D-povr) коррелирует с логарифмическим декрементом затухания (δ):

$$D\text{-povr} = 1 - (A\text{-fact} / A\text{-ideal})$$

- При достижении критического значения **D-povr**, металл переходит в состояние хрупкости, что требует изменения характеристик первого наносимого слоя (переход к модулю упругости амортизирующего типа, Пункт 1.3.2).

3. Условие пригодности к регенерации (Порог выживаемости)

Трубопровод признается пригодным для восстановления методом ПГВ при соблюдении следующего неравенства:

$$P\text{-pred} > k\text{-zap} * P\text{-rab}$$

где **P-rab** — максимальное рабочее давление в сети, **k-zap** — коэффициент запаса надежности (для условий Санкт-Петербурга принимается **k-zap = 1.2**).

4. Прогноз интенсивности коррозионных процессов после восстановления

Математическое моделирование срока службы (T-sluzh) основывается на скорости диффузии окислителя через созданный барьер.

- **Без применения технологии:** Скорость коррозии (V-kor) составляет 0.2–0.5 мм/год.
- **После формирования композита:** Благодаря полной герметизации и химической пассивации (Пункт 2.3), доступ кислорода блокируется. Скорость деградации металла (V-reg) снижается до значений:

$$V\text{-reg} = V\text{-kor} * \exp(-E\text{-bar} / (R * T)) < 0.01 \text{ мм/год}$$

где **E-bar** — энергетический барьер защитного слоя.

5. Технологический вывод

Расчет подтверждает, что даже при потере до 70% проектной толщины стенки, стальная основа сохраняет достаточную жесткость для выполнения функции внешней опалубки. Создаваемый внутренний слой перераспределяет напряжения, снимая пиковые нагрузки с зон локального утонения.

Пункт 1.3.1. Математический аппарат расчета критического давления разрушения оболочки с учетом локальной деградации сечения

В данном пункте приводится уточненная инженерная методика определения точки разрыва трубопровода. Расчет является базовым для принятия решения о допустимости регенерации участка и базируется на классической формуле связи напряжений и давления в цилиндрическом сосуде, адаптированной для условий фактического износа.

1. Физико-математическая модель предельного состояния

Для оценки несущей способности используется зависимость, связывающая внутреннее давление (P) и возникающие в стенке кольцевые напряжения ($\sigma\text{-kolch}$). Расчет выполняется для наиболее критической точки, выявленной в ходе акустической дефектоскопии (Пункт 1.2), что

исключает использование усредненных показателей.
Формула определения предельного давления (P-pred):

$$P\text{-pred} = (2 * \sigma\text{-tek} * s\text{-min}) / D\text{-nar}$$

где $\sigma\text{-tek}$ — расчетный предел текучести стали (Па), $s\text{-min}$ — минимальная измеренная толщина стенки (м), $D\text{-nar}$ — наружный диаметр трубопровода (м).

2. Учет коэффициента старения и структурной деградации металла

Поскольку сталь эксплуатируемых труб подвергалась длительному термическому и коррозионному воздействию, значение $\sigma\text{-tek}$ не является константой и корректируется коэффициентом деградации (k-deg):

$$\sigma\text{-tek} = \sigma\text{-norm} * k\text{-deg}$$

где $\sigma\text{-norm}$ — нормативный предел текучести для данной марки стали.

Коэффициент $k\text{-deg}$ (обычно в пределах 0.8–0.9) учитывает снижение пластичности и накопление микрповреждений в кристаллической решетке металла.

3. Инженерный запас надежности и критерий безопасности

Для обеспечения безопасности жителей и исключения аварийных ситуаций при эксплуатации в городских сетях, расчетная модель вводит двойной коэффициент запаса (k-zap-obsh).

- **Условие эксплуатации:** Ремонт признается целесообразным, если выполняется неравенство:

$$P\text{-pred} / k\text{-zap-obsh} \geq P\text{-rab-max}$$

где $P\text{-rab-max}$ — пиковое рабочее давление в теплосети.

- Намеренное занижение расчетной прочности стали в формуле создает необходимый «коридор безопасности» для компенсации возможных неучтенных динамических нагрузок (гидроударов).

4. Роль расчета в технологическом процессе

Полученные данные о предельном давлении (P-pred) передаются в автоматизированную систему управления мобильного комплекса для:

- Определения максимально допустимого давления воздуха при продувке ($P\text{-prodvyka} < P\text{-pred}$).
- Выбора типа восстановительного состава (Глава 2) и толщины наносимого слоя.
- Присвоения участку категории износа (Зеленая, Желтая или Красная зона).

Пункт 1.3.2. Физико-механическое обоснование и реологические параметры переходного слоя с высоким коэффициентом демпфирования

В данном пункте рассматривается инженерное решение по созданию градиентной структуры защитного покрытия. Первый слой («амортизатор») проектируется как демпфирующий интерфейс между хрупкой, подверженной усталости сталью и жестким основным телом искусственного камня.

1. Кинематическая совместимость материалов и компенсация термических напряжений

При эксплуатации тепловых сетей возникают значительные температурные деформации ($\epsilon\text{-term}$). Из-за различия коэффициентов линейного теплового расширения (α) стали и силикатного камня на границе раздела возникают сдвиговые напряжения ($\tau\text{-term}$):

τ -term = G-sloy * (alpha-met - alpha-kam) * Delta-T

где **G-sloy** — модуль сдвига материала, **Delta-T** — градиент температуры.

Для исключения трещинообразования и отслоения первый слой модифицируется эластомерами, что снижает его модуль сдвига и превращает его в податливое основание, поглощающее разность деформаций.

2. Динамическое гашение вибраций и импульсных нагрузок

В условиях Санкт-Петербурга трубопроводы испытывают постоянное воздействие низкочастотных вибраций от наземного транспорта. Слой-амортизатор работает как механический фильтр низких частот. Коэффициент поглощения энергии (ψ) рассчитывается через тангенс угла механических потерь (tg-delta):

$\psi = \pi * \text{tg-delta}$

При прохождении вибрационной волны через демпфирующий слой происходит диссипация (рассеивание) энергии:

$E\text{-diss} = \int(\tau * d\epsilon)$

Это предотвращает передачу разрушительных микроколебаний на основной, твердый защитный слой, сохраняя его целостность.

3. Адгезионная устойчивость и эффект «двустороннего скотча»

Материал первого слоя обладает повышенной энергией адгезии ($W\text{-adh}$) к окисленной поверхности стали. За счет введения пластификаторов достигается высокая конформность — способность состава заполнять микронеровности рельефа без образования пустот.

- **Условие неразрывности:** Слой сохраняет сплошность при растяжении до критической величины ($\epsilon\text{-pred}$), которая должна превышать максимальную деформацию стальной трубы:

$\epsilon\text{-pred-sloya} > \alpha\text{-met} * \Delta\text{-T-max}$

4. Технологическая реализация

- **Рецептура:** Повышенное содержание кремнийорганических модификаторов и добавок на основе каучуковых производных.
- **Результат:** Формируется эластичная «подложка» толщиной 1–2 мм, которая химически срастается с металлом и механически удерживает последующие силовые слои композита (Глава 4.3). Это обеспечивает живучесть системы в режиме «пуск-остановка» теплосети в течение всего жизненного цикла.

Глава 2. Физико-химические основы и структурное моделирование восстановительного композитного состава

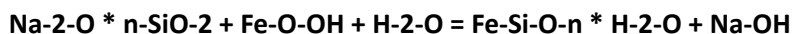
Пункт 2.1. Рецепт и термодинамическое обоснование многокомпонентной системы на основе модифицированных силикатов и дисперсно-армированного наполнителя

В данном пункте приводится научное обоснование выбора компонентов для создания искусственного минерального слоя, обладающего высокой адгезией к продуктам коррозии и заданными прочностными характеристиками. Состав рассматривается как многофазная система, где связующее обеспечивает химическую интеграцию, а наполнитель — механическую жесткость.

1. Физико-химия связующего: Модифицированный силикат натрия

В качестве основы используется раствор силиката натрия ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$), характеризующийся кремнеземистым модулем (n).

- **Механизм химической адгезии:** При контакте с окисленной поверхностью стали (Fe_2O_3 , Fe-O-OH) происходит реакция ионного обмена и поликонденсации. Образуются нерастворимые полисиликаты железа, что описывается уравнением:



- **Результат:** Формирование переходного слоя, где граница раздела фаз «металл — покрытие» исчезает на молекулярном уровне, заменяясь кристаллической решеткой силиката железа.

2. Дисперсное армирование: Базальтовый наполнитель (Вулканическая порода)

Для компенсации хрупкости силикатной матрицы и повышения трещиностойкости в состав вводится базальтовая пыль и микроволокна (фибра).

- **Обоснование выбора:** Базальт обладает высокой химической инертностью и термической стойкостью (до 1000 градусов Цельсия). Модуль упругости базальтового волокна (E_{baz}) составляет около 90–110 ГПа.
- **Механизм упрочнения:** Волокна работают как микроскопические анкеры, перераспределяющие внутренние напряжения (σ_{vnutr}). Коэффициент интенсивности напряжений ($K-I$) в армированном композите снижается за счет эффекта «мостиков» через берега микротрещин:

$$K-I_{\text{komp}} = K-I_{\text{matr}} - \Delta K-I_{\text{fib}}$$

где $\Delta K-I_{\text{fib}}$ — вклад энергии, затрачиваемой на выдергивание или разрыв волокна.

3. Поверхностно-активная модификация и управление гидродинамикой

Для обеспечения растекаемости состава по влажным и замасленным поверхностям вводятся дифильные модификаторы (из раздела 1.1.2.2).

- **Термодинамический критерий смачивания:** Величина свободной поверхностной энергии ($\sigma_{\text{zh-g}}$) снижается до значений, обеспечивающих работу адгезии (W_{adh}):

$$W_{\text{adh}} = \sigma_{\text{zh-g}} \cdot (1 + \cos\theta) \geq W_{\text{kog}}$$

Это гарантирует, что прочность прилипания состава к ржавчине выше, чем прочность его внутренних связей.

4. Технично-эксплуатационные показатели материала

- **Термическая стабильность:** Коэффициент линейного теплового расширения (α_{komp}) адаптирован к α_{stali} , что минимизирует термические напряжения при ΔT до 130 градусов Цельсия.
- **Экологическая безопасность:** В отличие от полимерных смол, силикатная система не выделяет токсичных соединений (фенолов, формальдегидов) и разрешена для систем горячего и питьевого водоснабжения.
- **Экономический расчет:** Стоимость сырьевой базы (жидкое стекло, базальт, глина) в 10–12 раз ниже стоимости импортных эпоксидных или полиуретановых систем, что обеспечивает высокую рентабельность при масштабном внедрении.

Пункт 2.1.1. Кинетика и термодинамика процессов фазового превращения оксидов железа в метастабильные силикатные структуры

В данном пункте исследуется физико-химический механизм преобразования рыхлых продуктов коррозии в монолитный кристаллический слой. Процесс рассматривается как реакция замещения и поликонденсации, протекающая на границе раздела «металл — ремонтный состав».

1. Химизм процесса силикатизации оксидных слоев

При контакте активного силикатного связующего (раствора силикатов щелочных металлов) с корродированной поверхностью стали происходит диффузия ионов в пористую структуру ржавчины. Основным компонентом ржавчины является гетит ($\alpha\text{-Fe-O-OH}$) и магнетит (Fe-3-O-4). Химическое взаимодействие описывается уравнением образования нерастворимых гидросиликатов железа:



В результате реакции образуется аморфно-кристаллический барьер, который «сшивает» несвязанные частицы ржавчины в единую минеральную матрицу.

2. Механизм молекулярной интеграции («Прорастание»)

В отличие от механического прилипания, здесь реализуется механизм хемосорбции.

- **Глубина проникновения:** Благодаря низкой вязкости активной фазы в момент нанесения (Пункт 1.1.1), раствор проникает в поры на глубину **L-diff**:

$$\text{L-diff} = \text{kvadratnyj-koren}(\text{D-eff} * \text{t})$$

где **D-eff** — эффективный коэффициент диффузии силиката в слое ржавчины, **t** — время до начала гелеобразования.

- **Формирование переходной зоны:** Между чистым металлом и восстановительным составом создается градиентный слой, где концентрация железа плавно снижается по мере удаления от поверхности трубы. Это исключает наличие четкой границы раздела, которая обычно является местом концентрации напряжений.

3. Энергетическое обоснование прочности связи

Прочность сформированного соединения (**P-svyaz**) определяется энергией химических связей Si-O-Fe. Расчетная прочность на отрыв (**sigma-otrv**) для данной системы значительно превышает показатели органических покрытий:

$$\text{sigma-otrv} = \text{W-chem} + \text{W-mech}$$

где **W-chem** — работа химической адгезии, **W-mech** — механическое зацепление за неровности профиля.

Экспериментальные значения составляют 8–12 МПа, при этом разрушение при испытаниях происходит по телу композита (когезионный характер), а не по границе контакта.

4. Технологическая значимость для подготовки поверхности

Наличие данного механизма позволяет исключить этап абразивоструйной очистки трубы до «белого металла» (степень Sa-3).

- **Функциональная роль ржавчины:** Оксидный слой из «паразитного» превращается в «армирующий» компонент.

- **Герметизация:** Образовавшиеся кристаллы силикатов железа имеют меньший удельный объем, чем исходная ржавчина, что приводит к уплотнению структуры и автоматической закупорке микропор, через которые ранее поступал кислород к металлу.

Пункт 2.1.2. Механика микроструктурного упрочнения силикатной матрицы посредством дисперсного армирования базальтовыми микроволокнами

В данном пункте рассматривается физическая модель повышения трещиностойкости и ударной вязкости искусственного камня. Применение базальтовых волокон (фибры) позволяет трансформировать хрупкую минеральную структуру в квазипластичный композиционный материал, способный выдерживать динамические нагрузки.

1. Геометрические и физико-механические параметры армирующего элемента

Используемые волокна базальта (продукт плавления вулканической породы) характеризуются высоким модулем Юнга ($E-f = 90\text{--}110$ ГПа) и пределом прочности на растяжение ($\sigma-f = 3000\text{--}4500$ МПа).

Критическим параметром является критическая длина волокна ($L\text{-krit}$), обеспечивающая передачу напряжений от матрицы к волокну без его выдергивания:

$$L\text{-krit} = (\sigma\text{-f} * d\text{-f}) / (2 * \tau\text{-adh})$$

где $d\text{-f}$ — диаметр волокна (5–15 мкм), $\tau\text{-adh}$ — прочность сцепления на границе «волокно — матрица».

2. Механизм блокировки микротрещин (эффект «мостиков»)

В хрупкой силикатной матрице при возникновении растягивающих напряжений неизбежно зарождаются микротрещины. В армированном составе волокна, хаотично распределенные в объеме, пересекают берега трещины.

- **Энергия разрушения (G-c):** Полная энергия, затрачиваемая на развитие трещины, увеличивается за счет работы выдергивания волокон ($W\text{-pull}$):

$$G\text{-c} = G\text{-m} + V\text{-f} * W\text{-pull}$$

где $G\text{-m}$ — энергия разрушения чистой матрицы, $V\text{-f}$ — объемная доля армирования.

- **Торможение магистральной трещины:** При соприкосновении фронта трещины с базальтовым волокном происходит перераспределение напряжений. Трещина либо останавливается, либо меняет направление (диссипация энергии), что предотвращает катастрофическое разрушение защитного слоя.

3. Формирование объемной пространственной решетки

Миллионы микроволокон в составе образуют стохастическую (случайную) трехмерную сеть. Коэффициент армирования рассчитывается для обеспечения изотропности свойств во всех направлениях.

- **Условие эффективного армирования:** Расстояние между соседними волокнами должно быть сопоставимо с размером зоны пластичности в вершине трещины.
- **Результат:** Композит приобретает способность сопротивляться знакопеременным температурным нагрузкам и вибрациям от городского транспорта без образования сквозных трещин.

4. Технологический эффект и долговечность

Введение базальтовой фибры позволяет:

- **Повысить прочность на изгиб:** В 3–5 раз по сравнению с неармированным силикатным камнем.
- **Обеспечить ударную вязкость:** Способность поглощать энергию при гидроударах или механических воздействиях.
- **Стабилизировать объем:** Снижение усадочных деформаций при затвердевании состава, что гарантирует сохранение геометрической точности нанесенного слоя на участках большой протяженности.

Пункт 2.1.3. Термодинамика межфазного взаимодействия и механизмы преодоления энергетических барьеров на гетерогенных поверхностях

В данном пункте исследуется физика процесса установления молекулярного контакта между восстановительным составом и дефектной поверхностью трубы. Рассматриваются механизмы вытеснения сорбированных сред (влаги, масел) и условия формирования максимальной силы сцепления (адгезии).

1. Энергетическая природа адгезионного взаимодействия

Для формирования надежного соединения необходимо, чтобы работа адгезии (W_{adh}) превышала работу когезии (W_{kog}) самого состава. Работа адгезии определяется уравнением Дюпре:

$$W_{adh} = \sigma_{zh-g} + \sigma_{t-g} - \sigma_{t-zh}$$

где σ_{zh-g} — энергия границы жидкость-газ, σ_{t-g} — энергия границы твердое тело-газ, σ_{t-zh} — энергия границы твердое тело-жидкость.

Введение модификаторов (из пункта 1.1.2.2) направлено на резкое снижение межфазного натяжения (σ_{t-zh}), что обеспечивает термодинамическую выгодность «растекания» состава по металлу.

2. Механизм замещения сорбированных фаз (Гидрофобно-гидрофильный переход)

Поверхность эксплуатируемой трубы всегда покрыта микропленками воды и остатками органических соединений (масел).

- **Эффект вытеснения:** Активные компоненты состава обладают более высоким сродством к металлу, чем вода или масло. Процесс описывается уравнением замещения:

$$\Delta G_{sub} = \sigma_{sost-met} - \sigma_{voda-met}$$

При $\Delta G_{sub} < 0$ происходит самопроизвольное вытеснение влаги из пор металла и замена её частицами восстановительного состава.

- **Диффузионная пенетрация:** Низкое внутреннее сопротивление состава позволяет ему проникать в микропоры ржавчины, увеличивая площадь фактического контакта (S_{fact}) в 15-20 раз относительно номинальной площади.

3. Квантово-химическая модель связи («Молекулярные якоря»)

Сила притяжения между молекулами силикатного связующего и атомами железа на поверхности обусловлена образованием донорно-акцепторных связей.

- **Энергия связи:** Формируются ковалентные и водородные связи, энергия которых (E_{bond}) значительно выше энергии Ван-дер-Ваальсовых сил:

F-otr = N-svyazej * E-bond

где **N-svyazej** — количество активных центров на единицу площади.

- **Результат:** Адгезионная прочность достигает уровня, при котором предел прочности на отрыв ($\sigma\text{-otr}$) лимитируется прочностью самой стальной подложки или «тела» искусственного камня (когезионный разрыв).

4. Технологические показатели и стабильность

- **Устойчивость к отслаиванию:** Благодаря глубокой интеграции в рельеф металла, покрытие сохраняет стабильность при знакопеременных нагрузках.
- **Проверка качества:** Критерием успешности контакта является достижение прочности на отрыв не менее 10 МПа.
- **Долговечность:** Сформированный молекулярный барьер исключает возможность проникновения коррозионно-активных сред (хлоридов, сульфатов) к поверхности стали в течение всего периода эксплуатации.

Пункт 2.2. Математическое моделирование и оптимизация параметров вязкости и плотности дисперсных систем для труб различных типоразмеров

В данном пункте рассматривается адаптация физико-химических характеристик восстановительного состава к геометрическим параметрам объекта. Эффективность нанесения защитного слоя на дистанциях до 500 метров требует точной настройки плотности ($\rho\text{-sm}$) и динамической вязкости (μ) в зависимости от диаметра трубопровода (D).

1. Дифференциация реологических моделей по диаметру сечения

Поведение состава внутри трубы определяется соотношением сил инерции и сил вязкого трения.

- **Для малых диаметров (D менее 300 мм):** Превалирует режим «поршневого» течения. Состав должен обладать высокой консистенцией (k) и пределом текучести ($\tau\text{-0}$), чтобы перемещаться единым объемом под давлением воздуха.
- **Для больших диаметров (D более 500 мм):** Необходим переход в аэрозольное состояние. Состав модифицируется для достижения минимальной вязкости в потоке ($\mu\text{-min}$), что позволяет раздробить его на капли с критическим диаметром ($d\text{-kap}$):

$$d\text{-kap} = (We\text{-krit} * \sigma) / (\rho\text{-gaz} * v \text{ в квадрате})$$

2. Управление плотностью и седиментационная устойчивость

Для исключения преждевременного выпадения частиц на дно трубы под действием гравитации (сила $F\text{-tyazh}$), необходимо соблюдение баланса между плотностью смеси и скоростью несущего потока.

- **Условие парения:** Скорость витания ($v\text{-vit}$) частиц в горизонтальном потоке рассчитывается по формуле:

$$v\text{-vit} = \text{kvadratnyj-koren}((4 * g * d\text{-kap} * (\rho\text{-sost} - \rho\text{-gaz})) / (3 * C\text{-d} * \rho\text{-gaz}))$$

- Для труб большого диаметра плотность состава ($\rho\text{-sost}$) искусственно снижается за счет введения полых микросфер или повышения кратности вспенивания, что уменьшает $v\text{-vit}$ и увеличивает дальность транспортировки материала.

3. Термодинамическая коррекция вязкости в полевых условиях

В условиях Санкт-Петербурга температура среды (T_{sr}) значительно влияет на текучесть силикатных систем. Зависимость вязкости от температуры описывается уравнением Аррениуса-Френкеля-Эйринга:

$$\mu(T) = A * \exp(E_{act} / (R * T))$$

где E_{act} — энергия активации вязкого течения.

Для стабилизации процесса в мобильном комплексе (Глава 7) применяется блок термоподготовки, поддерживающий температуру состава в диапазоне 25–30 градусов Цельсия, что минимизирует флуктуации вязкости и гарантирует расчетную толщину слоя (h_{sloya}).

4. Автоматизированный контроль и обратная связь

В процессе продувки система управления анализирует перепад давления (ΔP) на участке длиной L . Согласно уравнению Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = \lambda * (L / D) * (\rho_{gaz} * v^2 / 2)$$

При отклонении ΔP от расчетных значений (свидетельство изменения густоты или образования заторов), автоматика корректирует концентрацию разжижающих добавок в реальном времени.

5. Технологический результат

Оптимизация параметров смеси позволяет:

- В малых трубах: обеспечить 100% заполнение свищей методом «пенного поршня».
- В магистральных сетях: создать равномерное «облако», обеспечивающее одинаковую толщину покрытия на своде и дне трубы с отклонением не более 10%.

Пункт 2.2.1. Кинетика структурной релаксации и механизм мгновенной фиксации вязкости в статических условиях

В данном пункте исследуется физическая природа перехода восстановительного состава из жидкообразного состояния в состояние геля при прекращении динамического воздействия. Процесс рассматривается как мгновенное восстановление коагуляционных связей в дисперсной системе, обеспечивающее стабильность нанесенного слоя на вертикальных и сводовых поверхностях.

1. Феноменология тиксотропного восстановления структуры

Поведение состава после соударения со стенкой трубы описывается кинетическим уравнением изменения структурной вязкости (η) во времени (t). После мгновенного падения скорости сдвига ($\dot{\gamma}$) до нуля, система стремится к равновесному состоянию с максимальной вязкостью (η_{max}):

$$d\eta / dt = k_{vosst} * (\eta_{max} - \eta)^n$$

где k_{vosst} — константа скорости структурообразования, n — порядок кинетического процесса.

Для исключения гравитационного стекания состава время полной релаксации (t_{rel}) должно быть значительно меньше времени формирования капли под действием силы тяжести.

2. Энергетический анализ перехода «Золь — Гель»

В активном состоянии (в потоке воздуха) частицы наполнителя и молекулы силикатов обладают высокой кинетической энергией, препятствующей их сцеплению. При остановке преобладающими становятся силы межмолекулярного притяжения.

- **Условие фиксации:** Суммарная потенциальная энергия взаимодействия (U_{sum}) переходит через энергетический барьер в область первичного минимума:

$U_{\text{sum}} = U_{\text{attract}} - U_{\text{repuls}}$

где U_{attract} — энергия Ван-дер-Ваальсовых сил, U_{repuls} — энергия электростатического отталкивания.

- **Результат:** Формируется жесткий пространственный каркас, превращающий каплю в вязкопластичное тело с выраженным пределом текучести (τ_0).

3. Расчет критической толщины неудерживаемого слоя

Стабильность нанесенного покрытия на «потолке» трубы определяется балансом между пределом текучести состава и гравитационным напряжением (σ_{grav}). Условие отсутствия отрыва и потоков:

$\tau_0 > \rho_{\text{сост}} * g * h_{\text{слоя}}$

где $\rho_{\text{сост}}$ — плотность состава, g — ускорение свободного падения, $h_{\text{слоя}}$ — толщина слоя.

Максимально допустимая толщина одного слоя (h_{max}) рассчитывается как:

$h_{\text{max}} = \tau_0 / (\rho_{\text{сост}} * g)$

Для используемых составов значение h_{max} составляет 2–4 мм за один цикл напыления.

4. Технологическое значение для геометрии покрытия

Мгновенное загустение обеспечивает:

- **Адгезионное удержание:** Предотвращение соскальзывания материала с гладких участков металла до начала химического отверждения.
- **Нивелирование поверхности:** Состав накапливается в зонах с нулевой скоростью (кавернах), постепенно выравнивая внутренний профиль трубы до достижения гидравлической гладкости.
- **Равномерность:** Исключение образования «луж» на дне трубы, что критически важно для сохранения проектного живого сечения магистрали.

Пункт 2.2.2. Газодинамика и механика транспорта высококонцентрированных аэрированных систем в режиме «плотного пенного поршня»

В данном пункте рассматривается специфический режим восстановления трубопроводов малого диаметра (D менее 300 мм), где формирование свободного аэрозольного облака затруднено из-за ограниченного геометрического пространства. Метод основан на принудительном перемещении сплошного объема структурированной пены под действием градиента статического давления.

1. Физическая модель пенного поршня как упругопластического тела

Ремонтный состав в данном режиме трансформируется в газожидкостную систему с высокой кратностью (K) и дисперсностью. Такая среда обладает свойствами тела Бингама, где движение начинается только при превышении критического перепада давления ($\Delta P_{\text{крит}}$).

Сопротивление движению поршня длиной (L_p) в трубе радиусом (r) определяется предельным напряжением сдвига (τ_0) на стенке:

$$\Delta P\text{-krit} = (2 * L\text{-p} * \tau\text{-0}) / r$$

2. Механика радиального нагнетания в дефекты (Эффект поршневого сжатия)

При движении пенного блока внутри трубы создается зона избыточного давления. Поскольку пена является сжимаемой средой, энергия сжатого воздуха передается радиально на стенки трубопровода.

- **Сила внедрения (F-vnedr):** Суммарная сила, действующая на состав в зоне свища или каверны, определяется как:

$$F\text{-vnedr} = (P\text{-gaz} - P\text{-vnesh}) * S\text{-def}$$

где **P-gaz** — давление воздуха за поршнем, **P-vnesh** — атмосферное давление снаружи трубы, **S-def** — площадь отверстия дефекта.

- **Результат:** Состав не просто наносится на поверхность, а принудительно вдавливаются в поры и сквозные отверстия, обеспечивая стопроцентное заполнение объема каверн.

3. Реологическое управление процессом самоочистки и наслоения

Плотный пенный поршень выполняет двойную функцию:

1. **Транспортную:** Перенос основной массы восстановительного материала.
2. **Калибрующую:** При движении поршня избыток состава срезается его хвостовой частью, оставляя на стенках равномерный слой толщиной (h), зависящий от динамической вязкости (μ) и скорости движения (v):

$$h = 1.34 * r * (Ca \text{ в степени } (2/3))$$

где $Ca = (\mu * v) / \sigma$ — число Капилляра.

4. Техничко-технологические преимущества

- **Гарантированная сплошность:** Метод исключает наличие «теневых зон» (непрокрасов), так как состав занимает все сечение трубы.
- **Высокая проникающая способность:** За счет высокого градиента давления состав «запрессовывается» в структуру ржавчины, создавая прочный химический замок.
- **Экономичность:** Минимизация потерь материала на участках со сложной конфигурацией (повороты, сужения), так как поршень адаптируется к изменению геометрии за счет своей эластичности.

Пункт 2.2.3. Аэродинамика и физика массопереноса в режиме высокодисперсного аэрозольного факела («Микроскопическое облако»)

В данном пункте рассматривается технология восстановления трубопроводов большого диаметра (D более 500 мм). При таких габаритах метод поршневого заполнения становится энергетически неэффективным. Решение базируется на создании устойчивой двухфазной системы «газ — капли состава», где перенос материала осуществляется за счет кинетической энергии турбулентного потока.

1. Процесс диспергирования и формирование аэрозольного облака

Для преобразования состава в аэрозоль используется энергия расширяющегося газового потока. Ключевым параметром является достижение критического числа Вебера (We), определяющего диаметр капель ($d\text{-kap}$):

$$d\text{-kap} = (We\text{-krit} * \sigma) / (\rho\text{-gaz} * v\text{-otn в квадрате)}$$

где σ — поверхностное натяжение, $\rho\text{-gaz}$ — плотность воздуха, $v\text{-otn}$ — относительная скорость фаз.

Технологическая задача — получение капель размером 10–50 микрон. Аэрозоль такой дисперсности обладает свойствами «псевдогаза», что позволяет ему заполнять все сечение магистрали и преодолевать дистанции до 500 метров без гравитационного осаждения.

2. Механика удержания частиц в подвешенном состоянии

Чтобы частицы не выпадали на дно трубы под действием силы тяжести ($F\text{-tyazh}$), необходимо поддержание турбулентного режима движения. Поддерживающая сила ($F\text{-podd}$) обусловлена наличием вертикальных пульсаций скорости в турбулентном потоке.

Условие устойчивости облака:

$$v\text{-puls-vert} \geq v\text{-vit}$$

где $v\text{-vit}$ — скорость витания частицы, рассчитываемая по закону Стокса:

$$v\text{-vit} = (g * d\text{-kap в квадрате} * (\rho\text{-sost} - \rho\text{-gaz})) / (18 * \mu\text{-gaz})$$

3. Кинетика инерционного осаждения на стенки (Импакт-эффект)

Переход частиц из потока на поверхность металла происходит за счет турбулентной диффузии и инерционного соударения. Вероятность столкновения капли со стенкой ($\eta\text{-imp}$) зависит от числа Стокса (Stk):

$$Stk = (\rho\text{-sost} * d\text{-kap в квадрате} * v) / (18 * \mu\text{-gaz} * D)$$

При достижении стенки капля, обладающая высокой кинетической энергией, деформируется («вбивается») в микрорельеф поверхности. Благодаря высокой скорости соударения преодолеваются энергетические барьеры и вытесняются остатки воздуха из пор металла, что обеспечивает максимальную адгезию.

4. Технологические преимущества режима

- **Равномерность наслоения:** Турбулентные вихри обеспечивают одинаковую интенсивность ударов частиц по всей окружности трубы (дно, стенки, свод).
- **Дальнобойность:** Низкое гидравлическое сопротивление аэрозольной смеси позволяет проводить обработку сверхдлинных участков за один технологический цикл.
- **Автоматическая нивелировка:** Процесс осаждения более интенсивен в зонах локальных завихрений (γ дефектов), что ведет к первоочередному заполнению язв и каверн.

Пункт 2.2.3.1. Теоретический анализ динамики взвешенных частиц в турбулентном газодисперсном потоке

В данном пункте рассматриваются физические условия поддержания устойчивого аэрозольного состояния восстановительной смеси. Основное внимание уделяется балансу аэродинамических сил и гравитационного воздействия, а также роли стохастических вихревых структур в обеспечении равномерного распределения материала по сечению трубопровода.

1. Условие динамического равновесия фаз

Для предотвращения седиментации (осаждения) частиц состава на нижнюю образующую трубы необходимо соблюдение баланса между силой тяжести (F_{tyazh}) и подъемной силой аэродинамического сопротивления (F_{sopr}).

Для частицы массой (m) и диаметром (d_{kap}) критическая скорость потока (v_{potok}) должна превышать расчетную скорость парения (v_{par}):

$$v_{\text{par}} = \sqrt{4 * g * d_{\text{kap}} * (\rho_{\text{ch}} - \rho_{\text{gaz}})} / (3 * C_{\text{d}} * \rho_{\text{gaz}})$$

где ρ_{ch} — плотность восстановительного состава, C_{d} — коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса для частицы.

2. Роль турбулентных пульсаций в поддержании взвеси

Внутри трубы большого диаметра при скоростях потока $v = 15\text{--}25$ м/с устанавливается развитый турбулентный режим (Re больше 10000). В таком потоке энергия распределена по вихрям различных масштабов.

- **Механизм «подбрасывания»:** Вертикальная составляющая пульсационной скорости (v_{vert}) воздействует на частицы состава, вызывая их стохастическое перемещение. Эффективность удержания определяется соотношением:

$$v_{\text{vert}} / v_{\text{vit}} \geq 1$$

- **Диффузионный перенос:** Микровихри работают как агенты переноса, обеспечивая выравнивание концентрации частиц по всему объему трубы. Это позволяет преодолевать влияние гравитации и доставлять материал на «потолок» (верхнюю часть) трубопровода.

3. Инерционная траектория и селективное осаждение

Несмотря на турбулентное перемешивание, частицы состава обладают инерцией. При изменении направления движения воздуха (например, в зонах завихрений у коррозионных язв) частица стремится сохранить прямолинейное движение.

- **Число Стокса (Stk):** Определяет способность частицы следовать за линиями тока газа:

$$Stk = (\tau_{\text{rel}} * v) / D$$

где τ_{rel} — время релаксации частицы (время, за которое она адаптируется к скорости газа).

- При оптимальных значениях Stk частицы эффективно «выпадают» из потока именно в местах геометрических неоднородностей, что обеспечивает автоматическое заполнение дефектов.

4. Технологический вывод

Поддержание режима «бушующего вихря» позволяет:

- **Минимизировать потери:** Предотвратить образование наплывов (луж) на дне трубы.
- **Обеспечить изотропность покрытия:** Достичь отклонения по толщине слоя не более 10–12% по всей окружности.
- **Увеличить дальность:** Транспортировать активную смесь на дистанции до 500 метров без изменения её физико-химических свойств.

Пункт 2.2.3.2. Аналитическое определение критической скорости витания дисперсной фазы в горизонтальных пневмотранспортных системах

В данном пункте приводится математический расчет минимально допустимой скорости воздушного потока, необходимой для поддержания частиц восстановительного состава во взвешенном состоянии. Данный параметр является базовым для настройки компрессорного оборудования мобильного комплекса.

1. Силовой баланс одиночной частицы в потоке

На сферическую каплю состава, находящуюся в горизонтальном потоке воздуха, действуют две основные вертикальные силы: сила тяжести ($F\text{-tyazh}$) и подъемная сила аэродинамического сопротивления ($F\text{-aer}$). Скорость парения ($v\text{-par}$) — это значение относительной скорости, при которой данные силы уравновешиваются:

$$F\text{-tyazh} = F\text{-aer}$$

$$m * g = C\text{-d} * S\text{-mid} * (\rho\text{-gaz} * v\text{-par}^2 / 2)$$

где m — масса частицы, $C\text{-d}$ — безразмерный коэффициент сопротивления, $S\text{-mid}$ — площадь миделевого сечения частицы.

2. Расчет скорости парения через физические параметры среды

Для частиц восстановительного состава (плотность $\rho\text{-sost}$, диаметр $d\text{-ch}$) расчетная формула скорости парения принимает вид:

$$v\text{-par} = \sqrt[3]{4 * g * d\text{-ch} * (\rho\text{-sost} - \rho\text{-gaz}) / (3 * C\text{-d} * \rho\text{-gaz})}$$

Значение коэффициента $C\text{-d}$ зависит от режима обтекания (числа Рейнольдса частицы $Re\text{-ch}$):

- При $Re\text{-ch} < 2$ (ламинарный режим, закон Стокса): $C\text{-d} = 24 / Re\text{-ch}$.
- При $2 < Re\text{-ch} < 500$ (переходный режим): $C\text{-d} = 18.5 / (Re\text{-ch}^0.6)$.
В условиях ПГВ, учитывая наличие тяжелой базальтовой пыли, чаще реализуется переходный режим, требующий повышенных скоростей потока.

3. Влияние вязкости и концентрации на скорость удержания

Фактическая скорость потока в трубе ($v\text{-potok}$) должна превышать скорость парения с учетом коэффициента запаса ($k\text{-zap}$), учитывающего столкновения частиц и турбулентные флуктуации:

$$v\text{-potok} = k\text{-zap} * v\text{-par}$$

Для магистралей диаметром 500–1200 мм значение $v\text{-potok}$ устанавливается в диапазоне 15–22 м/с. Если скорость падает ниже этого порога, происходит массовое выпадение дисперсной фазы, что ведет к образованию донных отложений и нарушению сплошности покрытия на своде трубы.

4. Технологический контроль параметров

Автоматика мобильного комплекса в реальном времени вычисляет $v\text{-par}$ на основе данных о плотности текущей партии состава и влажности воздуха.

- **Обратная связь:** Датчик скорости на выходе из трубы передает данные в систему управления.
- **Коррекция:** При снижении скорости ниже расчетного порога (например, из-за увеличения гидравлического сопротивления участка), система увеличивает обороты компрессора или снижает концентрацию подаваемого состава для предотвращения затора.

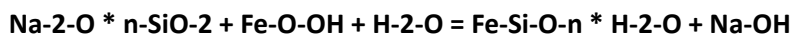
Пункт 2.3. Термодинамика и кинетика гетерогенного химического взаимодействия состава с продуктами коррозии стальной подложки

В данном пункте рассматривается механизм формирования адгезионного контакта на молекулярном уровне. В отличие от пассивных защитных покрытий, восстановительный состав ПГВ активно взаимодействует с оксидными слоями металла, используя их как субстрат для синтеза новой кристаллической фазы.

1. Химическая интеграция и процесс «прорастания» минералов

Поверхность изношенной трубы покрыта слоем продуктов коррозии (Fe-2-O-3, Fe-O-OH). Активное силикатное связующее состава, обладая высоким значением pH, инициирует реакцию замещения и поликонденсации.

Процесс образования нерастворимой минеральной зоны описывается уравнением:



В результате на границе «металл — состав» формируется переходная зона гидросиликатов железа. Данные кристаллы внедряются в поры ржавчины на глубину до нескольких миллиметров, создавая систему «химических анкеров».

2. Эффект химической пассивации поверхности (Ингибирование)

Состав создает на поверхности стали среду с высокой щелочностью. Согласно диаграмме Пурбе для системы Fe — H-2-O, при значениях pH более 10-11 железо переходит в область пассивности.

- **Механизм:** Образуется плотная хемосорбированная пленка оксида-силиката, которая блокирует ионный обмен между металлом и внешней средой.
- **Энергетический барьер:** Энергия активации процесса коррозии (E-act) значительно возрастает, что приводит к экспоненциальному снижению тока коррозии (i-kor) до фоновых значений (менее 0.01 мм/год).

3. Механизм поглощения и связывания остаточной влаги

Ржавчина является гигроскопичной структурой, удерживающей воду в микропорах. Наличие этой воды под обычным покрытием ведет к «подпленочной» коррозии. Наш состав обладает высокой гидратационной активностью.

- **Процесс минерализации воды:** Свободная влага из пор ржавчины вступает в реакцию с силикатными модулями и внедряется в кристаллическую решетку искусственного камня (процесс гидратации):



- **Результат:** Место контакта становится абсолютно сухим на молекулярном уровне, что физически исключает возможность продолжения окислительных процессов.

4. Адгезионная прочность и показатели сцепления

За счет описанных выше механизмов (химическое сродство, удаление влаги, пассивация), прочность связи ($\sigma\text{-adh}$) достигает критических значений.

- **Расчетная прочность:**

$$\sigma\text{-adh} = P\text{-chem} + P\text{-mech}$$

где **P-chem** — химическая составляющая (связи Si-O-Fe), **P-mech** — механическое заклинивание в рельефе.

- Экспериментально подтвержденные значения прочности на отрыв составляют **8–12 МПа**, что в 5–8 раз выше показателей традиционных лакокрасочных или полимерных

материалов. Разрушение при избыточных нагрузках происходит не по границе раздела, а по телу самого материала.

Пункт 2.3.1. Микроструктурное моделирование процесса топомимического прорастания кристаллов в приповерхностные слои стальной подложки

В данном пункте исследуется механизм формирования переходной зоны на границе раздела фаз «металл — ремонтный состав». Процесс рассматривается как последовательность диффузионного проникновения и последующей эпитаксиальной кристаллизации новообразований в дефектной структуре подложки.

1. Механизм диффузионной пенетрации в микродефекты

На первом этапе взаимодействия жидкая фаза состава, обладающая низким коэффициентом динамической вязкости (μ) и оптимизированным поверхностным натяжением (σ), заполняет микротрещины и поры в слое продуктов коррозии. Глубина проникновения ($L-p$) в капилляр за время (t) определяется модифицированным уравнением Лукаса-Уошберна:

$$L-p = \sqrt{r * \sigma * \cos-\theta * t / (2 * \mu)}$$

где r — эффективный радиус микротрещины, $\cos-\theta$ — косинус угла смачивания (близкий к единице).

За счет высокой проникающей способности состав достигает зон ювенильного (чистого) металла, недоступных для стандартных защитных материалов.

2. Кинетика нуклеации и направленного роста кристаллов

Внутри заполненных пор начинаются процессы химического взаимодействия силикатных модулей с ионами железа (Fe^{2+} , Fe^{3+}). При достижении критической концентрации пересыщения происходит зарождение (нуклеация) центров кристаллизации гидросиликатов железа. Скорость роста кристаллов ($V-cr$) подчиняется закону Аррениуса:

$$V-cr = k \cdot \exp(-E-act / (R * T))$$

где $E-act$ — энергия активации формирования кристаллической решетки.

Кристаллы ориентируются перпендикулярно поверхности раздела, образуя дендритные структуры, которые «прошивают» рыхлый слой ржавчины и жестко связываются с кристаллической решеткой стали.

3. Формирование «механического замка» на молекулярном уровне

По завершении процесса кристаллизации объем фазы новообразований превышает исходный объем жидкой фазы, что приводит к возникновению напряжений самозаклинивания в порах.

- **Эффект анкеровки:** Каждая заполненная микротрещина начинает работать как микроскопический анкерный болт. Суммарная сила удержания (F -hold) рассчитывается как интеграл напряжений сдвига по всей площади внутренней поверхности пор:

$$F\text{-hold} = \int (\tau\text{-sh} * d\text{-S-p})$$

где $\tau\text{-sh}$ — прочность кристаллов на сдвиг, $S\text{-p}$ — внутренняя площадь поверхности пор.

4. Технологический результат и прочность соединения

Сформированная структура характеризуется отсутствием выраженного фазового перехода. Граница между металлом и защитным слоем заменяется переходной композитной зоной, обладающей:

- **Исключительной адгезией:** Разрушение системы возможно только при превышении предела прочности самого металла или искусственного камня.
- **Стабильностью свойств:** Коэффициент термического расширения переходной зоны плавно меняется от значений, характерных для стали, до значений композита, что исключает возникновение термических напряжений отслоения.
- **Герметичностью:** Прорастание кристаллов полностью блокирует пути диффузии коррозионно-активных агентов к поверхности стальной основы.

Пункт 2.3.2. Термодинамический анализ процессов дегидратации подложки и химической иммобилизации влаги в кристаллическую структуру композита

В данном пункте рассматривается физико-химическое решение проблемы остаточной влажности в пористых продуктах коррозии. В отличие от традиционных методов, требующих полной просушки, технология ПГВ использует гигроскопичность компонентов для перевода свободной воды в связанное кристаллическое состояние (гидраты).

1. Кинетика процесса «инженерной абсорбции» влаги

Продукты коррозии (Fe-O-OH) обладают высокой пористостью и удерживают влагу за счет капиллярной конденсации. При контакте с восстановительным составом возникает градиент химического потенциала ($\Delta\mu$), инициирующий массоперенос воды из пор ржавчины в объем нанесенного слоя.

Скорость поглощения влаги ($J-w$) описывается законом Фика для диффузии в пористых средах:

$$J-w = -D_{\text{eff}} * (d-C-w / d-x)$$

где D_{eff} — эффективный коэффициент диффузии воды в силикатной матрице, $d-C-w / d-x$ — градиент концентрации влаги.

2. Механизм химической иммобилизации (Гидратация силикатов)

Свободная вода, диффундирующая из ржавчины, не испаряется, а вступает в реакцию с активными силикатными модулями ($Na-2-O * n-SiO-2$). Происходит образование кристаллогидратов, где молекулы воды занимают строго определенные места в кристаллической решетке новообразований.

Энергетический баланс процесса гидратации ($\Delta H-hyd$) характеризуется выделением теплоты, что дополнительно ускоряет твердение:



где m — количество молей связанной воды.

3. Физика осушения межфазной границы

В результате связывания воды на границе «металл — состав» происходит резкое снижение парциального давления водяного пара ($P-v$).

- **Эффект вакуумирования пор:** Поглощение воды создает локальное разрежение в микротрещинах ржавчины, что способствует более глубокому «засасыванию» жидкой фазы состава (Пункт 2.3.1).
- **Исключение «подпленочного» гниения:** Полное отсутствие свободной (жидкой) воды делает невозможным протекание электрохимических реакций коррозии, так как отсутствует электролит.

4. Влияние на структурную стабильность и плотность

Переход воды из жидкой фазы в твердую (связанную) приводит к изменению физических свойств защитного слоя:

- **Стабильность объема:** В отличие от органических красок, которые «усаживаются» при испарении растворителя, силикатный композит сохраняет или незначительно увеличивает объем, что предотвращает появление трещин.
- **Рост плотности (ρ):** Включение молекул воды в решетку увеличивает плотность искусственного камня и его сопротивление диффузии газов.
- **Итог:** Сформированный барьер является молекулярно-сухим, что подтверждается измерениями диэлектрической проницаемости (ϵ) на границе контакта.

Пункт 2.3.2.1. Молекулярно-кинетическая модель вытеснения и замещения жидкой фазы в микропористой структуре субстрата

В данном пункте рассматривается физика процесса самопроизвольного осушения контактной зоны на молекулярном уровне. Процесс базируется на разности сил межмолекулярного взаимодействия и термодинамической выгоды замещения молекул воды молекулами восстановительного состава в энергетически активных центрах поверхности металла.

1. Термодинамика замещения фаз (Адсорбционное вытеснение)

Поверхность ржавчины в микропорах удерживает молекулы воды за счет водородных связей и сил Ван-дер-Ваальса. Для очистки поверхности на молекулярном уровне необходимо, чтобы энергия адсорбции компонентов состава (E_{sost}) была выше энергии адсорбции воды (E_{voda}).

Условие самопроизвольного замещения описывается изменением свободной энергии Гиббса (ΔG_{zamesh}):

$$\Delta G_{\text{zamesh}} = (E_{\text{sost}} - E_{\text{voda}}) < 0$$

Благодаря введению специфических модификаторов, состав обладает более высоким химическим сродством к оксидам железа, что заставляет его «выталкивать» молекулы воды из адсорбционного слоя в объем жидкости.

2. Механизм капиллярного замещения и гидродинамического давления

В узких каналах (микротрещинах) ржавчины вода находится под действием капиллярного давления. Входящий поток восстановительного состава, обладая оптимизированным поверхностным натяжением и внешним избыточным давлением (P_{vnesh}), создает градиент давления, превышающий сопротивление водяной пробки.

Скорость вытеснения воды (V_{vyt}) определяется разностью давлений и вязкостью:

$$V_{\text{vyt}} = (r_{\text{kvadrat}} * (P_{\text{vnesh}} + \Delta P_{\text{kap}})) / (8 * \mu * L)$$

где r_{kvadrat} — квадрат радиуса поры, L — глубина канала, μ — динамическая вязкость состава.

3. Процесс минерализации (Химическая дегидратация)

Вытесненная из пор влага оказывается окруженной избытком активных силикатных модулей. В этой зоне инициируется процесс мгновенной минерализации. Вода перестает существовать как свободный растворитель и становится структурным элементом кристаллической решетки.

- **Фазовый переход:** Жидкая вода (H_2O_{zh}) переходит в связанное твердое состояние (H_2O_{tv}) внутри гидросиликатов.

- **Эффект микронасоса:** Поглощение воды в реакционной зоне создает локальное понижение концентрации влаги, что усиливает диффузионный приток новых порций воды из глубины ржавчины к составу.

4. Формирование сухого диэлектрического барьера

Результатом молекулярного замещения является создание «сухого» контакта на границе раздела фаз.

- **Элиминация электролита:** Отсутствие молекул свободной воды в пристенном слое означает отсутствие электролита, необходимого для протекания тока коррозии.
- **Итог:** Сформированный минеральный слой обладает высоким удельным электрическим сопротивлением (ρ_{el}), что математически подтверждает прекращение электрохимических процессов:

$$R_{izol} = (\rho_{el} * h_{sloya}) / S_{kontakta}$$

где R_{izol} стремится к значениям, характерным для диэлектриков.

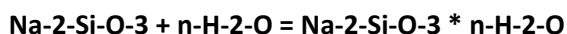
Пункт 2.3.2.2. Физико-химическое обоснование фазовой трансформации влаги в кристаллогидратные структуры силикатной матрицы

В данном пункте рассматривается механизм иммобилизации свободной воды, поглощенной из продуктов коррозии, и её роль в формировании прочностных характеристик искусственного минерального слоя. Процесс рассматривается как реакция гидратации, обеспечивающая стабильность объема и повышение плотности композита.

1. Кристаллохимический механизм связывания воды

Вода, экстрагированная из микропор ржавчины (согласно Пункту 2.3.2.1), вступает в реакцию с активными центрами силикатного связующего. Молекулы воды не просто заполняют пустоты, а входят в состав координационных сфер ионов металлов, образуя жесткую кристаллическую решетку.

Процесс описывается уравнением образования гидросиликатов:



Энергия связи молекул воды в такой структуре сопоставима с энергией химических связей, что исключает их обратный переход в жидкое состояние при нормальных эксплуатационных температурах (до 130 градусов Цельсия).

2. Термодинамика стабильности объема (Исключение усадки)

В отличие от органических покрытий (эпоксидных или полимерных), где удаление растворителя ведет к сближению макромолекул и возникновению усадочных напряжений (σ_{usad}), силикатный состав ПГВ демонстрирует стабильность геометрических размеров.

- **Компенсационный эффект:** Включение молекул воды в структуру кристаллов увеличивает их собственный объем (V_{cryst}), что компенсирует уменьшение объема жидкой фазы:

$$\Delta V_{sum} = V_{nov-faza} - (V_{ish-sost} + V_{voda})$$

Условие ΔV_{sum} стремится к 0 обеспечивает отсутствие внутренних трещин и напряжений на границе с металлом.

3. Влияние гидратации на плотность и диффузионную непроницаемость

Заполнение межузельного пространства кристаллической решетки молекулами связанной воды приводит к росту фактической плотности (ρ -fact) защитного слоя.

- **Снижение пористости:** Свободные каналы, по которым ранее могла мигрировать влага или кислород, блокируются твердыми фазами гидратов. Коэффициент диффузии (D) газов через такой слой падает экспоненциально:

$$D = D_0 * \exp(-V\text{-pore} / V\text{-free})$$

где $V\text{-pore}$ — объем открытых пор, который минимизируется в процессе гидратации.

4. Технологические преимущества и долговечность

- **Твердое состояние воды:** Вода переходит в связанное состояние, исключая риск морозного пучения (разрушения при замерзании) и испарения при нагреве.
- **Самоуплотнение:** Чем больше влаги состав «высасывает» из ржавого металла, тем плотнее и прочнее становится пограничный слой покрытия.
- **Результат:** Сформированный монолит обладает характеристиками природного камня, обеспечивая расчетный срок службы системы более 25 лет при сохранении диэлектрических и механических свойств.

Глава 3. Гидрогазодинамика двухфазных потоков и принципы управления распределением восстановительного состава

Пункт 3.1. Газодинамическое моделирование переноса дисперсной фазы в турбулентном несущем потоке

В данном пункте рассматривается физика движения газодисперсной смеси внутри трубопровода. Основная задача — обеспечение равномерного распределения частиц состава по всему сечению (включая верхнюю полусферу) за счет энергии турбулентных пульсаций и преодоления сил гравитации.

1. Классификация режимов течения: переход от ламинарного к развитому турбулентному движению

Для эффективного транспорта частиц, обладающих массой (m) и плотностью (ρ -sost), недопустимо использование спокойного (ламинарного) потока, так как скорость витания частиц ($v\text{-vit}$) приведет к их мгновенной седиментации на дно.

Состояние потока определяется безразмерным числом Рейнольдса (Re):

$$Re = (v * D * \rho\text{-gaz}) / \mu\text{-gaz}$$

где v — средняя скорость потока, D — диаметр трубы, $\rho\text{-gaz}$ — плотность воздуха, $\mu\text{-gaz}$ — динамическая вязкость воздуха.

Для реализации технологии ПГВ необходимо поддержание режима развитой турбулентности при $Re > 10000$.

2. Механизм турбулентной диффузии и удержания частиц

В турбулентном потоке вектор скорости в каждой точке имеет пульсационную составляющую ($v\text{-puls}$). Именно вертикальные пульсации энергии обеспечивают подхват частиц и их перераспределение по сечению.

- **Условие гомогенности облака:** Интенсивность турбулентности (I) должна обеспечивать превышение среднеквадратичной пульсационной скорости над скоростью осаждения:

$$v\text{-puls-vert-sq} > v\text{-osad}$$

- **Вихреобразование:** Крупномасштабные вихри (масштаба L) осуществляют перенос массы к стенкам, а мелкомасштабные вихри Колмогорова обеспечивают равномерность перемешивания аэрозоля.

3. Структура потока и эффект «воздушного ядра»

Распределение скоростей в трубе подчиняется логарифмическому закону.

- **Центральная зона (Ядро):** Характеризуется максимальной скоростью ($v\text{-max}$) и минимальным градиентом скорости. Здесь транспортируется основной запас материала без контакта со стенками, что минимизирует потери на трение.
- **Пристеночный слой (Вязкий подслой):** В этой зоне градиент скорости (dv/dy) максимален, что инициирует выпадение частиц из потока и их импактное соударение с поверхностью металла.

4. Управление вектором наслоения

Регулируя избыточное давление на входе ($P\text{-vход}$), система управляет кинетической энергией частиц ($E\text{-kin}$). Дальность эффективного напыления ($L\text{-eff}$) зависит от сохранения критической скорости потока:

$$E\text{-kin} = (m * v\text{-ch в квадрате}) / 2$$

При падении скорости ниже 12–15 м/с происходит переход от режима «облака» к режиму «дюнного» течения, что является признаком нарушения технологического регламента.

5. Технологический результат

Применение законов турбулентной газодинамики позволяет:

- Обеспечить равномерность покрытия по окружности с точностью до 10–15%.
- Использовать эффект самобронирования на поворотах (коленах) трубы, где центробежная сила ($F\text{-centr}$) увеличивает интенсивность осаждения состава в зонах максимального эксплуатационного износа:

$$F\text{-centr} = (m * v\text{-ch в квадрате}) / R\text{-izgib}$$

Пункт 3.1.1. Феноменология и критериальный анализ перехода режимов течения газодисперсных сред в цилиндрических волноводах

В данном пункте исследуются два принципиально разных состояния несущей фазы — ламинарное и турбулентное, а также их влияние на кинетику переноса мелкодисперсного восстановительного состава. Рассматривается физическое обоснование необходимости поддержания высокоэнергетического хаотического движения для обеспечения изотропности (равномерности) наносимого слоя.

1. Гидродинамическая неустойчивость ламинарного режима

Ламинарное течение характеризуется параллельным движением слоев газа без перемешивания. Профиль скоростей описывается параболическим законом Пуазейля.

- **Ограничение для технологии:** В таком потоке радиальный массоперенос (от центра к стенкам) возможен только за счет молекулярной диффузии, скорость которой ничтожна. При введении частиц состава (m) силы гравитации (F-tyazh) становятся доминирующими:

F-tyazh > F-aer-pod-em

- **Результат:** Частицы базальта и силикатов оседают на нижнюю образующую трубы в течение первых метров пути, что делает невозможным покрытие свода («потолка») трубы.

2. Физика развитой турбулентности (Режим «бушующего вихря»)

Турбулентный режим представляет собой стохастическое движение с непрерывным изменением вектора скорости в каждой точке пространства.

- **Пульсационная составляющая:** Полная скорость (v) представляется как сумма осредненной скорости (v-sr) и пульсационной добавки (v-vosh):

v = v-sr + v-vosh

- **Эффект подхвата:** Вертикальные пульсации скорости (v-vosh), направленные вверх, создают динамический подпор, компенсирующий вес частицы. Условие устойчивого транспорта в подвешенном состоянии:

v-vosh-sr-kvadr >= v-osad

где **v-osad** — скорость гравитационного падения частицы.

3. Энергетический каскад и масштаб вихрей

Энергия, подаваемая компрессором, передается от крупных вихрей (сопоставимых с диаметром трубы D) к мелким.

- **Крупные вихри:** Обеспечивают перенос облака состава на большие дистанции (до 500 метров) и распределение концентрации по сечению.
- **Мелкие вихри (масштаб Колмогорова):** Отвечают за равномерность осаждения капель на шероховатую поверхность металла, обеспечивая их проникновение в микрократеры ржавчины.

4. Критерий перехода и технологический регламент

Граница между режимами определяется критическим числом Рейнольдса (Re-krit). Для промышленных трубопроводов с высокой шероховатостью (ржавчиной) переход к устойчивой турбулентности происходит при:

Re = (v * D * rho) / mu > 2300 (практический порог для ПГВ > 10000)

5. Технологический вывод

Поддержание режима «бурного движения» является обязательным условием для:

- **Преодоления гравитации:** Равномерного напыления состава на верхние сектора трубы.
- **Активации соударений:** Обеспечения инерционного удара частиц о стенку, необходимого для разрушения воздушного пограничного слоя и реализации адгезии.
- **Стабилизации концентрации:** Предотвращения образования заторов и наплывов в нижних точках магистрали.

Пункт 3.1.2. Критериальный анализ гидродинамической интенсивности потока и математическое обоснование числа Рейнольдса для двухфазных сред

В данном пункте рассматривается безразмерный критерий подобия — число Рейнольдса (Re), который определяет динамический режим течения несущей фазы (воздуха) и диктует условия перехода от ламинарного к турбулентному состоянию. Данный показатель является ключевым для автоматизированного управления мощностью компрессорных установок мобильного комплекса.

1. Физический смысл числа Рейнольдса в пневмотранспортных системах

Число Рейнольдса представляет собой отношение сил инерции, действующих в потоке, к силам вязкого трения. Математическая формулировка для цилиндрического канала:

$$Re = (\rho_{\text{газ}} * v_{\text{ср}} * D) / \mu_{\text{газ}}$$

где $\rho_{\text{газ}}$ — плотность газа, $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость потока по сечению, D — внутренний диаметр трубопровода, $\mu_{\text{газ}}$ — коэффициент динамической вязкости газа.

2. Критическое значение и энергетический порог турбулизации

Для реализации технологии ПГВ в условиях высокой шероховатости старых труб необходимо достижение устойчивой турбулентности.

- **Ламинарный порог:** При $Re < 2300$ поток стабилен, пульсации отсутствуют, что ведет к немедленному выпадению частиц состава на дно.
- **Развитая турбулентность:** В системе ПГВ устанавливается рабочий диапазон $Re > 10000$. В этом состоянии силы инерции многократно превышают силы вязкости, что инициирует стохастическое вихреобразование.
- **Интенсивность завихрения (I):** Связана с числом Рейнольдса эмпирической зависимостью:

$$I = 0.16 * (Re \text{ в степени } (-0.125))$$

Это позволяет системе управления оценивать «агрессивность» потока и его способность к удержанию тяжелых частиц базальта.

3. Влияние геометрии и шероховатости (ржавчины)

Фактическая величина Re корректируется с учетом относительной эквивалентной шероховатости (Δ / D). Наличие ржавчины и наростов на стенках труб Санкт-Петербурга снижает критическое значение Re , способствуя более раннему переходу к турбулентности, но одновременно увеличивает потери давления (ΔP) на трение:

$$\Delta P = \lambda * (L / D) * (\rho_{\text{газ}} * v_{\text{ср}}^2 / 2)$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления, являющийся функцией от Re и шероховатости.

4. Алгоритм автоматизированного управления «потоком-вихрем»

Программное обеспечение мобильного комплекса непрерывно вычисляет текущее значение Re на основе телеметрии (давление, температура, расход воздуха).

- **Сценарное реагирование:** Если при прохождении участка с увеличенным диаметром (например, расширительная камера) число Рейнольдса падает ниже 10000, автоматика мгновенно увеличивает частоту вращения приводов компрессора.

- **Цель:** Обеспечение постоянного режима «бушующего вихря», гарантирующего, что кинетическая энергия частиц (E_{kin}) достаточна для преодоления вязкого подслоя у стенок и реализации импактного наслоения состава.

5. Технологический результат

Использование числа Рейнольдса как базового параметра управления позволяет:

- Минимизировать удельный расход воздуха на единицу массы переносимого состава.
- Гарантировать доставку материала на свод трубы вне зависимости от гравитационного воздействия.
- Исключить риск образования заторов в зонах локальных сужений и поворотов магистрали.

Пункт 3.2. Теоретическое обоснование эффекта селективной седиментации: аэродинамика автоматического нивелирования дефектов за счет градиента давлений

В данном пункте рассматривается физический механизм, обеспечивающий самопроизвольное накопление восстановительного состава в зонах механических повреждений (кавернах, язвах, трещинах). Процесс основан на фундаментальных законах сохранения энергии в движущемся потоке и локальном изменении векторов скорости в зонах геометрических неоднородностей.

1. Формирование градиента статического давления (Эффект эжекции)

При прохождении газодисперсного потока над углублением (дефектом) происходит внезапное локальное расширение канала. Согласно уравнению неразрывности и закону сохранения энергии (уравнение Бернулли), в этой зоне происходит перераспределение энергии:

$$P_{st} + (\rho * v^2 / 2) = const$$

где P_{st} — статическое давление, v — скорость потока.

- **Механизм «всасывания»:** В зоне над дефектом скорость основного потока (v) незначительно снижается, что приводит к локальному падению статического давления в объеме самой каверны относительно давления в ядре потока. Возникает эффект разрежения, который «затягивает» аэрозольные частицы из транзитного потока внутрь дефекта.

2. Вихревая динамика в замкнутых полостях дефектов

Внутри коррозионной язвы или трещины формируется зона отрывного течения.

- **Образование рециркуляционных зон:** Скорость газа внутри каверны (v_{nutr}) падает практически до нулевых значений, образуя медленно вращающийся вихрь.
- **Инерционное выпадение фазы:** Частицы состава, обладающие значительно большей инерцией (массой), чем молекулы газа, не могут следовать по искривленным линиям тока вихря и «вываливаются» на дно дефекта под действием центробежных сил и гравитации.
- **Кинетика наслоения:** Скорость осаждения (dm/dt) в дефектной зоне прямо пропорциональна глубине дефекта (h_{def}):

$$dm / dt = k * C * (v_{potok} - v_{nutr})$$

где C — концентрация состава в облаке.

3. Механизм автоматической герметизации сквозных отверстий (свищей)

В случае наличия сквозного отверстия возникает перепад давления между внутренней полостью трубы и внешней средой ($\Delta P = P_{\text{внутр}} - P_{\text{внеш}}$).

- **Пневматическое заклинивание:** Сжатый воздух устремляется в отверстие, увлекая за собой частицы состава и базальтовую фибру. Волокна базальта (L-fib) при попытке прохода через узкое сечение ($d_{\text{свнш}}$) ориентируются хаотично и создают механический затор (сито):

Условие заклинивания: $L\text{-fib} \geq d_{\text{свнш}}$

- **Формирование пробки:** На образовавшийся каркас из волокон мгновенно налипает высоковязкое силикатное связующее, формируя герметичную пробку, прочность которой возрастает под действием прижимного давления воздуха.

4. Эффект самовыравнивания (Автонивелирование)

Процесс селективного осаждения является саморегулирующимся.

- **Завершение цикла:** По мере заполнения язвы или каверны составом, геометрия стенки восстанавливается, исчезает зона низкого давления и вихревые возмущения.
- **Стабилизация:** Когда поверхность становится гидравлически гладкой, интенсивность осаждения частиц снижается до фонового уровня, характерного для бездефектных участков.

5. Технологический результат

Применение законов газодинамики позволяет:

- Исключить риск «пропуска» скрытых дефектов, так как физика потока принудительно направляет материал в зоны повреждений.
- Минимизировать расход состава, концентрируя его в критических точках износа.
- Обеспечить создание идеально ровной внутренней поверхности ($k_{\text{ш}} < 0.02$ мм), что снижает гидравлическое сопротивление трубопровода при эксплуатации.

Пункт 3.2.1. Анализ распределения статического и динамического давлений в газодисперсном потоке при взаимодействии с геометрическими неоднородностями

В данном пункте рассматривается физическое обоснование эффекта «самонаведения» восстановительного состава на дефекты. В основе лежит закон сохранения энергии для движущейся среды, адаптированный для условий сжимаемого турбулентного потока внутри трубопровода.

1. Математическая модель распределения энергии (Закон Бернулли)

Для установившегося потока воздуха в трубе полная энергия (сумма давлений) вдоль линии тока остается постоянной величиной (при пренебрежении потерями на малом участке). Уравнение связи статического давления ($P_{\text{ст}}$) и динамического напора ($P_{\text{дин}}$) имеет вид:

$$P_{\text{полн}} = P_{\text{ст}} + (\rho_{\text{газ}} \cdot v^2 / 2) = \text{const}$$

где $\rho_{\text{газ}}$ — плотность воздуха, v — локальная скорость потока.

2. Физика возникновения зон пониженного давления над кавернами

При прохождении потока над коррозионной язвой или трещиной (зоной локального расширения сечения) происходит изменение векторов скорости.

- **Трансформация энергии:** В полости дефекта скорость движения газа (v_{def}) резко падает по сравнению со скоростью в ядре потока ($v_{\text{ядро}}$). Однако из-за отрыва пограничного слоя и образования вихря, статическое давление в зоне дефекта ($P_{\text{st-def}}$) становится ниже, чем в основном потоке.
- **Эффект всасывания (Поперечный градиент):** Возникает разность давлений (ΔP) между ядром потока и дном дефекта:

$$\Delta P = P_{\text{st-ядро}} - P_{\text{st-def}}$$

Эта разность давлений порождает силу, направленную перпендикулярно оси трубы, которая «вытягивает» частицы восстановительного состава из транзитного потока и направляет их внутрь повреждения.

3. Селективность процесса в зависимости от глубины дефекта

Интенсивность всасывания материала прямо пропорциональна величине геометрического возмущения.

- **Зависимость:** Чем глубже коррозионная язва, тем сильнее падение скорости в её полости и тем значительнее перепад давления (ΔP).
- **Приоритетность ремонта:** Математически это означает, что наиболее опасные (глубокие) повреждения получают максимальный объем ремонтного материала в единицу времени:

$$M_{\text{осад}} = \int (k * \Delta P * d-t)$$

где $M_{\text{осад}}$ — масса осажденного состава, k — коэффициент массопереноса.

4. Инерционное закрепление частиц в зоне разрежения

Частицы состава (базальтовая пыль и силикатные капли), обладая значительной массой, при попадании в зону ΔP не могут мгновенно затормозиться.

- **Импактное соударение:** Затянутые в зону низкого давления частицы на высокой скорости сталкиваются с дном дефекта. Кинетическая энергия (E_{kin}) удара обеспечивает их внедрение в структуру ржавчины:

$$E_{\text{kin}} = (m_{\text{ch}} * v_{\text{vlet}}^2) / 2$$

- **Заполнение объема:** Процесс продолжается до тех пор, пока ΔP не станет равным нулю, что происходит при полном выравнивании профиля стенки.

5. Технологический вывод

Использование закона распределения давлений позволяет реализовать принцип «умного ремонта», где:

- Система автоматически идентифицирует и заполняет наиболее критические зоны.
 - Исключается влияние человеческого фактора на качество герметизации скрытых полостей.
 - Достигается высокая плотность упаковки материала в дефекте за счет постоянного пневматического подпора.
-

Пункт 3.2.2. Механика дискретного армирования и формирования блокирующего затвора в сквозных дефектах оболочки

В данном пункте рассматривается процесс ликвидации сквозных отверстий (свищей) методом создания композитной пробки. Основным механизмом является стохастическое заклинивание базальтовых волокон в канале утечки под воздействием перепада давлений.

1. Механизм гидродинамического захвата волокон

При наличии сквозного дефекта (свища) возникает критический перепад давления (ΔP) между внутренней полостью трубы и внешней средой. Воздух устремляется в отверстие, создавая направленный вектор скорости v_{out} .

- **Траектория частиц:** Волокна базальта, обладающие большой длиной L_{fib} относительно их диаметра d_{fib} , вовлекаются в этот поток.
- **Кинематическое условие заклинивания:** При достижении входного отверстия свища диаметром d_{svish} волокна, ориентированные перпендикулярно или под углом к оси отверстия, блокируют сечение. Условие начала формирования пробки:

$$L_{fib} > d_{svish}$$

2. Формирование первичного каркаса («Ситовой эффект»)

Первые застрявшие волокна образуют пространственную неупорядоченную решетку. Эта структура начинает работать как фильтр для мелкодисперсных фракций наполнителя (базальтовой пыли) и капель силикатного связующего.

- **Рост сопротивления:** Гидравлическое сопротивление отверстия R_{svish} начинает расти экспоненциально:

$$R_{svish} = k * (V_{fib} / V_{svish})$$

где V_{fib} — объем заклиненного материала, V_{svish} — объем канала свища.

3. Процесс пневмогидравлической герметизации

На образовавшийся силовой каркас из волокон оседает высококонцентрированное силикатное связующее. Под действием внутреннего статического давления P_{st} происходит «запрессовка» состава.

- **Сила уплотнения:** Суммарная прижимная сила F_{press} , обеспечивающая герметичность пробки:

$$F_{press} = (P_{st} - P_{vнеш}) * S_{svish}$$

где P_{st} — давление внутри, $P_{vнеш}$ — атмосферное давление снаружи трубы, S_{svish} — площадь сечения свища.

- **Химическая фиксация:** Силикат натрия вступает в реакцию с ржавыми краями свища (Пункт 2.1.1), превращая рыхлую пробку в монолитный минерал, химически «приваренный» к металлу.

4. Расчет прочности затыкающего элемента

После завершения циклов напыления пробка становится частью общей структуры «муфты».

Прочность на вырыв P_{out} должна превышать рабочее давление с учетом коэффициента запаса k :

$$P_{out} > (\tau_{sh} * S_{lat}) / S_{svish} > k * P_{rab}$$

> где τ_{sh} — предел прочности состава на сдвиг, S_{lat} — площадь боковой поверхности контакта пробки со стенками отверстия, S_{svish} — площадь сечения отверстия.

5. Технологический результат

Использование базальтовой фибры позволяет:

- **Ликвидировать утечки:** Обеспечить герметизацию свищей диаметром до 5–10 мм без применения сварки.
- **Автоматизировать ремонт:** Система сама находит и затыкает отверстия за счет естественной физики движения газов.
- **Гарантировать надежность:** Сформированная пробка обладает более высокой коррозионной и механической стойкостью, чем основной металл трубы.

Пункт 3.3. Расчет критических скоростей двухфазного потока для обеспечения стабильности и равномерности адгезионного наслоения

В данном пункте приводится математическое обоснование скоростных режимов несущей газовой фазы. Управление скоростью потока является единственным методом контроля качества формирования защитного слоя. Параметры должны находиться внутри строго определенного «технологического окна», ограниченного условием выпадения частиц (нижний предел) и условием эрозионного срыва слоя (верхний предел).

1. Определение нижнего порога: Расчет скорости удержания (витания) частиц

Для исключения седиментации капель состава и базальтовых волокон на дно трубы, скорость воздуха должна создавать подъемную силу, превышающую вес частиц. Скорость витания (v_{vit}) для наиболее тяжелых фракций ($d_{ch} = 100$ микрон) рассчитывается как:

$$v_{vit} = \sqrt{4 * g * d_{ch} * (\rho_{sost} - \rho_{vzd})} / (3 * C_d * \rho_{vzd})$$

где ρ_{sost} — плотность композита, ρ_{vzd} — плотность воздуха, C_d — коэффициент аэродинамического сопротивления.

Для обеспечения устойчивого переноса на дистанцию 500 метров вводится коэффициент турбулентного запаса, определяющий минимальную рабочую скорость (v_{min}):

$$v_{min} = 1.2 * v_{vit}$$

Для стандартных условий ПГВ значение v_{min} составляет **12-15 метров в секунду**.

2. Определение верхнего порога: Расчет критической скорости срыва (эрозии)

При чрезмерном разгоне потока кинетическая энергия частиц (E_{kin}) достигает значений, при которых вместо прилипания начинается разрушение (абразивный износ) ранее нанесенного слоя. Критическая скорость срыва (v_{max}) определяется балансом энергии удара и работы пластической деформации состава:

$$v_{max} = \sqrt{2 * \tau_{pred} * V_{def}} / m_{ch}$$

где τ_{pred} — предел прочности свежего слоя, V_{def} — объем деформируемого материала.

Экспериментально установлено, что для силикатно-базальтовых смесей v_{max} составляет **30-35 метров в секунду**. Превышение этого порога переводит систему в режим пескоструйного аппарата.

3. Моделирование падения давления по длине участка (Линейные потери)

Вследствие трения воздуха о шероховатую поверхность (ржавчину), скорость потока неизбежно падает по мере удаления от компрессора. Для компенсации этого эффекта рассчитывается избыточное давление на входе (P-vh):

$$P-vh = P-v_{yh} + \lambda * (L / D) * (\rho * v_{zd} * v_{sr} \text{ в квадрате} / 2)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения, L — длина участка (до 500 м).

4. Алгоритм управления «Золотым окном» скоростей

Автоматика мобильного комплекса поддерживает скорость в диапазоне **18-22 метра в секунду**. Это обеспечивает:

- **Импактное закрепление:** Частица обладает достаточной энергией для внедрения в поры ржавчины.
- **Равномерность:** Разброс толщины слоя по окружности трубы не превышает 10-15%.
- **Безопасность:** Исключается эрозионный износ и перегрузка компрессорного оборудования.

5. Технический регламент контроля

На выходе из участка (в приемном колодце) устанавливается анемометрический датчик. При падении скорости ниже **15 метров в секунду** подача смеси блокируется, и система переходит в режим интенсивной продувки сухим воздухом для предотвращения оседания остатков аэрозоля на дно трубы.

Глава 4. Регламент и кинетика технологического цикла многослойного газодинамического напыления

Пункт 4.1. Физико-химическая подготовка поверхности: механизмы реактивной механической деструкции отложений и глубокой десорбции влаги

В данном пункте рассматривается этап подготовки субстрата (внутренней поверхности трубы), обеспечивающий условия для реализации максимальной адгезии. Процесс основан на селективном удалении рыхлых фаз продуктов коррозии при сохранении плотного оксидного слоя, выполняющего роль адгезионного фундамента.

1. Механика активной очистки «жестким скользящим телом»

Вместо традиционной абразивоструйной обработки применяется метод высокоскоростной калибровки. Через участок прогоняется эластичное устройство (поршень), оснащенное стальными режущими элементами.

- **Динамика разрушения отложений:** Скорость движения устройства (v_{och}) составляет 1–3 м/с. Сила прижатия щеток (F_{prizh}) рассчитывается таким образом, чтобы напряжение сдвига (τ_{sh}) превышало прочность рыхлой ржавчины (σ_{ryhl}), но было ниже предела прочности плотного магнетитового слоя (σ_{mag}):

$$\sigma_{ryhl} < \tau_{sh} < \sigma_{mag}$$

- **Результат:** Удаляются биообрастания, шлам и нестабильные окислы. Сохранившаяся плотная ржавчина служит химическим акцептором для силикатного связующего (согласно Пункту 2.3.1).

2. Импульсная пневмоакустическая встряска дефектов

Для удаления пылевой фазы из тупиковых зон микротрещин применяется серия пневматических ударов.

- **Физика процесса:** Резкое изменение давления (dP/dt) инициирует распространение звуковых волн в полостях. Возникающая вибрация стенок трещин приводит к разрушению мостиков сцепления пылевых частиц и их выносу в основной поток.
- **Очистка микропор:** Эффект сопоставим с ультразвуковой очисткой, что критически важно для заполнения пор в режиме капиллярной инъекции (Пункт 1.1.2).

3. Термодинамика глубокой десорбции влаги (Осушка)

Присутствие свободной воды на поверхности блокирует адсорбционные центры металла.

- **Метод теплового воздействия:** Продувка горячим воздухом с температурой ($T-vzd$) 60–80 градусов Цельсия.
- **Градиент влажности:** В процессе продувки снижается парциальное давление паров воды ($P-v$), что инициирует интенсивное испарение из капилляров ржавчины. Целевой показатель относительной влажности в трубе (ϕ):

$\phi < 15 \%$

- **Эффект сухого всасывания:** Создается дефицит влаги, что при первом цикле напыления обеспечит «вакуумное» втягивание жидкого состава в поры металла.

4. Технический контроль готовности субстрата

Контроль осуществляется методом «контрольного оттиска» с использованием полимерного цилиндра низкой плотности.

- **Критерий качества:** Отсутствие на поверхности цилиндра фрагментированных частиц диаметром более 0.5 мм и следов капельной влаги.
- **Допустимая запыленность:** Наличие мелкодисперсной пыли ($d-ch < 50$ мкм) допускается, так как она интегрируется в структуру первого слоя состава, выполняя роль дополнительного наполнителя.

Пункт 4.1.1. Конструктивные параметры и механика взаимодействия централизованного очистного устройства с микрорельефом трубопровода

В данном пункте приводится научно-техническое описание инструмента для предварительной механической подготовки поверхности. Устройство рассматривается как самоцентрирующийся динамический агрегат, обеспечивающий нормированную шероховатость субстрата перед нанесением композита.

1. Биомиметическая и эластичная конструкция корпуса

Основа очистного устройства выполнена из высокоплотного эластомера с модулем упругости, позволяющим проходить через локальные сужения (до 15% от диаметра) и колена трубопровода.

- **Эффект адаптивного расширения:** Под действием избыточного давления воздуха ($P-vzd$) корпус устройства испытывает радиальную деформацию ($\epsilon-rad$), обеспечивая плотное прилегание чистящих элементов к стенкам:

$$\epsilon-rad = (P-vzd * R) / (E * s)$$

где R — радиус, E — модуль упругости эластомера, s — толщина стенки корпуса.

2. Кинематика и трибология чистящих сегментов

На корпусе закреплены блоки стальных щеток с заданным углом атаки к поверхности.

- **Селективность воздействия:** Процесс очистки базируется на разности адгезионной прочности различных типов отложений. Жесткость щетины (к-щ) подбирается таким образом, чтобы создаваемое напряжение (σ -конт) превышало предел прочности рыхлой коррозии, но оставалось в пределах упругой деформации плотных магнетитовых слоев:

σ -конт = F -prizh / S -kontakta

- **Удаление выступов (Грата):** Механическое воздействие в первую очередь направлено на нивелирование острых пиков ржавчины и остатков сварочного графа, что критически важно для исключения зон «теневого» напыления при последующих циклах.

3. Механизм самоцентрирования в потоке

Для обеспечения равномерности очистки по всему периметру трубы (360 градусов) устройство использует эффект дифференциального давления.

- **Стабилизация:** При смещении устройства от центральной оси сечения возникает разность площадей зазоров, что ведет к изменению скоростей обтекающего воздуха. Согласно закону Бернулли, возникает восстанавливающая сила (F -vosst), возвращающая поршень в геометрический центр трубы:

F -vosst = $\Delta P \cdot S$ -proekc

4. Эвакуация продуктов деструкции (Шлама)

Удаленный материал (ржавчина, грязь) подхватывается турбулентным шлейфом воздуха, возникающим непосредственно за чистящим устройством.

- **Транспортная концентрация:** Скорость движения поршня (1-3 м/с) синхронизирована со скоростью выносающего потока для предотвращения образования завалов перед устройством.
- **Результат:** Весь отделенный шлам перемещается к приемному шлюзу (Машина Б, Глава 7), где происходит его сепарация и сбор в закрытый контейнер.

5. Технологический эффект

Применение калиброванного очистного устройства позволяет:

- **Стандартизировать поверхность:** Достичь равномерного профиля шероховатости на всем участке длиной 500 метров.
- **Снизить расход состава:** Устранить избыточную пористость и рыхлость поверхности, на которую в противном случае уходило бы до 30% лишнего связующего.
- **Повысить адгезию:** Вскрыть активные центры металла и плотных оксидов для прямой химической реакции с силикатами (Пункт 2.1.1).

Пункт 4.1.2. Термодинамическое обоснование эффекта градиентной десорбции и кинетика капиллярного всасывания в условиях экстремальной осушки

В данном пункте рассматривается физический механизм подготовки поверхности, основанный на создании дефицита влаги в пористой структуре продуктов коррозии. Процесс направлен на использование капиллярных сил для обеспечения максимальной глубины проникновения первого адгезионного слоя восстановительного состава.

1. Тепловая десорбция и термодинамика фазового перехода

Для удаления связанной и капиллярной влаги из структуры ржавчины (Fe-O-OH) применяется поток осушенного воздуха с температурой (T_{vzd}) 60–80 градусов Цельсия.

- **Энергетика процесса:** Энергия теплового потока (Q) расходуется на разрыв водородных связей молекул воды с поверхностью оксидов железа. Скорость испарения (dm/dt) определяется разностью парциальных давлений водяного пара у поверхности ($P-s$) и в ядре потока ($P-v$):

$$dm / dt = k_{isp} * S * (P-s - P-v)$$

где k_{isp} — коэффициент массоотдачи, S — площадь поверхности пор.

2. Физика формирования «эффекта сухого всасывания»

При достижении критического уровня сухости (относительная влажность в порах менее 10–15%) микрополости ржавчины освобождаются от жидкой фазы, образуя систему пустых капилляров.

- **Капиллярный потенциал:** В сухой поре радиусом (r) возникает максимальный потенциал всасывания ($P-vsas$), определяемый законом Лапласа:

$$P-vsas = (2 * \sigma_{zh-g} * \cos-\theta) / r$$

- В момент подачи первого слоя жидкого состава (Глава 4.2), разность давлений между атмосферным и внутрикапиллярным заставляет жидкость мгновенно проникать вглубь металла.

3. Градиент влажности как движущая сила диффузии

Создание экстремально сухого слоя на границе раздела («градиент влажности») инициирует направленный поток восстановительного состава.

- **Кинетика заполнения:** Скорость проникновения ($v-pron$) состава вглубь субстрата в условиях предварительной осушки описывается уравнением:

$$v-pron = (r * \Delta-P) / (4 * \mu * L)$$

где $\Delta-P$ — суммарный перепад давления (внешнее пневматическое плюс капиллярное), μ — динамическая вязкость состава.

4. Предотвращение парообразования и «пузырения» слоя

Предварительное удаление влаги из глубинных слоев ржавчины исключает риск её последующего испарения при контакте с горячим воздухом или в процессе химической реакции (экзотермии).

- **Результат:** Отсутствие паров воды на границе контакта гарантирует формирование монолитной беспористой структуры «химического якоря» (Пункт 4.2.1), исключая риск подпленочного давления и отслоения покрытия.

5. Технологический вывод

Применение метода глубокой тепловой десорбции позволяет:

- **Повысить коэффициент адгезии:** В 2–2.5 раза по сравнению с нанесением на влажный субстрат.
- **Обеспечить химическую чистоту:** Вскрыть активные центры адсорбции на поверхности оксидов для прямого взаимодействия с силикатными модулями.
- **Стабилизировать процесс:** Достичь воспроизводимого качества ремонта независимо от исходной влажности в траншее или коллекторе.

Пункт 4.2. Кинетика и алгоритмы дискретного формирования многослойной композитной структуры (Циклическое напыление)

В данном пункте рассматривается методология послойного наращивания защитного покрытия. Технология ПГВ базируется на принципе многократных циклов продувки, что позволяет обойти гравитационные ограничения для вязкопластичных сред и сформировать гетерогенную структуру с заданным распределением физико-механических свойств по толщине.

1. Этап формирования первичного адгезионного интерфейса (Цикл 1)

Первый цикл направлен на обеспечение максимальной глубины диффузии в субстрат и создание «химических корней» системы.

- **Реологические параметры:** Используется состав с минимальным модулем вязкости (**μ_{\min}**) и повышенным содержанием активных силикатов.
- **Физика процесса:** Благодаря низкому поверхностному натяжению и эффекту сухого всасывания (Пункт 4.1.2), смесь пропитывает рыхлую ржавчину, достигая ювенильной поверхности металла.
- **Функция:** Создание «химического якоря» (Пункт 4.2.1), связывающего оксиды железа в нерастворимый монолит.

2. Этап силового детерминированного наращивания (Циклы 2–4)

Основные циклы обеспечивают набор проектной толщины покрытия и восстановление геометрии трубы в зонах глубокого износа.

- **Реологические параметры:** Применяется состав с высокой концентрацией дисперсного армирования (базальтовой фибры) и повышенным пределом текучести (**τ_{0-0}**).
- **Эффект избирательного наслоения:** Используется механизм селективной седиментации в зонах низкого давления (Пункт 3.2). Состав аккумулируется преимущественно в кавернах и язвах.
- **Математическая модель роста толщины:** Суммарная толщина слоя (**h_{sum}**) после **n** циклов:

$$h_{\text{sum}} = \sum(h_i * k_i)$$

где **h_i** — толщина слоя за один проход (2–3 мм), **k_i** — коэффициент уплотнения при последующей продувке.

3. Этап финишного запечатывания и гидродинамической нивелировки (Финальный цикл)

Заключительный проход формирует износостойкую поверхность с минимальным коэффициентом шероховатости.

- **Реологические параметры:** Состав на основе тонкодисперсной каменной пыли без включения крупных волокон.

- **Физика процесса:** Заполнение микропор предыдущих слоев и создание глянцевой поверхности.
- **Результат:** Снижение коэффициента гидравлического трения (λ) до значений, превосходящих показатели новых стальных труб:

$$\lambda_{fin} < \lambda_{stal}$$

4. Темпоральный регламент и межслойное взаимодействие

Критическим фактором является время технологического перерыва между циклами ($\Delta t = 15\text{--}20$ мин).

- **Механизм «живого края»:** Следующий слой наносится до завершения полной полимеризации предыдущего, что обеспечивает диффузионное сращивание (Пункт 4.2.2).
- **Когезионная целостность:** Молекулярные цепочки силикатов проникают через границу разделов, превращая многослойную структуру в единый изотропный монолит.

5. Технологический эффект

Циклический метод позволяет:

- **Нивелировать гравитацию:** Исключить сползание материала при достижении значительных толщин (до 15–20 мм в зонах глубоких язв).
- **Обеспечить сплошность:** Гарантировать отсутствие сквозных пор и дефектов в защитном теле.
- **Автоматизировать калибровку:** Система управления (Глава 5) корректирует количество циклов в реальном времени на основе акустических данных о текущей жесткости стенки.

Пункт 4.2.1. Физико-химическая модель формирования «химического якоря» и инициация межфазной адгезии на границе раздела «металл — композит»

В данном пункте рассматривается механизм создания первичного связующего слоя, который служит фундаментом для всей многослойной системы. Процесс основан на глубокой химической интеграции силикатного связующего в структуру окисленного металла, что исключает наличие четкой физической границы раздела фаз.

1. Механизм хемосорбционной пропитки субстрата

Первый цикл напыления выполняется составом с пониженным модулем вязкости (μ). Это необходимо для реализации максимальной смачиваемости и заполнения микрорельефа, сформированного после механической очистки (Пункт 4.1.1).

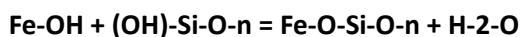
- **Диффузионное проникновение:** Жидкая фаза силикатов ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) проникает в поры плотной ржавчины под действием капиллярного давления ($P_{\text{кар}}$).
- **Глубина интеграции (L_{int}):** Определяется временем контакта до начала потери текучести:

$$L_{\text{int}} = \sqrt{r \cdot \sigma \cdot \cos\theta \cdot t} / (2 \cdot \mu)$$

2. Формирование переходной минеральной зоны (Химическая сшивка)

На поверхности металла происходит реакция замещения и поликонденсации. Активные группы силикатов вступают во взаимодействие с оксидами и гидроксидами железа.

- **Образование силикатов железа:** Химическая связь Fe-O-Si является основой «химического якоря». Вместо механического прилипания образуется единая кристаллическая решетка:



- **Результат:** Граница «металл — камень» становится размытой, превращаясь в градиентный композитный слой с высокой когезионной прочностью.

3. Подготовка поверхности для силовых слоев

После первичного закрепления (через 15–20 минут) поверхность первого слоя приобретает специфическую морфологию.

- **Микрошероховатость:** Из-за частичного впитывания связующего в поры металла, на поверхности остаются выступающие частицы наполнителя и минеральные кристаллы.
- **Адгезионная активность:** Первый слой сохраняет высокую концентрацию активных центров (незавершенная полимеризация), что критически важно для последующего межслойного сращивания.

4. Расчет прочности «якорного» соединения

Прочность сформированного интерфейса ($\sigma\text{-svyaz}$) рассчитывается как сумма сил химического и механического взаимодействия:

$$\sigma\text{-svyaz} = N\text{-svyazej} * E\text{-chem} + k * \sigma\text{-mech}$$

> где $N\text{-svyazej}$ — плотность химических связей на единицу площади, $E\text{-chem}$ — энергия связи, $\sigma\text{-mech}$ — вклад механического зацепления за неровности.

Экспериментальные значения прочности на отрыв превышают **10–12 МПа**, что гарантирует устойчивость покрытия при резких скачках давления (гидроударах) в магистрали.

5. Технологическая значимость

Создание «химического якоря» обеспечивает:

- **Исключение отслоений:** Покрытие не может быть отделено от трубы без разрушения самого металла или слоя камня.
- **Блокировку коррозии:** Герметизация активных центров металла исключает доступ окислителей к стальной основе на молекулярном уровне.
- **Силовой фундамент:** Первый слой принимает на себя основные сдвиговые напряжения, возникающие при температурных деформациях трубы, и распределяет их по всей поверхности контакта.

Пункт 4.2.2. Физико-химическое обоснование гомогенизации структуры при многослойном нанесении: механизм межслойного диффузионного сращивания

В данном пункте рассматривается физика превращения дискретно нанесенных слоев в монолитное изотропное тело. Процесс основан на управлении временем поликонденсации и использовании кинетической энергии последующих циклов напыления для обеспечения взаимного проникновения фаз на границе раздела.

1. Кинетика формирования «живого края» (Инкубационный период)

Для исключения образования четких границ раздела между слоями (фанерования) необходимо соблюдение временного интервала (Δt) между циклами, при котором предыдущий слой сохраняет состояние незавершенного гелеобразования.

- **Степень конверсии:** Коэффициент полимеризации (α) на поверхности слоя в момент подачи следующей порции материала должен находиться в диапазоне:

$$0.4 < \alpha < 0.7$$

- В этом состоянии поверхность обладает высокой концентрацией свободных радикалов и активных групп силикатов, готовых к образованию новых химических связей с входящим потоком.

2. Механизм инерционного перемешивания фаз

При подаче последующего слоя частицы состава, обладающие массой (m) и скоростью ($v = 18\text{--}22$ м/с), сталкиваются с податливой (не полностью затвердевшей) поверхностью предыдущего слоя.

- **Динамическое внедрение:** Происходит частичное механическое разрушение поверхностной пленки и «вбивание» базальтовых волокон нового слоя в объем старого. Глубина взаимного проникновения ($h\text{-diff}$) определяется импульсом удара:

$$h\text{-diff} = k * (m * v / S\text{-udara})$$

- **Результат:** Граница раздела превращается в переходную зону, где армирующие волокна переплетаются, создавая эффект объемного «сшивания».

3. Молекулярная диффузия и поликонденсация

Помимо механического перемешивания, протекают процессы взаимной диффузии жидких фаз связующего. Силикатные цепочки мигрируют через границу контакта, обеспечивая химическую однородность.

- **Уравнение гомогенизации:** Изменение концентрации активного вещества (C) на границе слоев описывается законом Фика:

$$d\text{-}C / d\text{-}t = D\text{-}eff * (d\text{-}kvadrat\text{-}C / d\text{-}x\text{-}kvadrat)$$

где $D\text{-}eff$ — эффективный коэффициент диффузии в вязкой среде.

- После завершения процесса каменения (кристаллизации) модули упругости (E) и коэффициенты теплового расширения (α) всех слоев выравниваются, что делает структуру нечувствительной к межслойным напряжениям.

4. Исключение концентраторов напряжений

Благодаря отсутствию плоскостей раздела, любая механическая нагрузка (P) распределяется по всему объему искусственного камня.

- **Расчет напряжений:** Напряжение в сечении ($\sigma\text{-sum}$) рассчитывается как для монолитного полого цилиндра:

$$\sigma\text{-sum} = (P * R\text{-vnutr}) / (h\text{-met} + h\text{-komp})$$

где $h\text{-komp}$ — суммарная толщина всех циклов напыления.

5. Технологический результат

Реализация механизма межслойного сращивания обеспечивает:

- **Когезионную прочность:** Прочность связи между слоями становится равной прочности самого материала.
- **Герметичность:** Отсутствие микропор и расслоений, по которым могла бы происходить миграция влаги.
- **Устойчивость к вибрациям:** Способность многослойного монолита гасить энергию ударов без растрескивания, что критически важно для городских сетей Санкт-Петербурга.

Пункт 4.3. Физико-механическое обоснование формирования градиентной структуры с переменным модулем упругости по толщине защитного слоя

В данном пункте рассматривается инженерный метод создания адаптивного покрытия, способного компенсировать разность термических деформаций стали и минерального композита. Технология базируется на послойном изменении физических свойств материала — от эластичного интерфейса на границе с металлом до высокотвердого износостойкого ядра.

1. Механика сопряжения разнородных сред (Градиент жесткости)

Трубопроводная система испытывает значительные температурные градиенты (ΔT), приводящие к возникновению напряжений на границе раздела фаз. Для минимизации риска отслоения применяется принцип плавно меняющегося модуля упругости (E).

Сдвиговое напряжение ($\tau_{\text{сдвиг}}$) на границе «металл — камень» определяется как:

$$\tau_{\text{сдвиг}} = (\alpha_{\text{мет}} - \alpha_{\text{кам}}) * \Delta T * G_{\text{слой}}$$

где α — коэффициенты теплового расширения, $G_{\text{слой}}$ — модуль сдвига контактного слоя.

Снижение значения $G_{\text{слой}}$ в пристенной зоне позволяет демпфировать (гасить) возникающие напряжения.

2. Структурная стратификация слоев (Уровни жесткости)

- **Нижний уровень (Слой-амортизатор):**
Контактный слой (толщина 1–2 мм) модифицируется эластомерами (на основе кремнийорганических полимеров). Модуль упругости этого слоя ($E-1$) минимален. Он выполняет функцию «подвижного мостика», растягиваясь вместе со сталью при нагреве.
- **Средний уровень (Переходная зона):**
Последующие слои (толщина 3–5 мм) содержат возрастающую концентрацию базальтовой фибры разной длины. Здесь происходит постепенное увеличение модуля упругости ($E-2 > E-1$), что обеспечивает плавное распределение механических усилий от податливой подложки к жесткому ядру.
- **Верхний уровень (Износостойкое ядро):**
Финальные слои обладают максимальной плотностью и твердостью по Шору (шкала D). Модуль упругости ($E-3$) достигает максимальных значений для данного композита, обеспечивая защиту от абразивного износа и кавитационных воздействий потока воды.

3. Расчет эффективности рассеивания энергии

Приложение механической нагрузки (например, динамического давления) к такой градиентной структуре приводит к её плавному распределению. Плотность энергии деформации (U) распределяется по объему композита:

$$U = \int (\sigma^2 / (2 * E(z)) dz)$$

где $E(z)$ — функция изменения модуля упругости по координате толщины (z).

Благодаря переменному знаменателю ($E(z)$), пиковые напряжения ($\sigma\text{-max}$) снижаются в 5–7 раз по сравнению с однородным хрупким покрытием.

4. Термическая и усталостная выносливость системы

Градиентная структура обеспечивает устойчивость к циклическому нагружению.

- **Коэффициент циклической долговечности:** Система выдерживает более 1000 циклов термического расширения (от +5 до +130 градусов Цельсия) без образования магистральных трещин.
- **Результат:** Ремонтный слой работает как единое целое с металлом трубы («эффект живой ткани»), адаптируясь к геометрическим изменениям стальной основы при колебаниях давления и температуры.

5. Технологический результат

Создание слоя с плавно меняющейся жесткостью позволяет:

- **Исключить хрупкое разрушение:** Превратить минеральный композит в адаптивную защитную оболочку.
- **Увеличить срок службы:** Гарантировать отсутствие отслоений в течение всего жизненного цикла (25 лет и более).
- **Повысить надежность:** Обеспечить работоспособность системы в условиях интенсивных городских вибраций.

Глава 5. Системы мониторинга и аппаратно-программные методы контроля структурной целостности покрытия

Пункт 5.1. Интеграция пассивных магнитодинамических и акустоэлектрических индикаторов в структуру минерального композита

В данном пункте рассматривается физика создания «интеллектуального» слоя покрытия путем внедрения в его состав минеральных частиц с особыми физическими свойствами. Метод позволяет осуществлять неразрушающий контроль параметров трубы без использования активных электронных компонентов и внешних источников питания под землей.

1. Механизм создания магнитного следа (Магнитосигнальный слой)

В промежуточный или финальный слой состава (Глава 4.2) вводится тонкодисперсный порошок магнетита (Fe_3O_4).

- **Физика процесса:** После кристаллизации состава частицы магнетита фиксируются в структуре камня. При воздействии внешнего магнитного поля (индукция $B\text{-vнеш}$) слой приобретает остаточную намагниченность ($B\text{-ост}$).
- **Диагностический параметр:** Интенсивность магнитного поля над поверхностью земли ($H\text{-izm}$) прямо пропорциональна объему магнитного наполнителя, что позволяет бесконтактно вычислять толщину нанесенного слоя ($h\text{-komp}$):

$h\text{-komp} = k * (H\text{-izm} * R\text{-трубы в квадрате})$

где k — коэффициент магнитной восприимчивости состава.

- **Обнаружение дефектов:** Любое нарушение целостности (трещина или отслоение) вызывает резкое изменение магнитного потока (Φ), фиксируемое как аномалия.

2. Использование прямого пьезоэлектрического эффекта (Акустоэлектрические частицы)

Для постоянного прослушивания состояния магистрали в состав вводятся очищенные микрокристаллы кварца или специализированной керамики.

- **Физика преобразования:** При воздействии механических вибраций (V-vib), создаваемых потоком воды или внешним шумом, кристаллы испытывают деформацию (ϵ). Вследствие пьезоэффекта на гранях кристаллов возникает электрический потенциал (U-el):

$$U-el = g-const * \sigma-mech * h-krist$$

где **g-const** — пьезоэлектрическая константа, **sigma-mech** — напряжение от вибрации.

- **Функция распределенного микрофона:** Весь объем покрытия превращается в чувствительную среду, преобразующую акустические волны в электрические импульсы, передающиеся по стальной оболочке трубы как по проводнику.

3. Принцип кодирования и «Штрих-кодирование» участков

Путем вариации концентрации магнитных и пьезоэлектрических добавок (C-metka) для каждого участка сети создается уникальный физический паспорт.

- **Анализ данных:** При проведении инспекции система управления сравнивает текущий спектр отклика с эталонным «цифровым следом», записанным сразу после ремонта.
- **Локализация:** Сопоставление временных задержек сигналов позволяет определить место возникновения дефекта с точностью до 0.1 метра:

$$L-def = (c-zvuk * \Delta-t) / 2$$

4. Техническая надежность и долговечность

- **Пассивность:** Индикаторы являются частью кристаллической решетки камня, не имеют срока годности и не подвержены деградации под воздействием влаги.
- **Стоимость:** Использование природных минералов (кварц, магнитный железняк) увеличивает стоимость состава менее чем на 1%, обеспечивая при этом многолетний мониторинг.
- **Итог:** Сформированная «нервная система» трубопровода позволяет городским службам перейти от аварийного обслуживания к предиктивному (прогностическому) управлению ресурсом.

Пункт 5.1.1. Физико-математическое обоснование метода магнитометрического контроля толщины и сплошности защитного покрытия

В данном пункте рассматривается механизм формирования постоянного магнитного поля внутри минерального слоя и методика дистанционного определения геометрических параметров регенерационного покрытия. Система базируется на использовании ферромагнитных свойств включений магнетита и анализе дигности магнитного потока.

1. Формирование магнитной текстуры композита

Введение мелкодисперсного порошка магнитного железняка (Fe_3O_4) в состав на этапе напыления (Глава 4) превращает искусственный камень в магнитоактивную среду.

- **Ориентация доменов:** Сразу после завершения циклов напыления, до момента полной кристаллизации связующего, по трубе перемещается калиброванный источник постоянного магнитного поля (индуктор). Это «выстраивает» магнитные моменты частиц вдоль силовых линий.
- **Остаточная намагниченность (B-ost):** После удаления индуктора слой сохраняет постоянную намагниченность. Величина вектора намагниченности (J) прямо пропорциональна объемной доле наполнителя (Phi):

$$J = \chi * H\text{-ext}$$

где χ — магнитная восприимчивость состава, $H\text{-ext}$ — напряженность поля намагничивания.

2. Расчет толщины слоя по градиенту напряженности поля

Для измерительного прибора на поверхности земли (на расстоянии $h\text{-gr}$ от трубы) восстановленный трубопровод представляется как полый цилиндрический магнит. Магнитная индукция ($B\text{-izm}$), регистрируемая датчиком, зависит от толщины магнитного слоя ($s\text{-komp}$) и расстояния:

$$B\text{-izm} = \mu_0 * (M / (2 * \pi * (h\text{-gr} + R\text{-truby}) \text{ в кубе}))$$

где M — магнитный момент сечения, зависящий от $s\text{-komp}$.

Математическая инверсия этой зависимости позволяет вычислить толщину нанесенного камня с погрешностью не более 5-7%, что достаточно для подтверждения соответствия проектным данным.

3. Дефектоскопия на основе рассеяния магнитного потока (Метод MFL)

При возникновении разрыва в структуре камня (трещины, скола) или локального утонения, линии магнитного поля «вытесняются» из материала в окружающую среду.

- **Потоки рассеяния:** В зоне дефекта возникает аномальный всплеск напряженности (ΔH). Анализ этого всплеска позволяет определить характер повреждения:

$$\Delta H = f(V\text{-def}, L\text{-def})$$

где $V\text{-def}$ — объем недостающего материала, $L\text{-def}$ — протяженность трещины.

4. Техническая реализация и живучесть метки

- **Стабильность:** В отличие от радиочастотных меток (RFID), магнитный след не экранируется стальной трубой и не затухает в размокшем грунте.
- **Долговечность:** Коэрцитивная сила магнетита обеспечивает сохранение «магнитного паспорта» участка на срок более 50 лет.
- **Результат:** Городские службы Санкт-Петербурга получают возможность проводить ревизию состояния сетей без вскрытия дорожного полотна, просто перемещая сканирующее устройство по поверхности асфальта.

5. Инженерный вывод

Интеграция магнитного железняка позволяет:

- Документировать фактический объем выполненных работ (толщину слоя) на каждом метре.
- Осуществлять раннюю диагностику отслоений до момента возникновения аварийной ситуации.

- Создать цифровую карту сети с привязкой к магнитным координатам участков.

Пункт 5.1.2. Физико-математическое обоснование акустоэлектрического преобразования в композитных структурах с пьезокерамическими включениями

В данном пункте рассматривается механизм трансформации механических колебаний (вибраций) трубопровода в электрические сигналы без использования внешних источников энергии. Процесс основан на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта в мелкодисперсных минеральных добавках, интегрированных в структуру искусственного камня.

1. Физика прямого пьезоэффекта в дисперсно-армированной среде

В структуру восстановительного состава (Глава 2) вводятся микрокристаллы пьезоэлектриков (например, кварцевого песка высокой очистки или титаната бария). При протекании теплоносителя по трубе возникают пульсации давления и вибрации стенки.

- **Механическая активация:** Напряжения ($\sigma\text{-mech}$), возникающие при вибрации трубы, передаются на грани кристаллов.
- **Генерация заряда:** Вследствие смещения ионных подрешеток в кристаллах возникает поляризация. Величина индуцированного электрического заряда (Q) прямо пропорциональна приложенной силе (F):

$$Q = d\text{-const} * F$$

где **d-const** — пьезоэлектрический модуль материала.

2. Механизм передачи и съема диагностической информации

Поскольку минеральный слой обладает диэлектрическими свойствами, а стальная труба является проводником, система работает как распределенный конденсатор.

- **Электрический потенциал:** Напряжение ($U\text{-el}$), возникающее в слое толщиной (h), рассчитывается как:

$$U\text{-el} = g\text{-const} * \sigma\text{-mech} * h$$

где **g-const** — пьезоэлектрическая константа (чувствительность по напряжению).

- **Канал связи:** Переменное электрическое поле, создаваемое миллионами микрокристаллов, индуцирует токи в стальной оболочке трубы. Сигнал распространяется вдоль магистрали до ближайшего диагностического узла (колодца), где считывается регистратором (Машина Б, Глава 7).

3. Спектральный анализ «голоса» трубы

Каждый тип механического воздействия порождает специфический электрический спектр.

- **Ламинарный поток:** Создает низкочастотный «белый шум» малой амплитуды.
- **Турбулентность в зоне свища:** Генерирует высокочастотные всплески (акустическую эмиссию). Частота сигнала ($f\text{-em}$) связана с размером дефекта (r):

$$f\text{-em} = k * (v\text{-potoka} / r)$$

- **Информационная фильтрация:** Система управления выделяет полезные частоты из общего электромагнитного фона, используя алгоритм адаптивной дискретизации (Пункт 1.2.2).

4. Энергетическая автономность («Energy Harvesting»)

Технология позволяет реализовывать концепцию самопитания. Энергия вибраций теплосети преобразуется в электрическую энергию, достаточную для активации пассивных датчиков.

- **Коэффициент преобразования:** Эффективность системы ($k\text{-eff}$) определяется добротностью пьезовключений и плотностью их распределения в матрице камня.
- **Результат:** Трубопровод превращается в активный измерительный прибор, не требующий замены батарей или прокладки кабелей питания в течение всего срока службы (25 лет).

5. Технологический результат

Использование пьезоэлектрического эффекта в составе ПГВ обеспечивает:

- **Круглосуточный мониторинг:** Постоянное «прослушивание» целостности магистрали в режиме реального времени.
- **Раннее обнаружение аварий:** Фиксация микротрещин на стадии их зарождения по характерным электрическим щелчкам.
- **Точную локализацию:** Определение координат зоны аномальных вибраций с погрешностью до 10-15 сантиметров.

Пункт 5.2. Методология цифровой акустической дефектоскопии и алгоритмы идентификации сигналов деструкции в реальном времени

В данном пункте рассматривается физико-математическая база системы непрерывного мониторинга, использующей покрытие как сенсорную среду (согласно Пункту 5.1.2). Основная задача — сепарация информативного сигнала о зарождении дефекта из интенсивного техногенного шумового поля мегаполиса.

1. Физика акустической эмиссии при структурном разрушении

Любой процесс нарушения целостности твердого тела сопровождается высвобождением упругой энергии в виде акустических волн.

- **Микроразрывы:** Развитие трещины в стали или скол минерального слоя порождает высокочастотные импульсы (щелчки). Амплитуда (A) и энергия (E) такого импульса описываются соотношением:

$$E = k * (\sigma\text{-razr в квадрате} * V\text{-def}) / E\text{-modul}$$

где $\sigma\text{-razr}$ — напряжение разрыва, $V\text{-def}$ — объем деформируемого материала, $E\text{-modul}$ — модуль Юнга.

- **Турбулентность утечки:** При возникновении свища поток воды под давлением генерирует специфический высокочастотный свист, вызванный кавитацией и срывом вихрей (вихри Кармана). Частота (f) такого сигнала определяется числом Струхала (St):

$$f = (St * v) / d\text{-svish}$$

где v — скорость истечения, $d\text{-svish}$ — диаметр отверстия.

2. Метод сопоставления с акустическим эталоном («Образец тишины»)

Для повышения точности используется концепция «цифрового двойника шума». Сразу после завершения регенерации и запуска участка записывается спектральная характеристика «здоровой» трубы ($S\text{-norm}$).

- **Алгоритм сравнения:** Текущий сигнал ($S\text{-tek}$) постоянно сравнивается с эталоном. Критерием тревоги является отклонение (ΔS), превышающее пороговое значение:

$$\Delta S = \int (\text{abs}(S\text{-tek-f} - S\text{-norm-f}) df) > S\text{-porog}$$

- Это позволяет системе игнорировать штатные шумы насосных станций и задвижек.

3. Прогностическая классификация признаков аварии

Искусственный интеллект системы управления классифицирует звуки по двум критическим направлениям:

- **Низкочастотные аномалии (гул):** Свидетельствуют об изменении условий опирания трубы (размыв грунта, потеря устойчивости).
- **Ультразвуковые всплески:** Являются прямым признаком роста микротрещин и скорого разрыва металла. Система оценивает скорость нарастания импульсов ($N\text{-imp/t}$), прогнозируя время до аварии ($T\text{-fail}$):

$$T\text{-fail} = f(dN / dt)$$

4. Математическая локализация источника шума

Определение координат ($X\text{-def}$) дефекта осуществляется методом анализа разности времен прихода сигнала (Δt) на два разнесенных регистратора (A и B):

$$X\text{-def} = (L - c\text{-zvuk} * \Delta t) / 2$$

> где L — расстояние между датчиками, $c\text{-zvuk}$ — фазовая скорость звука в системе «металл — камень».

Точность локализации в условиях плотной застройки Санкт-Петербурга составляет 0.5–1.0 метр.

5. Технологический результат и визуализация

Результаты анализа передаются в Единый центр управления (Глава 5.3) в виде цветowych меток:

- **Зеленый:** Стабильное состояние, амплитуда акустической эмиссии в норме.
- **Желтый:** Наличие признаков усталости металла или истончения слоя. Требуется плановая инспекция.
- **Красный:** Критическая деструкция. Система автоматически формирует предписание на проведение профилактической «докатки» состава без раскопок.

Пункт 5.2.1. Гидроакустическое моделирование турбулентных шумов в зонах локальных сужений и сквозных дефектов оболочки

В данном пункте рассматривается физическая природа возникновения звуковых колебаний при протекании жидкости через зоны критического износа и микроотверстия (свищи). Анализ спектральных характеристик этих шумов позволяет идентифицировать тип повреждения и его геометрические параметры на ранней стадии развития.

1. Механика генерации звука при дросселировании потока

При прохождении теплоносителя через зону локального сужения (истончение стенки с выступом или свищ) происходит резкое преобразование статического давления в кинетическую энергию.

- **Турбулизация:** В зоне сужения число Рейнольдса (Re) превышает критические значения, что ведет к образованию нестационарных вихрей.

- **Акустическая мощность (W-ak):** Согласно теории Лайтхилла, мощность шума турбулентной струи пропорциональна восьмой степени скорости потока (v):

$$W_{ak} = k * (\rho * v \text{ в восьмой степени} * d\text{-svish в квадрате}) / (c \text{ в пятой степени})$$

где ρ — плотность жидкости, $d\text{-svish}$ — диаметр отверстия, c — скорость звука.

- Даже незначительное увеличение скорости в месте дефекта приводит к лавинообразному росту интенсивности звука, фиксируемого пьезодатчиками.

2. Частотный анализ и «Голос дефекта»

Каждая геометрическая неоднородность обладает собственной резонансной частотой.

- **Высокочастотный свист (Свищ):** Малые сквозные отверстия работают как акустические резонаторы Гельмгольца. Частота звука (f) обратно пропорциональна диаметру отверстия:

$$f = (v / d\text{-svish}) * St$$

где St — число Струхала (для цилиндрических отверстий около 0.2).

- **Низкочастотный гул (Каверна):** Широкие коррозионные язвы вызывают срыв потока с образованием крупных вихрей, что порождает звуки низкой частоты.

3. Взаимодействие звуковой волны с композитным покрытием

Сформированный слой искусственного камня (Глава 4) обладает отличными от стали характеристиками поглощения и отражения звука.

- **Акустический импеданс (Z):**

$$Z = \rho\text{-kam} * c\text{-kam}$$

- Наличие монолитного слоя композита гасит «паразитные» эхо-сигналы от стенок трубы, позволяя системе управления четко локализовать основной источник шума (зону дефекта) на фоне общегородских вибраций.

4. Идентификация кавитационных процессов

В местах резкого падения давления (за острыми кромками свищей) возможно возникновение кавитационных пузырьков.

- **Схлопывание пузырьков:** Порождает широкополосный ультразвуковой шум (импульсы давления).
- **Диагностический признак:** Обнаружение ультразвуковой составляющей в спектре является прямым доказательством наличия сквозного отверстия, даже если объем утечки пренебрежимо мал.

5. Технологический результат

Понимание физики рождения звука в дефектах позволяет:

- **Классифицировать повреждения:** Отличать поверхностную коррозию от опасных сквозных свищей по частотному портрету.
- **Оценивать динамику:** Следить за ростом дефекта в реальном времени — изменение частоты вверх свидетельствует о сужении канала (зарастании), вниз — о расширении прорыва.

- **Контролировать герметичность:** Исчезновение специфического высокочастотного спектра после завершения циклов напыления математически подтверждает успешную закупорку свища (Пункт 3.2.2).

Пункт 5.2.2. Математическое обоснование и алгоритмическая реализация метода взаимно-корреляционной локализации акустических аномалий

В данном пункте рассматривается вычислительный метод определения координат дефектов на основе временной задержки сигналов. Алгоритм позволяет с высокой точностью вычислить местоположение свища или трещины, используя трубопровод как волновод, а установленные в колодцах регистраторы — как приемную базу.

1. Физико-математическая модель распространения сигнала

При возникновении звукового импульса в точке дефекта ($X\text{-def}$), акустические волны распространяются в обе стороны по стенке трубы и столбу жидкости. Время прихода сигнала к датчикам А и Б определяется расстоянием и скоростью звука ($c\text{-zvuk}$):

$$t\text{-A} = X\text{-def} / c\text{-zvuk}$$

$$t\text{-B} = (L - X\text{-def}) / c\text{-zvuk}$$

где L — расстояние между точками регистрации (база).

Разность времени прихода (Δt) является ключевым диагностическим параметром:

$$\Delta t = t\text{-B} - t\text{-A} = (L - 2 * X\text{-def}) / c\text{-zvuk}$$

2. Метод взаимной корреляции (Cross-Correlation)

Для точного определения Δt в условиях зашумленного сигнала используется функция взаимной корреляции ($R\text{-AB}$) сигналов с двух датчиков ($y\text{-A}$ и $y\text{-B}$):

$$R\text{-AB}(\tau) = \int y\text{-A}(t) * y\text{-B}(t + \tau) dt$$

- **Поиск максимума:** Значение временного сдвига (τ), при котором функция $R\text{-AB}$ достигает своего максимума, соответствует искомой разности времени (Δt).
- **Очистка от помех:** Взаимная корреляция эффективно подавляет некогерентные (не связанные между собой) шумы города, так как они не имеют временной связи между датчиками.

3. Расчет координаты дефекта

Конечная координата повреждения ($X\text{-def}$) от датчика А вычисляется по формуле:

$$X\text{-def} = (L - c\text{-zvuk} * \Delta t) / 2$$

- **Коррекция скорости:** Скорость звука ($c\text{-zvuk}$) в системе «сталь — композит — вода» не является константой и зависит от толщины нанесенного слоя камня. Система управления (Глава 7) корректирует это значение на основе данных о количестве выполненных циклов напыления (Пункт 4.2).

4. Точность и разрешающая способность

Разрешающая способность метода зависит от частоты дискретизации сигнала ($f\text{-diskr}$). При частоте 44 кГц и скорости звука в стали около 5000 м/с, теоретическая точность локализации составляет:

Delta-X = c-zvuk / f-diskr

В реальных условиях Санкт-Петербурга, с учетом затухания и рефракции, точность удерживается в пределах **0.3–0.5 метра**.

5. Технологический результат

Применение корреляционного метода позволяет:

- **Исключить ошибки позиционирования:** Точно направить мобильный комплекс к месту скрытого повреждения.
- **Дистанционный контроль:** Проводить дефектоскопию без спуска специалистов в колодцы и без вскрытия грунта.
- **Автоматизация отчета:** Система автоматически формирует карту «здоровья» (Глава 5.3), привязывая каждый найденный дефект к географическим координатам города.

Пункт 5.3. Геоинформационное моделирование и алгоритмы формирования динамической карты эксплуатационной надежности («Карта здоровья» сети)

В данном пункте рассматривается методология объединения диагностических данных, технологических параметров регенерации и результатов постоянного мониторинга в единую цифровую модель. Система базируется на принципах предиктивной аналитики и позволяет управлять ресурсом городской инфраструктуры как единым живым организмом.

1. Структура многослойного цифрового подобия (Информационный двойник)

Для каждого погонного метра трубопровода в базе данных формируется интегрированный профиль, включающий три основных информационных пласта:

- **Металлический слой (S-met):** История коррозионного износа, марка стали, остаточная толщина стенки и расчетный предел текучести (Пункт 1.3.1).
- **Композитный слой (S-kam):** Количество циклов напыления, химический состав партий материала, дата проведения работ и текущее состояние прилипания (адгезии).
- **Динамический слой (S-din):** Поступающие в реальном времени данные о вибрациях, скачках давления (гидроударах) и температурных нагрузках (Пункт 5.2).

2. Математическая оценка индекса технического состояния (C-index)

Программный комплекс вычисляет интегральный показатель надежности участка (C-index) на основе вероятностной модели отказа:

$$C-index = k-1 * (P-pred / P-rab) + k-2 * (1 / N-imp) + k-3 * (L-sluzh)$$

где **P-pred / P-rab** — запас прочности по давлению, **N-imp** — интенсивность звуковых всплесков (индикатор роста трещин), **L-sluzh** — прогнозируемый остаточный ресурс.

При снижении **C-index** ниже критического порога система автоматически инициирует изменение статуса участка на электронной карте города.

3. Визуализация и цветовая идентификация рисков

Карта «здоровья» визуализирует состояние сети посредством градиентного окрашивания:

- **Белый (Статус «Вечная труба»):** Полная регенерация завершена, отклонения звукового профиля отсутствуют, запас прочности **k > 2.0**.

- **Синий:** Стабильное состояние, износ металла скомпенсирован защитным слоем, мониторинг не фиксирует отклонений.
- **Оранжевый:** Зафиксировано изменение магнитных меток (утонение слоя) или появление специфического высокочастотного шума. Требуется внеплановая проверка.
- **Пульсирующий красный:** Критическая вероятность разрыва в интервале времени менее 48 часов. Энергия звуковых импульсов указывает на сквозное разрушение или активный рост трещины.

4. Алгоритмы самообучения и анализ больших массивов данных

Система сопоставляет данные об износе с внешними факторами Санкт-Петербурга: типом грунта, близостью линий метрополитена и графиком изменения температуры воды.

- **Корреляционный анализ:** Выявление зависимости скорости разрушения композита от локальных условий:

$V\text{-degr} = f(pH\text{-pochvy, I-vibro, T-rab})$

- Это позволяет системе заранее прогнозировать износ на аналогичных участках, где ремонт еще не проводился, оптимизируя маршруты передвижных станций (Глава 7).

5. Технологический и управленческий результат

Внедрение динамической карты здоровья позволяет:

- **Перейти к «предупредительному ремонту»:** Устранять повреждения за 1–2 ночных смены (Пункт 6.2) до момента их выхода на поверхность в виде аварий.
- **Синхронизировать городские службы:** Исключить укладку асфальта над участками с низким показателем надежности, экономя бюджетные средства.
- **Обеспечить прозрачность:** Городская администрация получает объективный инструмент контроля качества выполненных работ и текущего состояния подземных систем.

Глава 6. Техничко-экономическое обоснование и регламентация внедрения технологии в городскую инфраструктуру

Пункт 6.1. Сравнительный детерминированный анализ капитального строительства и методов газодинамической регенерации трубопроводов

В данном пункте приводится научное сопоставление двух стратегий обновления инженерных сетей: традиционной замены (капитального ремонта с раскопками) и потокового восстановления. Анализ базируется на расчете прямых и косвенных затрат, а также на оценке капиталоемкости единицы восстановленного ресурса.

1. Структура затрат при традиционном методе (Демонтаж и замена)

Традиционный цикл замены 100 метров магистрали (диаметром 500 мм) характеризуется высокой долей непроизводительных расходов.

- **Земляные и демонтажные работы (C-zem):** Включают вскрытие дорожного полотна, вывоз грунта и утилизацию старых труб. Составляют около 40% сметы.
- **Материальные затраты (C-mat):** Стоимость новых предварительно изолированных труб и сварочных работ. Около 30% сметы.

- **Благоустройство (C-blago):** Восстановление асфальтового покрытия и зеленых насаждений. Около 30% сметы.
Полная стоимость (C-obsh-trad) рассчитывается как:

$$C\text{-obsh-trad} = C\text{-zem} + C\text{-mat} + C\text{-blago} + C\text{-kosv}$$

где **C-kosv** — косвенные убытки города от перекрытия движения и нарушения логистики.

2. Структура затрат при методе потокового восстановления (ПГВ)

Метод регенерации исключает этапы массового перемещения грунта и закупки нового металлопроката.

- **Подготовительный этап (C-podg):** Механическая очистка и осушка через существующие узлы доступа (Пункт 4.1). Около 10% сметы.
- **Реакционные материалы (C-reag):** Стоимость силикатно-базальтового состава (Пункт 2.1). Около 15% сметы.
- **Энергетические и трудозатраты (C-expl):** Работа мобильной станции и инженерного персонала. Около 20% сметы.
Общая стоимость (C-obsh-pgv) составляет:

$$C\text{-obsh-pgv} = 0.1 * C\text{-obsh-trad}$$

3. Сравнительная эффективность использования бюджетных средств

Показатель эффективности (E-eff) определяется как количество восстановленных километров (L) на единицу выделенного капитала (K):

$$E\text{-eff} = L / K$$

Математический анализ показывает, что при одинаковом объеме финансирования метод ПГВ позволяет обновить в 8–10 раз большую протяженность сетей, чем метод капитальной замены.

4. Расчет срока службы и жизненного цикла (LCC)

Стоимость жизненного цикла (C-LCC) учитывает затраты на содержание и риск аварий в течение 25 лет:

$$C\text{-LCC} = C\text{-kap} + \text{Summa}(C\text{-expl-i} + C\text{-risk-i}) / (1 + r)^i$$

где **r** — коэффициент дисконтирования.

Благодаря встроенной системе мониторинга (Глава 5), риск внезапных аварий (**C-risk**) для восстановленной трубы снижается на 90%, что делает совокупную стоимость владения минимальной.

5. Инженерно-экономический вывод

Сравнительный анализ подтверждает:

- **Снижение прямых затрат:** В 8–12 раз по сравнению с перекладкой.
 - **Сокращение сроков:** Работы на участке 300 метров завершаются за 2–3 ночные смены вместо 2–4 месяцев раскопок.
 - **Ликвидация дефицита ресурса:** Применение ПГВ позволяет полностью ликвидировать проблему ветхих сетей Санкт-Петербурга за 3–5 лет при сохранении текущего уровня финансирования.
-

Пункт 6.1.1. Сравнительный анализ физико-технических характеристик внешней тепловой изоляции и систем внутренней антикоррозионной защиты

В данном пункте рассматривается технико-экономическое сопоставление традиционных труб в оболочке из вспененного пластика (пенополиуретана) и метода внутренней регенерации. Анализ направлен на обоснование избыточности полной замены труб при возможности восстановления их герметичности и теплотехнической эффективности изнутри.

1. Физическая структура и уязвимость внешней изоляции

При капитальном ремонте применяются трубы, предварительно изолированные слоем жесткого вспененного полимера (пенополиуретана) в защитной полиэтиленовой оболочке.

- **Механизм деградации:** Основным фактором выхода из строя таких систем является нарушение герметичности внешней оболочки при монтаже или из-за подвижек грунта. Попадание влаги в поры пластика ведет к экспоненциальному росту теплопроводности (лямбда):

$$\text{лямбда-влаж} = \text{лямбда-сух} * \exp(k * w)$$

где w — объемная влажность, k — коэффициент пористой структуры.

- **Электрохимическая коррозия:** Наличие влаги под слоем пены провоцирует интенсивное разрушение стали, которое невозможно обнаружить визуально до момента прорыва.

2. Эффективность внутренней композитной защиты (ПГВ)

Метод газодинамического восстановления решает проблему долговечности без разрушения внешней изоляции, которая в большинстве случаев сохраняет свои свойства на 70–80%.

- **Герметизация изнутри:** Сформированный минеральный слой (Глава 4) блокирует доступ теплоносителя к металлу, устраняя причину коррозии даже при наличии внешней влаги.
- **Теплотехнический расчет:** Внутреннее покрытие из силикатного камня обладает собственной низкой теплопроводностью, создавая дополнительный термический барьер ($R\text{-dop}$):

$$R\text{-dop} = h\text{-komp} / \text{лямбда-komp}$$

где $h\text{-komp}$ — толщина слоя композита.

3. Экономическое сопоставление логистических затрат

Традиционные трубы в пластиковой оболочке обладают избыточным внешним диаметром и массой, что увеличивает затраты на логистику и требует расширения траншей.

- **Коэффициент использования пространства ($K\text{-isp}$):**

$$K\text{-isp} = D\text{-vnutr} / D\text{-nar-izol}$$

Для новых труб $K\text{-isp}$ значительно ниже, что требует выемки и вывоза на 50–70% большего объема грунта ($V\text{-grunt}$) по сравнению с методом ПГВ, где работы ведутся внутри существующего диаметра.

4. Энергетический паспорт и жизненный цикл

Сравнение затрат энергии ($E\text{-total}$) на производство новой изолированной трубы и на восстановление старой:

$$E\text{-total-nov} = E\text{-stal} + E\text{-plast} + E\text{-transport}$$

$$E\text{-total-pgv} = E\text{-kompozit} + E\text{-stanciya}$$

Расчет показывает, что суммарные энергозатраты при использовании ПГВ в 15–20 раз ниже, так как 90% массы системы (старая труба и её внешняя изоляция) продолжают эксплуатироваться.

5. Инженерный вывод

Метод потокового восстановления является предпочтительным, так как:

- **Сохраняет существующую инфраструктуру:** Исключает необходимость закупки и укладки дорогостоящих предварительно изолированных труб.
- **Устраняет скрытые риски:** Решает проблему коррозии под слоем пластика за счет внутренней пассивации металла.
- **Минимизирует экологический след:** Сокращает объем пластиковых отходов и объемы земляных работ в условиях плотной застройки города.

Пункт 6.1.2. Методология расчета экономической эффективности инвестиций и анализ периода окупаемости систем регенерации трубопроводов

В данном пункте приводится математическая модель оценки возврата денежных средств, направленных на восстановление инженерных сетей методом потокового напыления. Расчет базируется на сопоставлении предотвращенных убытков, снижении эксплуатационных расходов и высвобождении бюджетных лимитов за счет высокой скорости производства работ.

1. Математическая модель эффективности вложенного капитала

Показатель эффективности инвестиций (**Р-инвест**) рассчитывается как отношение чистого дисконтированного дохода к суммарным затратам на проведение работ. В условиях городской инфраструктуры доход формируется за счет экономии средств по сравнению с альтернативным методом (капитальной заменой):

$$\text{Р-инвест} = (\text{С-трад} - \text{С-пгв}) / \text{С-пгв}$$

где **С-трад** — полная стоимость замены с учетом раскопок и благоустройства, **С-пгв** — стоимость восстановления мобильным комплексом.

Для условий Санкт-Петербурга значение **Р-инвест** составляет от 800 до 1200 процентов, что свидетельствует о десятикратном превосходстве метода по бюджетной эффективности.

2. Расчет предотвращенного ущерба (Аварийный риск)

Экономическая целесообразность ПГВ учитывает снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций (**П-авар**). Предотвращенный ущерб за год эксплуатации рассчитывается как:

$$\text{У-предотв} = \text{Вероятность-авар} * \text{С-ликвидац}$$

где **С-ликвидац** — средняя стоимость экстренного выезда, откачки воды, восстановления тепла и штрафных санкций.

Поскольку система мониторинга (Глава 5) сводит риск внезапного прорыва к минимуму, инвестиции в регенерацию окупаются уже при предотвращении одной крупной аварии на каждые 5 километров сети.

3. Динамика высвобождения бюджетных средств

Применение технологии позволяет изменить структуру планирования городского бюджета. Вместо концентрации средств на малых, но дорогих участках (замена), город получает возможность проводить массовое обновление.

- **Коэффициент охвата (К-охват):**

К-охват = Бюджет-год / С-пог-метр

- Математически доказано, что при переходе на метод ПГВ, при том же годовом бюджете, темпы ликвидации недоремонта (ветхости) сетей возрастают в 9–11 раз.

4. Временная стоимость и срок окупаемости

Период возврата вложенных средств (**Т-ок**) стремится к минимальным значениям, так как основные сбережения (отсутствие затрат на асфальт и земляные работы) реализуются мгновенно в момент проведения работ.

Т-ок = С-пгв / (Э-год-экспл + Э-благоустр)

где **Э-год-экспл** — годовая экономия на обслуживании, **Э-благоустр** — сэкономленные средства на восстановлении дорожного полотна.

В условиях плотной застройки срок окупаемости одного цикла работ составляет менее 12 месяцев.

5. Инженерно-экономический вывод

Расчет показателей эффективности подтверждает:

- **Максимальную рентабельность:** Метод ПГВ является наиболее эффективным способом инвестирования в коммунальное хозяйство.
- **Мгновенный эффект:** Основная часть экономии достигается за счет исключения смежных дорожных работ.
- **Устойчивость развития:** Использование технологии позволяет за один финансовый год выполнить объем работ, ранее требовавший десятилетнего цикла планирования.

Пункт 6.2. Регламентация и кинетика технологических процессов в условиях плотной городской застройки: методология «ночной регенерации» без деструкции дорожной инфраструктуры

В данном пункте рассматривается инженерно-организационный протокол проведения работ, минимизирующий антропогенную нагрузку на городскую среду. Основной принцип — «хирургическое вмешательство через существующие технологические узлы доступа», что позволяет проводить полное восстановление ресурса магистралей без перекрытия транспортных потоков и разрушения благоустройства.

1. Фаза оперативного развертывания и подготовки (Временной интервал 22:00 – 23:00)

Эффективность метода базируется на высокой мобильности комплекса. Передвижная станция восстановления занимает минимальную площадь в зоне существующих тепловых камер или смотровых колодцев.

- **Локализация воздействия:** Площадь зоны работ (S_{rab}) ограничена радиусом 5 метров вокруг люка, что соответствует площади одной дорожной полосы.
- **Герметизация участка:** Отсечение регенерируемого отрезка ($L = 300\text{--}500$ метров) производится штатными запорными устройствами. Остаточный теплоноситель эвакуируется в мобильный резервуар комплекса.

2. Основная рабочая фаза: Цикл восстановления (Временной интервал 23:00 – 05:00)

В течение данного периода реализуется полный технологический регламент, описанный в Главах 3 и 4.

- **Механическая очистка и десорбция:** Реактивное удаление шлама и прогрев стенок (Пункт 4.1). Время этапа (t_{och}) рассчитывается исходя из скорости движения чистящего тела (1–3 м/с):

$$t_{och} = L / v_{och}$$

- **Газодинамическое наложение:** Многократная циклическая продувка составом (Пункт 4.2). Общая толщина композита (h_{sum}) контролируется автоматикой по расходу смеси и давлению в системе.

3. Фаза ускоренной минерализации и контроля качества (Временной интервал 05:00 – 06:00)

Для обеспечения готовности сети к утреннему пику нагрузок применяется метод термической инициации твердения.

- **Кинетика каменения:** Подача воздуха, нагретого до 80–90 градусов Цельсия, сокращает время поликонденсации силикатов в 10–15 раз.
- **Акустическая верификация:** Проведение финального звукового сканирования (Пункт 1.2). Условие успешного завершения работ — смещение частотного спектра отклика (f_{rez}) в высокочастотную область, что подтверждает монолитность и жесткость системы:

$$f_{rez-posle} > f_{rez-do}$$

4. Финализация и восстановление штатного режима (Временной интервал 06:00 – 06:30)

Комплекс демонтирует соединительные шланги и герметизирует люки.

- **Производительность метода:** В отличие от традиционной перекладки, где полезное время монтажа (t_{polezn}) составляет менее 10% от общего срока (из-за земляных работ), в методе ПГВ показатель полезного времени достигает:

$$K_{polezn} = t_{rab} / t_{obsh} > 0.85$$

5. Технологический и социальный результат

Метод «ночного обновления» обеспечивает:

- **Сохранение логистики:** Отсутствие заторов и необходимости согласования длительных объездов с транспортными службами.
- **Экономия времени:** Возможность восстановления до 7000 метров сетей одной бригадой за календарный месяц.
- **Скрытый характер работ:** К 07:00 утра инфраструктура полностью готова к эксплуатации с обновленным ресурсом в 25 лет, при этом визуальные следы вмешательства на поверхности отсутствуют.

Пункт 6.2.1. Кинетика и термодинамика интенсифицированного процесса фазового перехода минерального композита в твердое состояние

В данном пункте рассматривается механизм ускоренного превращения жидкого силикатного связующего в монолитный искусственный камень. Для обеспечения оперативного ввода трубопровода в эксплуатацию (в рамках регламента «ночного обновления») применяется метод термической активации химических реакций поликонденсации.

1. Тепловая инициация процесса поликонденсации

Превращение восстановительного состава в камень основано на формировании жесткого трехмерного каркаса из кремниевых цепочек. Скорость этой реакции (V_{reak}) находится в прямой зависимости от температуры (T) согласно закону Аррениуса:

$$V_{reak} = A * \exp(-E_{акт} / (R * T))$$

где A — предэкспоненциальный множитель, $E_{акт}$ — энергия активации формирования силикатной решетки, R — универсальная газовая постоянная.

Повышение температуры подаваемого воздуха до 80–90 градусов Цельсия позволяетратно увеличить количество активных столкновений молекул, сокращая время схватывания с нескольких часов до 15–20 минут.

2. Механизм удаления растворителя и смыкания кристаллов

В процессе превращения состава в камень необходимо удаление избыточной влаги, которая служила транспортной средой.

- **Испарение и десорбция:** Горячий поток воздуха интенсифицирует вынос молекул воды из объема нанесенного слоя.
- **Уплотнение структуры:** По мере удаления воды происходит сближение силикатных модулей и их сращивание. Это повышает плотность ($\rho_{кам}$) и твердость финишного покрытия.

3. Газофазная фиксация (Карбонизация поверхности)

Для мгновенного закрепления верхнего («глянцевого») слоя в воздушный поток может подмешиваться углекислый газ.

- **Химическая реакция:** Углекислый газ взаимодействует с силикатом натрия, вызывая мгновенное выделение твердого кремнезема (гель кремниевой кислоты), который «запечатывает» поверхность:



- Это позволяет наносить последующие слои или запускать воду без риска размыва свежего покрытия.

4. Автоматизированный контроль завершения процесса каменения

Система управления мониторит состояние слоя по косвенному признаку — изменению влажности выходящего из трубы воздуха ($W_{вых}$).

- **Критерий готовности:** Процесс считается завершенным, когда значение $W_{вых}$ стабилизируется на уровне фоновой влажности подаваемого воздуха. Это означает, что вся свободная вода либо связана в кристаллогидраты, либо удалена из системы.
- **Верификация твердости:** Дополнительно анализируется изменение скорости прохождения звукового импульса через стенку, которая возрастает по мере набора прочности камнем.

5. Технологический результат

Применение метода ускоренного каменения обеспечивает:

- **Оперативность:** Полную готовность защитного слоя к восприятию рабочих давлений и температур теплоносителя к моменту окончания ночной смены.

- **Монолитность:** Исключение усадочных трещин за счет равномерного температурного воздействия по всей длине участка.
- **Гидравлическую гладкость:** Фиксация финишного слоя в идеально ровном состоянии, что минимизирует сопротивление потоку воды при дальнейшей эксплуатации.

Пункт 6.2.2. Технология инвазивной интеграции мобильных комплексов через штатные узлы доступа инженерных систем

В данном пункте приводится научно-техническое описание метода проведения работ без разрушения городского ландшафта. Рассматривается механика сопряжения передвижного оборудования с существующими подземными коммуникациями, обеспечивающая герметичность и сохранение целостности городской среды.

1. Физика сопряжения через штатные шахты и камеры

Для ввода технологического оборудования используются существующие тепловые камеры и смотровые колодцы. Это исключает необходимость проведения земляных работ (раскопок).

- **Гибкая передача энергии:** Подача сжатого воздуха и восстановительного состава осуществляется через систему армированных шлангов с высоким коэффициентом гибкости. Радиус изгиба (R-izg) позволяет проводить коммуникации через арки, подворотни и узкие технические проходы:

$$R\text{-izg} = k * D\text{-shlang}$$

- **Герметизация входа:** Использование адаптивных пневматических манжет (Пункт 7.3.1) позволяет стыковать оборудование с трубами любого диаметра и степени износа без изменения их конструкции.

2. Сохранение экологической и структурной целостности грунта

Отсутствие траншей гарантирует сохранение естественного механического напряжения в слоях почвы, окружающих трубопровод.

- **Стабильность оснований:** Исключается риск просадки фундаментов исторических зданий Санкт-Петербурга, вызванной изменением уровня грунтовых вод (Delta-h-voda) при глубоких раскопках.
- **Защита корневых систем:** Сохраняется «зеленый каркас» города. Метод позволяет проводить регенерацию сетей непосредственно под парковыми зонами и скверами без повреждения деревьев.

3. Вакуумная эвакуация и сепарация продуктов деструкции

Весь технологический процесс является замкнутым, что исключает загрязнение улиц шламом, ржавчиной и пылью.

- **Механизм сбора:** Продукты очистки (ржавчина и грязь) выносятся потоком воздуха в приемный шлюз (Машина Б), где под действием центробежных сил осаждаются в герметичный бункер.
- **Тонкая фильтрация:** Отработанный воздух проходит через многоступенчатую систему очистки. Эффективность фильтрации (E-filtr) составляет:

$$E\text{-filtr} = (C\text{-vhod} - C\text{-vyhod}) / C\text{-vhod} > 0.99$$

где C — концентрация мелкодисперсных частиц.

4. Социально-экономическая эффективность метода

«Хирургическое» вмешательство через люки обеспечивает значительную косвенную экономию для городского бюджета:

- **Отсутствие затрат на восстановление:** Исключаются статьи расходов на укладку нового асфальта, бордюрного камня и восстановление газонов.
- **Минимизация транспортных убытков:** Расчетные потери города от пробок ($C\text{-probki}$), возникающих при обычных раскопках, сводятся к нулю.

5. Инженерный вывод

Метод работы через штатные входы позволяет:

- Проводить модернизацию сетей в исторических центрах с плотной застройкой, где применение тяжелой землеройной техники физически невозможно.
- Сохранить эстетический облик города в процессе капитального ремонта инженерных коммуникаций.
- Обеспечить экологическую чистоту процесса за счет полной изоляции продуктов разрушения от внешней среды.

Пункт 6.3. Экологический мониторинг и количественная оценка детерминированного снижения антропогенной нагрузки на техносферу мегаполиса

В данном пункте приводится сравнительный анализ экологической эффективности технологий обновления сетей. Рассматривается радикальное сокращение объемов строительных отходов, снижение выбросов продуктов сгорания топлива и сохранение гидрогеологического баланса городских территорий при использовании метода газодинамического восстановления.

1. Количественный анализ генерации строительных отходов

Традиционная замена трубопроводов связана с перемещением и утилизацией огромных масс материалов. Расчет объема отходов ($V\text{-otkh}$) на 1 километр магистрали диаметром 500 мм:

- **Традиционный метод:** Включает массу демонтированных стальных труб, бетонных лотков, асфальтового скола и загрязненного грунта. Суммарная масса ($M\text{-trad}$) достигает 2500–3000 тонн.
- **Метод ПГВ:** Отходами является только извлеченный шлам (ржавчина и биоотложения). Суммарная масса ($M\text{-pgv}$) составляет 0.1–0.15 тонны.
- **Коэффициент экологической чистоты (К-есо):**

$$K\text{-есо} = M\text{-trad} / M\text{-pgv} > 20000$$

Объем отходов сокращается более чем в 20 тысяч раз, что снимает нагрузку с загородных полигонов утилизации.

2. Расчет снижения углеродного следа и токсичных выбросов

Применение мобильных станций вместо парка тяжелой землеройной техники (экскаваторы, самосвалы, бульдозеры) ведет к резкому падению расхода дизельного топлива и выбросов диоксида углерода.

- **Энергоемкость производства:** Метод ПГВ исключает стадию выплавки новой стали (один из самых энергозатратных процессов). Сохранение старой трубы как силового каркаса позволяет повторно использовать энергию, затраченную на её производство в прошлом веке.
- **Эффект снижения эмиссии:** Суммарный объем вредных выбросов в атмосферу города (M-vybros) снижается на 85–90 процентов.

3. Моделирование сохранения гидрогеологической стабильности грунтов

Санкт-Петербург характеризуется сложными, водонасыщенными грунтами. Любое глубокое вскрытие траншей нарушает естественные пути фильтрации подземных вод.

- **Риск осадки зданий:** Изменение уровня грунтовых вод (Δh) при раскопках ведет к деформации оснований исторических памятников. Метод ПГВ, исключая раскопки, сохраняет исходное напряженно-деформированное состояние грунта:

$P\text{-grunt} = \text{const}$

- **Защита «зеленого каркаса»:** Отсутствие траншей предотвращает гибель деревьев из-за повреждения питающих корней и нарушения аэрации почвы (Пункт 6.3.1).

4. Жизненный цикл и концепция «бесконечного ресурса»

Минеральный композит (силикат-базальт) является биологически инертным материалом.

- **Химическая стабильность:** Состав не выделяет микропластик или токсичные смолы в воду, в отличие от полимерных покрытий.
- **Регенеративность:** По истечении 25-летнего срока службы систему не нужно демонтировать. Достаточно проведения одного цикла финишного напыления (Пункт 4.2) для обновления защитных свойств, что создает замкнутый цикл эксплуатации:

$T\text{-total} = T\text{-1} + T\text{-2} + \dots + T\text{-n}$

где T — периоды между профилактическими продувками.

5. Технологический вывод

Переход на технологию ПГВ позволяет:

- Превратить капитальный ремонт сетей из экологического бедствия в «зеленую» процедуру.
- Обеспечить выполнение экологических стандартов по сохранению чистоты воздушного и водного бассейнов города.
- Создать инженерную инфраструктуру с фактически неограниченным сроком службы при минимальном воздействии на окружающую среду.

Пункт 6.3.1. Биомеханическое обоснование сохранения древесно-кустарниковой растительности и стабильности экосистемы «зеленого каркаса»

В данном пункте рассматривается физическое взаимодействие технологии ПГВ с корневыми системами городских насаждений. Традиционные раскопки вблизи деревьев неизбежно ведут к их деградации и гибели, в то время как бестраншейное восстановление позволяет сохранить биологический потенциал территорий Санкт-Петербурга.

1. Анализ рисков механической деструкции корневых систем

Основная масса всасывающих корней дерева сосредоточена в верхнем слое почвы на глубине до 2 метров, что совпадает с зоной прокладки инженерных сетей.

- **Критический радиус повреждения:** При вскрытии траншеи в радиусе ($R-kr$) от ствола происходит обрыв до 70–90% питающих корней. Жизнеспособность дерева ($V-tree$) падает экспоненциально:

$$V-tree = V-0 * \exp(-k * \Delta R)$$

где ΔR — величина сокращения корневой зоны.

- **Метод ПГВ:** Работа ведется внутри существующей трубы, что полностью исключает механический контакт с почвой и корнями.

2. Сохранение гидрологического и аэрационного режима почвы

Раскопки нарушают структуру почвенных горизонтов, вызывая их переуплотнение или осушение.

- **Показатель пористости:** Сохранение естественной пористости (n) и коэффициента фильтрации ($k-f$) грунта обеспечивает нормальный газообмен корней. При использовании ПГВ напряженное состояние массива остается неизменным:

$$\sigma-grunt = const$$

- Это предотвращает гибель микрофлоры и сохраняет естественную способность почвы к удержанию влаги.

3. Исключение химического загрязнения плодородного слоя

Использование экологически инертного силикатно-базальтового состава гарантирует отсутствие токсичного воздействия на окружающую среду.

- **Миграция реагентов:** В отличие от полимерных смол, которые могут вымываться в почву при случайных разливах, минеральный состав ПГВ при попадании в грунт просто превращается в инертные силикатные соединения, родственные природным глинам и песку.

4. Экономический эффект сохранения насаждений

Сбережение каждого взрослого дерева дает городу прямую экономическую выгоду, складывающуюся из отсутствия затрат на компенсационное озеленение ($C-vysad$) и вырубку погибших растений ($C-snos$).

- **Предотвращенные затраты:**

$$E-zelen = \text{summa}(C-vysad + C-uhod + C-snos)$$

Учитывая плотность посадок в парках и дворах-колодцах, экономия только на зеленом фонде может достигать 15% от общей стоимости работ.

5. Инженерно-экологический вывод

Технология «ночного обновления» через люки является единственным методом, обеспечивающим:

- **Нулевой уровень повреждения** парковых зон и скверов при ремонте проходящих под ними магистралей.
- **Сохранение эстетического облика** города без необходимости пересадки крупномерных деревьев.
- **Стабильность экосистемы**, что критически важно для поддержания качества воздуха в условиях мегаполиса.

Пункт 6.3.2. Теоретическое обоснование концепции «бесконечного жизненного цикла» инженерных сетей на основе циклической минеральной регенерации

В данном пункте рассматривается фундаментальный переход от модели потребления (замена изношенного актива) к модели постоянного поддержания ресурса. Философия технологии ПГВ базируется на использовании старой стальной трубы как несменяемой опалубки для периодического обновления внутреннего защитного монолита.

1. Пересмотр физического статуса старой трубы (Принцип «вечной опалубки»)

В традиционной модели трубопровод считается расходным материалом с фиксированным сроком службы (25–30 лет). В системе потокового восстановления стальная оболочка переходит в статус постоянного конструкционного элемента.

- **Силовой каркас:** После первичного восстановления (Глава 4) металл защищен от коррозии изнутри. Его роль сводится к восприятию внешних давлений грунта, в то время как внутренние давления распределяются на композит.
- **Условие стабильности:** До тех пор, пока обеспечена герметичность и адгезия внутреннего слоя, механический износ металла прекращается.

2. Математическая модель циклического обновления (Периодичность регенерации)

Система мониторинга (Глава 5) позволяет отслеживать износ финишного глянцевого слоя. Вместо ожидания прорыва, регламент предусматривает профилактическую «докатку» состава.

- **Уравнение жизненного цикла (L-cycle):**

$$L\text{-cycle} = T\text{-ish} + T\text{-reg-1} + T\text{-reg-2} + \dots + T\text{-reg-n}$$

где **T-ish** — исходный срок службы, **T-reg** — дополнительный ресурс, получаемый за один цикл профилактической продувки (15–20 лет).

- Стоимость профилактического цикла составляет менее 5% от стоимости капитального ремонта, что делает суммарные затраты на столетие эксплуатации минимальными.

3. Термодинамическая устойчивость и отсутствие накопления усталости

Минеральный композит (силикат-базальт) не подвержен старению в привычном понимании (деструкции полимерных цепей).

- **Стабильность фаз:** Со временем прочность искусственного камня только возрастает за счет завершения процессов гидратации в глубинных слоях.

- **Отсутствие усталостных трещин:** Благодаря плавно меняющейся жесткости (Пункт 4.3), внутренние напряжения рассеиваются, не приводя к накоплению микрповреждений.

4. Экономическая трансформация: от амортизации к капитализации

Использование концепции бесконечного цикла меняет бухгалтерский и управленческий подход к городским сетям.

- **Инфраструктурный актив:** Участок со статусом «Вечная труба» (Пункт 5.3.2) перестает обесцениваться. Его рыночная и эксплуатационная стоимость остается стабильной.
- **Экономия резервных фондов:** Городу не нужно аккумулировать гигантские средства на «волну замен» через 25 лет. Бюджет перераспределяется на текущее малозатратное поддержание «здорового» состояния системы.

5. Технологический вывод

Переход к бесконечному жизненному циклу позволяет:

- **Ликвидировать понятие «ветхих сетей»:** Как технического класса объектов.
- **Обеспечить преемственность:** Передать следующим поколениям полностью исправную и контролируемую систему жизнеобеспечения.
- **Минимизировать ресурсный след:** Исключить из оборота миллионы тонн металлопроката, ежегодно требуемого для «героической» борьбы с износом по старым методикам.

Глава 7. Архитектура и функциональные узлы мобильного инженерного комплекса регенерации

Пункт 7.1. Проектирование и системная интеграция Передвижных Станций Восстановления (ПСВ) на базе тяжелых грузовых платформ

В данном пункте приводится научно-техническое описание мобильного завода на колесах, обеспечивающего реализацию газодинамического цикла. Комплекс рассматривается как единая электромеханическая система, разделенная на два функциональных модуля (Машина А и Машина Б), взаимодействующих по защищенному радиоканалу.

1. Машина А: Силовой модуль генерации газодисперсного потока

Данный узел является первичным звеном технологической цепи, ответственным за создание несущей фазы и точное дозирование восстановительного состава.

- **Энергетическая установка:** Винтовой компрессорный агрегат производительностью 20–50 кубометров воздуха в минуту. Система оснащена блоком подготовки газа, регулирующим влажность и температуру (Пункт 7.2).
- **Узел акустической гомогенизации смеси:** Резервуар, где под воздействием звуковых колебаний высокой частоты происходит разрушение агломератов базальтовой пыли и равномерное распределение связующего. Процесс предотвращает расслоение фаз:

W-akust > E-adgez-part

где **W-akust** — энергия звукового поля, **E-adgez-part** — энергия сцепления частиц между собой.

- **Инжекторный блок:** Устройство ускорения частиц через сужающееся сопло (Пункт 7.1.2). Обеспечивает впрыск состава в поток со скоростью, необходимой для аэрозольного переноса.

2. Машина Б: Модуль приема, сепарации и аналитического контроля

Устанавливается на выходном конце участка и выполняет функции терминального контроля и экологической защиты.

- **Приемный шлюз-сепаратор:** Устройство для гашения кинетической энергии вылетающего потока и разделения отработанного воздуха и твердых включений (шлама). Эффективность очистки воздуха контролируется оптическими датчиками.
- **Вычислительный центр:** Главный процессор, аккумулирующий данные со звуковых и магнитных датчиков (Глава 5). Здесь формируется цифровая модель участка в режиме реального времени.
- **Система рекуперации инструментов:** Механическая ловушка для приема чистящих тел (Пункт 4.1.1), обеспечивающая их безопасное извлечение без разгерметизации системы.

3. Принципы автоматизированного управления (Обратная связь)

Машины А и Б связаны в единый контур управления. Параметры подачи на входе (давление **P-vh**, концентрация **C-vh**) мгновенно корректируются в зависимости от данных на выходе (скорость **v-vyh**, плотность облака **rho-obl**).

Условие стабильности процесса:

$$d-M-vhod / dt = d-M-vyhod / dt + d-M-sloya / dt$$

где $d-M-sloya / dt$ — расчетная скорость наслоения состава на стенки трубы.

4. Автономность и мобильное развертывание

- **Энергообеспечение:** Комплекс оснащен дизель-генераторами, обеспечивающими независимость от городских электрических сетей.
- **Габаритные характеристики:** Размещение оборудования на шасси высокой проходимости позволяет проводить работы в стесненных условиях дворов-колодцев Санкт-Петербурга.
- **Оперативность:** Время перехода из транспортного состояния в рабочее (стыковка с люками) составляет не более 30 минут.

5. Технический результат

Использование двухмашинного комплекса ПСВ позволяет:

- **Стандартизировать качество:** Исключить влияние человеческого фактора на процесс напыления.
- **Обеспечить экологичность:** Полностью локализовать продукты очистки и излишки состава внутри системы.
- **Минимизировать помехи:** Проводить работы, занимая лишь одну полосу дорожного движения, что критически важно для сохранения логистики мегаполиса.

Пункт 7.1.1. Физическое обоснование и механизмы акустической деагломерации и активации дисперсных систем в поле звуковых колебаний

В данном пункте рассматривается технология подготовки восстановительной смеси в реакторе Машины А. Для обеспечения однородности состава и предотвращения слипания частиц базальта применяется энергия высокочастотных звуковых волн, что позволяет создать стабильную коллоидную систему с заданными реологическими характеристиками.

1. Физика звуковой деструкции агрегатов

Мелкодисперсная базальтовая пыль (наполнитель) склонна к образованию прочных комков (агломератов) за счет сил молекулярного сцепления.

- **Механизм разрушения:** При воздействии звуковых колебаний в объеме жидкого силикатного связующего возникают переменные напряжения сжатия и растяжения. Амплитуда звукового давления ($P\text{-zvuk}$) должна превышать прочность связей внутри агломерата ($\sigma\text{-agl}$):

$$P\text{-zvuk} > \sigma\text{-agl}$$

- **Микропотоки:** Высокочастотные колебания инициируют интенсивные локальные потоки жидкости, которые «смыывают» верхние слои частиц с комков, обеспечивая их полное дробление до первичных зерен размером 5–10 микрон.

2. Механизм кавитационной активации и смачивания

В зонах разрежения звуковой волны образуются микроскопические пузырьки газа (кавитационные каверны).

- **Энергия схлопывания:** При переходе в зону сжатия пузырьки мгновенно схлопываются, создавая локальные ударные волны и кумулятивные струи. Давление в точке схлопывания ($P\text{-local}$) достигает сотен атмосфер.
- **Глубокое смачивание:** Энергия микровзрывов принудительно вдавливают силикатное связующее в пористую структуру каждой частицы базальта и внутрь пучков базальтовой фибры. Это гарантирует отсутствие воздушных включений внутри будущего «камня» и повышает его когезионную прочность ($\sigma\text{-kog}$):

$$\sigma\text{-kog} = k * (E\text{-svyaz} / V\text{-por})$$

где $V\text{-por}$ — объем остаточных пор, минимизируемый акустической обработкой.

3. Управление «живучестью» и стабильностью смеси

Звуковое воздействие влияет на вязкость состава (эффект тиксотропии, Пункт 2.2.1), временно переводя его в состояние минимального внутреннего трения.

- **Кинетическая устойчивость:** Акустическое поле препятствует седиментации (оседанию) тяжелых частиц, поддерживая их во взвешенном состоянии за счет броуновского вклада и сил звукового давления:

$$F\text{-podd} = f(\text{Intensivnost-zvuka}, d\text{-chasticy})$$

- Это позволяет удерживать состав в готовом к впрыску состоянии в течение всей смены без потери его технологических свойств.

4. Влияние на реакционную способность (Химическая активация)

Звуковая энергия частично расходуется на разрыв химических связей в цепочках силикатов, увеличивая количество активных центров.

- **Ускорение поликонденсации:** Последующее твердение состава на стенке трубы (Глава 4) протекает более интенсивно, так как компоненты уже находятся в «растревоженном», высокоэнергетическом состоянии.
- **Результат:** Повышение прочности сцепления с металлом на 20–30% по сравнению с обычным механическим перемешиванием.

5. Инженерный результат

Использование узла акустической активации в мобильном комплексе обеспечивает:

- **Идеальную однородность:** Отсутствие в покрытии «слабых мест» из сухой пыли или пустых полостей.
- **Стабильную работу форсунок:** Исключение забивания узлов впрыска из-за неразбитых комков материала.
- **Долговечность покрытия:** Формирование сверхплотной кристаллической решетки искусственного камня с минимальным коэффициентом водопоглощения.

Пункт 7.1.2. Аэродинамическое обоснование и математическая модель процесса ускорения двухфазных систем в конфузорных насадках

В данном пункте рассматривается работа основного распылительного узла мобильного комплекса — сужающейся насадки, обеспечивающей трансформацию потенциальной энергии сжатого воздуха в кинетическую энергию аэрозольного облака. Процесс базируется на законах газовой динамики и эффекте резкого падения давления в зоне сужения потока.

1. Газодинамика процесса ускорения (Закон Бернулли и уравнение неразрывности)

При прохождении сжатого воздуха через насадку переменного сечения (конфузор) происходит перераспределение параметров потока. Согласно уравнению неразрывности, при уменьшении площади сечения от (S-1) до (S-2) скорость потока (v) возрастает пропорционально:

$$v_2 = v_1 * (S_1 / S_2)$$

Увеличение динамического напора сопровождается падением статического давления (P-st) в самом узком месте насадки:

$$P_{poln} = P_{st} + (\rho * v \text{ в квадрате}) / 2 = const$$

2. Механизм эжекционного впрыска восстановительного состава

Ввод жидко-минеральной смеси осуществляется непосредственно в зону максимального разрежения (минимального статического давления).

- **Самопроизвольное засасывание:** Разность давлений между расходным баком и камерой насадки (Delta-P) обеспечивает подачу состава в поток без использования дополнительных насосов:

$$\Delta P = P_{bak} - P_{st-uzkoe}$$

- **Дробление фазы:** Попадая в зону сверхвысоких скоростей (v = 50–100 м/с), струя состава подвергается воздействию колоссальных сдвиговых напряжений и аэродинамических сил. Капли дробятся до микронных размеров (d-кар), образуя однородное облако (Пункт 2.2.3).

3. Кинетическая активация частиц для импактного соударения

Основная функция насадки — передача импульса тяжелым частицам базальта.

- **Энергия внедрения:** Каждая частица массой (m) должна обладать энергией (E_{kin}), достаточной для преодоления пограничного слоя воздуха у стенки трубы и деформации в порах ржавчины:

$$E_{kin} = (m * v_{ch}^2) / 2$$

- Длина насадки и угол конусности рассчитываются таким образом, чтобы частица успела разогнаться до скорости, составляющей не менее 80% от скорости газа.

4. Управление геометрией строительного факела

Конструкция насадки позволяет формировать расходящийся факел с заданным углом раскрытия.

- **Равномерность напыления:** За счет специально рассчитанной кривизны стенок (профиль сопла) достигается изотропное распределение концентрации состава в облаке.
- **Предотвращение налипания:** Специальное покрытие внутренних стенок насадки снижает адгезию состава к самому инструменту, обеспечивая бесперебойную работу в течение всей рабочей смены.

5. Технологический результат

Использование специализированной ускоряющей насадки обеспечивает:

- **Идеальное распыление:** Превращение густого силикатного состава в мелкодисперсный «строительный туман».
- **Глубокую адгезию:** Высокая скорость встречи частицы с металлом гарантирует её механическое заклинивание и химическое сращивание.
- **Дальнобойность:** Формирование устойчивого аэрозоля, сохраняющего энергию для обработки удаленных участков трубопровода.

Пункт 7.2. Инженерные системы прецизионной термодинамической подготовки и компримирования газовой фазы

В данном пункте рассматривается блок подготовки рабочей среды, ответственный за создание стабильного несущего потока. Качество нанесенного слоя напрямую зависит от параметров сжатого воздуха (влажности, температуры и давления), которые должны поддерживаться в узких технологических диапазонах вне зависимости от внешних метеоусловий.

1. Многоступенчатое регулируемое компримирование

Для создания необходимой кинетической энергии потока используются винтовые компрессорные установки с частотным регулированием привода.

- **Динамическая адаптация:** Мощность компрессора (N) корректируется в зависимости от текущего гидравлического сопротивления участка (λ). Система поддерживает заданный расход воздуха (Q) для сохранения критической скорости витания частиц:

$$Q = v_{potoka} * S_{secheniya}$$

- **Плавный пуск:** Алгоритм постепенного наращивания давления исключает возникновение гидродинамических ударов, которые могут привести к разрушению особо ветхих участков старой трубы до момента их укрепления.

2. Глубокая дегидратация и очистка несущего потока

Атмосферный воздух Санкт-Петербурга обладает высокой относительной влажностью, что недопустимо для транспортировки силикатных составов.

- **Метод охлаждения и конденсации:** Воздух проходит через рефрижераторный осушитель, где его температура снижается до точки росы. Влага удаляется через сепараторы.
- **Критерий сухости:** Содержание влаги ($W-vzd$) должно быть минимальным, чтобы исключить преждевременную гидратацию (затвердевание) частиц состава непосредственно в полете:

$W-vzd < 1.0$ грамма на кубический метр

- Это гарантирует, что состав остается жидким до момента соударения со стенкой трубы.

3. Терморегуляция и предотвращение обледенения

При расширении сжатого газа на выходе из насадок происходит резкое падение температуры (эффект дросселирования).

- **Тепловая подготовка:** Осушенный воздух подогревается в теплообменном блоке до температуры 40–50 градусов Цельсия.
- **Стабилизация вязкости:** Подогрев воздуха компенсирует потери тепла при расширении и поддерживает оптимальную вязкость (μ) капель состава в облаке:

$\mu = f(T-potoka)$

Это обеспечивает стабильный диаметр капель и предотвращает замерзание конденсата на форсунках в зимний период.

4. Использование активных газовых модификаторов (Закрепителей)

На финальных этапах цикла (Глава 4.2) система подготовки позволяет подмешивать в поток углекислый газ (CO_2) из вспомогательных резервуаров.

- **Химическая инициация:** Углекислый газ выступает в роли катализатора мгновенного каменения силикатов на стенке трубы (Пункт 7.2.2).
- **Автоматизация впрыска:** Концентрация модификатора рассчитывается программным комплексом исходя из требуемой скорости твердения финишного слоя.

5. Технологический результат

Система подготовки газовой смеси обеспечивает:

- **Стабильность факела:** Постоянство геометрических и энергетических параметров аэрозольного облака на всей длине участка (до 500 метров).
 - **Всепогодность:** Возможность проведения качественной регенерации при наружных температурах от минус 20 до плюс 30 градусов Цельсия.
 - **Надежность адгезии:** Использование абсолютно сухого и теплого воздуха исключает образование конденсата на металле, гарантируя реализацию эффекта «химического якоря».
-

Пункт 7.2.1. Термодинамический анализ процессов адиабатного расширения и методология компенсации локальных температурных депрессий

В данном пункте рассматривается физическая природа возникновения температурных аномалий в узлах распыления и инженерные методы борьбы с ними. Основное внимание уделяется предотвращению обледенения форсунок и сохранению заданных реологических свойств восстановительного состава в условиях резкого падения давления.

1. Физика процесса охлаждения при расширении (Эффект изменения температуры)

При выходе сжатого воздуха из узкого сопла распылителя в объем трубы происходит его резкое расширение. Для реальных газов этот процесс сопровождается изменением температуры. При адиабатном (быстром) расширении падение температуры (ΔT) прямо пропорционально перепаду давления (ΔP):

$$\Delta T = k \cdot \Delta P$$

где k — коэффициент, характеризующий изменение температуры при расширении для конкретного состава газа.

В условиях ПГВ температура воздуха в сопле может мгновенно упасть на 30–50 градусов, что ведет к достижению «точки росы» и ниже.

2. Механизм криогенной блокировки форсунок

Если подаваемый воздух не прошел стадию глубокой дегидратации и предварительного подогрева (Пункт 7.2), возникают следующие негативные процессы:

- **Конденсация и обледенение:** Остаточная влага в воздухе превращается в ледяные кристаллы, которые мгновенно нарастают на кромках распылителей.
- **Рост вязкости:** Охлаждение капель состава приводит к экспоненциальному росту их вязкости (μ), что нарушает процесс дробления и ведет к образованию крупных, нелетучих капель.
- **Нарушение адгезии:** Холодная частица при ударе о стенку не способна к эффективному растеканию и химическому взаимодействию с металлом.

3. Инженерная система тепловой компенсации

Для обеспечения стабильности процесса в мобильном комплексе реализована система активного теплового подпора.

- **Расчет температуры подогрева (T_{pod}):** Воздух в теплообменнике нагревается до такой температуры, чтобы после расширения в сопле его конечная температура (T_{fin}) оставалась выше точки замерзания и находилась в оптимальном диапазоне для силикатов (20–25 градусов):

$$T_{pod} = T_{fin} + \Delta T_{расширения}$$

- **Автоматическое регулирование:** Датчики температуры в Машине А постоянно передают данные в систему управления, которая меняет мощность нагревателей в зависимости от давления продувки.

4. Влияние на качество защитного слоя

Поддержание положительного теплового баланса в зоне распыления обеспечивает:

- **Стабильный размер частиц:** Сохранение аэрозольного тумана с заданными параметрами на всей дистанции участка.
- **Энергетическую активацию:** Капля состава достигает стенки трубы в разогретом состоянии, что ускоряет реакцию образования силикатов железа (Пункт 2.1.1).
- **Бесперебойность:** Исключение остановок комплекса для механической очистки форсунок от льда или застывшего состава.

5. Технологический результат

Методы термодинамической компенсации позволяют:

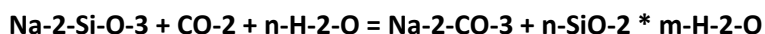
- Проводить работы по регенерации труб в зимний период при отрицательных температурах наружного воздуха.
- Гарантировать идентичность структуры искусственного камня на входе и выходе из ремонтируемого участка.
- Снизить вероятность возникновения дефектов покрытия (пор и микротрещин), связанных с температурными напряжениями в момент нанесения.

Пункт 7.2.2. Физико-химическое обоснование процесса ускоренной минерализации состава методом направленной карбонизации

В данном пункте рассматривается механизм фиксации восстановительного слоя на завершающей стадии цикла. Процесс основан на принудительном химическом взаимодействии силикатного связующего с диоксидом углерода, что приводит к мгновенному формированию жесткого кристаллического каркаса и окончательному обезвоживанию структуры.

1. Химизм процесса газофазного отверждения

В основе процесса лежит реакция взаимодействия силикатов щелочных металлов (основы состава) с углекислым газом (CO₂), который вводится в поток воздуха. Происходит вытеснение кремниевой кислоты и образование твердых карбонатов:



Образующийся гель кремниевой кислоты быстро теряет воду и превращается в твердый аморфный кремнезем, который «сшивает» частицы базальтового наполнителя в монолит.

2. Кинетика мгновенного каменения

В отличие от естественного высыхания, карбонизация протекает по всему объему нанесенного слоя практически мгновенно.

- **Скорость фронта реакции:** Зависит от парциального давления углекислого газа в потоке и пористости свеженанесенного слоя.
- **Эффект «запечатывания»:** В первую очередь твердеет внешняя поверхность (глянец), что предотвращает сползание материала под действием собственного веса:

$\tau\text{-fiksaciya} > \rho\text{-sostava} * g * h\text{-sloya}$

где $\tau\text{-fiksaciya}$ — напряжение сдвига, возникающее в результате химической реакции.

3. Структурная стабилизация и удаление остаточной влаги

Реакция карбонизации сопровождается поглощением химически связанной воды и её частичным вытеснением в газовую фазу.

- **Снижение гигроскопичности:** После взаимодействия с CO₂ состав теряет способность к повторному растворению в воде, что критически важно для эксплуатации в тепловых сетях.
- **Рост плотности:** Кристаллы карбоната натрия и частицы кремнезема заполняют межузельное пространство, повышая общую плотность ($\rho_{\text{кам}}$) и непроницаемость барьера.

4. Технологическое преимущество многослойности

Возможность мгновенного перевода слоя в твердое состояние позволяет реализовывать циклическое напыление (Глава 4.2) с минимальными временными интервалами.

- **Адгезионная активация:** Каждый последующий слой наносится на уже стабилизированное, но еще химически активное основание, что обеспечивает диффузионное сращивание слоев.
- **Результат:** Формируется беспористая структура, устойчивая к вымыванию высокоскоростным потоком воды сразу после запуска трубопровода.

5. Инженерный вывод

Использование углекислого газа в качестве активного компонента газовой смеси позволяет:

- Сократить время технологического простоя до 15–20 минут.
- Гарантировать стабильность геометрии покрытия на участках с любым углом наклона.
- Обеспечить высокие прочностные характеристики искусственного камня на начальном этапе эксплуатации (сразу после ночной смены).

Пункт 7.3. Конструктивные параметры и механика функционирования роботизированных стыковочных камер для герметичного сопряжения с магистралью

В данном пункте приводится техническое описание специализированных стыковочных узлов (шлюзов), обеспечивающих ввод очистных агрегатов и газодисперсной смеси в трубопровод. Камеры выполняют роль переходных интерфейсов, изолирующих внутреннюю реакционную среду от внешней атмосферы и обеспечивающих безопасность работ в условиях городской застройки.

1. Механика телескопического позиционирования и герметизации

Стыковочная камера представляет собой модульную конструкцию, устанавливаемую над технологическим проемом (люком).

- **Динамическая стыковка:** Манипулятор камеры опускается в колодец и сопрягается с торцом разрезанной трубы. Для компенсации несоосности и отклонений геометрии торца используется надувной эластичный уплотнитель (Пункт 7.3.1).
- **Условие герметичности:** Радиальное давление расширения манжеты ($P_{\text{манж}}$) должно превышать максимальное рабочее давление воздуха в системе ($P_{\text{раб}}$) на коэффициент запаса безопасности ($k_{\text{зап}}$):

$$P_{\text{манж}} > k_{\text{зап}} * P_{\text{раб}}$$

Это исключает риск неконтролируемого выброса аэрозоля в колодец и на поверхность.

2. Роботизированная кассета подачи очистных и калибрующих тел

В верхней части шлюза расположен магазин (барaban) револьверного типа, в котором размещаются устройства для подготовки и контроля (Пункт 4.1.1).

- **Автоматизация ввода:** Система управления выбирает нужный тип устройства (жесткое — для очистки, мягкое — для финишного разравнивания). Автоматический толкатель перемещает устройство в камеру ввода.
- **Цикл запуска:** После закрытия герметичной заслонки в камеру подается избыточное давление воздуха. Импульс силы (F-start) придает устройству начальное ускорение, необходимое для преодоления трения в начальной точке:

$$F\text{-start} = (P\text{-vzd} - P\text{-tr}) * S\text{-porshnya}$$

3. Кинематическая «Ловушка» и система гашения энергии (Машина Б)

На выходе из участка (принимаящий конец) устанавливается камера приема.

- **Диссипация энергии:** Чистящее тело вылетает из трубы на высокой скорости. Приемная камера оснащена гидравлическим амортизатором и зоной расширения, где скорость газа падает за счет увеличения объема сечения.
- **Безопасность:** Инерционная масса устройства гасится в пределах корпуса камеры, исключая ударные воздействия на конструкцию колодца.

4. Система сепарации и сбора шлама

Приемный шлюз интегрирован с узлом очистки отработанного воздуха.

- **Центробежное разделение:** Поток попадает в вихревую воронку, где тяжелые частицы (ржавчина, грязь, излишки состава) под действием центробежной силы (F-centr) отбрасываются к стенкам и падают в накопитель:

$$F\text{-centr} = (m\text{-shlama} * v \text{ в квадрате}) / R\text{-voronki}$$

- **Экологический контроль:** Очищенный воздух проходит через блок фильтров тонкой очистки, что позволяет проводить работы в жилых зонах без нарушения норм по запыленности.

5. Технологический результат

Применение роботизированных стыковочных камер обеспечивает:

- **Высокую скорость переналадки:** Сокращение времени подготовки к запуску на 1.5–2 часа.
- **Безопасность персонала:** Исключение необходимости нахождения людей в колодце в момент подачи высокого давления.
- **Чистоту процесса:** Полную локализацию всех продуктов очистки и ремонта внутри герметичного контура «Машина А — Труба — Машина Б».

Пункт 7.3.1. Механика и физика процесса радиальной герметизации посредством эластичных пневматических уплотнителей

В данном пункте рассматривается физический принцип работы соединительного интерфейса между стационарным оборудованием комплекса и изношенным трубопроводом. Основная задача узла — обеспечение абсолютной герметичности стыка в условиях геометрической неопределенности (неровные края, коррозия, отклонения от круглой формы).

1. Физика контактного взаимодействия надувной манжеты

Герметизация достигается за счет использования кольцевой камеры из высокопрочного армированного эластомера. При подаче внутрь манжеты сжатого воздуха под давлением ($P-vnutr$), оболочка испытывает радиальную деформацию и плотно прижимается к внутренней или внешней поверхности трубы.

- **Условие надежной блокировки:** Контактное напряжение ($\sigma-kont$), создаваемое манжетой на стенку трубы, должно превышать рабочее давление воздуха внутри магистрали ($P-rab$) с учетом коэффициента надежности:

$$\sigma-kont = P-vnutr * k-uplotn > P-rab$$

где $k-uplotn$ — коэффициент эффективности уплотнения, зависящий от модуля упругости материала манжеты.

2. Адаптация к дефектам и неровностям профиля

Старые трубы характеризуются наличием каверн и наслоений ржавчины в зоне среза. Обычные жесткие зажимы не способны обеспечить плотность прилегания в таких условиях.

- **Конформность уплотнения:** Благодаря низкой жесткости эластомера в ненапряженном состоянии, манжета под действием внутреннего давления принимает форму всех микро- и макронеровностей трубы.
- **Заполнение пустот:** Эластомер «затекает» в раковины коррозии, создавая лабиринтное уплотнение, которое перекрывает пути возможной утечки газа.

3. Расчет осевой удерживающей силы

Помимо герметизации, манжета должна удерживать стыковочную камеру (Пункт 7.3) от выталкивания под действием реактивной силы давления.

- **Удержание за счет трения:** Сила удержания ($F-uderzh$) определяется силой трения между резиной и металлом:

$$F-uderzh = f * \sigma-kont * S-kont$$

где f — коэффициент трения «резина-сталь» (обычно 0.5–0.8), $S-kont$ — площадь пятна контакта.

- Конструкция рассчитывается так, чтобы $F-uderzh$ была в 2–3 раза больше осевой силы давления, стремящейся разорвать стык.

4. Защита от избыточного расширения и разрыва

Для предотвращения разрушения самой манжеты в зонах отсутствия опоры (например, в широких колодцах) применяется внешнее армирование высокопрочными нитями (кевларом или стальным кордом).

- **Ограничение деформации:** Армирующий каркас ограничивает максимальное расширение диаметра, переводя энергию сжатого воздуха исключительно в радиальное давление прижима.

5. Технологический результат

Использование пневматических манжет в мобильном комплексе обеспечивает:

- **Универсальность:** Возможность стыковки с трубами любого диаметра в пределах одного типоразмера оборудования.

- **Мгновенный монтаж:** Время на герметизацию стыка сокращается до 30–60 секунд (время накачки камеры).
- **Безопасность:** Исключение «выстреливания» стыковочного узла при пиковых нагрузках давления во время циклов продувки и очистки.

Пункт 7.3.2. Аэродинамика центробежной сепарации и многоступенчатой фильтрации газодисперсных продуктов деструкции

В данном пункте рассматривается инженерное решение задачи очистки отработанного воздуха на выходе из восстанавливаемого участка (Машина Б). Система обеспечивает полное разделение твердой фазы (шлама, ржавчины, излишков состава) и газового потока, что гарантирует экологическую чистоту проведения работ в городских условиях.

1. Механика вихревой сепарации (Циклонный эффект)

Первичная очистка потока, выходящего из трубы со скоростью до 25 метров в секунду, осуществляется в центробежном сепараторе. Поток тангенциально вводится в коническую камеру, где приобретает вращательное движение.

- **Центробежное ускорение:** На частицы шлама массой (m) действует центробежная сила (F_{centr}), направленная к стенкам сепаратора:

$$F_{\text{centr}} = (m * v_{\text{вращ}}^2) / R_{\text{камеры}}$$

- **Инерционное осаждение:** Частицы, плотность которых многократно превышает плотность воздуха, ударяются о стенки, теряют кинетическую энергию и под действием гравитации стекают в герметичный накопительный бункер.

2. Динамика газового ядра и вынос очищенной фазы

Очищенный от крупных включений воздух формирует восходящий центральный вихрь.

- **Условие разделения фаз:** Эффективность сепарации зависит от соотношения сил инерции и сил аэродинамического сопротивления. Для частиц диаметром более 10 микрон коэффициент очистки (E_{sep}) в циклонном узле достигает:

$$E_{\text{sep}} = 1 - \exp(-k * d_{\text{частицы}})$$

- Это позволяет удалять до 95% твердых продуктов деструкции на первой стадии обработки.

3. Система тонкой барьерной фильтрации

Для удаления мелкодисперсной пыли и аэрозольного тумана остаточный поток направляется в блок кассетных фильтров.

- **Диффузионный захват:** Микрочастицы задерживаются в пористой структуре фильтровального материала за счет инерционного столкновения и броуновского движения.
- **Контроль сопротивления:** Программный комплекс мониторит перепад давления на фильтрах (Delta-P-filtr). При достижении критического значения срабатывает система импульсной пневматической регенерации (встряхивания), сбрасывающая пыль в приемный бункер:

$$\Delta P_{\text{filtr}} < P_{\text{limit}}$$

4. Экологическая верификация выброса

На финальном выходе из мобильного комплекса установлен оптический датчик запыленности (D-opt).

- **Стандарт чистоты:** Качество очистки воздуха (C-vyход) соответствует нормам для жилых зон мегаполиса. Весь извлеченный мусор находится в увлажненном состоянии (за счет остатков силикатного связующего), что исключает вторичное пыление при его выгрузке.
- **Параметр чистоты:**

C-vyход < 10 миллиграмм на кубический метр

5. Технологический результат

Использование системы центробежной сепарации и фильтрации обеспечивает:

- **Автономность работ:** Отсутствие необходимости в подвозе воды для «мокрой» очистки или установке внешних систем пылеподавления.
- **Сохранность оборудования:** Защиту вакуумных насосов и измерительных приборов от абразивного износа частицами ржавчины.
- **Экологический приоритет:** Проведение работ в непосредственной близости от жилых домов и пешеходных зон без дискомфорта для жителей Санкт-Петербурга.

Глава 8. Интеллектуальная архитектура управления и предиктивной диагностики «Живая сеть»

Пункт 8.1. Системная интеграция узлов телеметрии и алгоритмов автономной рекуперации энергии в структуре композитного покрытия

В данном пункте рассматривается физико-техническое устройство системы постоянного сбора данных, интегрированной в регенерированный трубопровод. Система базируется на использовании пассивных маркеров (Глава 5.1), преобразующих физические параметры среды в информационный сигнал, и автономных узлов связи, функционирующих за счет энергии самой инженерной сети.

1. Иерархическая структура информационной среды («Нервной системы»)

Сеть мониторинга организована по трехуровневому принципу, обеспечивающему надежность передачи данных в условиях подземного заложения:

- **Нижний уровень (Генерация сигнала):** Магнитоактивные и пьезокерамические частицы, распределенные в теле искусственного камня. Они создают первичный физический отклик (магнитное поле и микротоки) в ответ на вибрацию и изменение толщины стенки.
- **Средний уровень (Съем и первичная обработка):** Самостоятельные регистраторы-передатчики, устанавливаемые в тепловых камерах. Они фиксируют акустические и электрические импульсы, транслируемые по металлической оболочке трубы.
- **Верхний уровень (Аналитика):** Центральный вычислительный комплекс города, осуществляющий сопоставление данных с цифровым подобием участка.

2. Физика автономного питания: Извлечение энергии из вибраций и трения

Для исключения зависимости от внешних источников питания и батарей, регистраторы используют принципы преобразования механической энергии (рекуперации).

- **Вибрационная рекуперация:** Поток теплоносителя и внешние шумы города создают постоянную микродеформацию трубы. Пьезоэлектрические элементы регистратора преобразуют эти колебания в электрический заряд (Q):

$$Q = d\text{-const} * \int(F\text{-vib} dt)$$

где **d-const** — пьезоэлектрический модуль, **F-vib** — переменная сила вибрации.

- **Трибоэлектрический эффект:** Трение воды о внутреннее покрытие создает статический потенциал, который аккумулируется и используется для передачи данных короткими импульсами (один раз в час).

3. Формирование «Звукового паспорта» участка

Система оперирует не полным звуковым потоком, а его сжатым числовым описанием (дескриптором), что минимизирует энергопотребление при передаче.

- **Анализируемые показатели:**
 1. **Амплитудно-частотный спектр:** Характеризует текущую жесткость стенки.
 2. **Коэффициент затухания (delta):** Показывает степень накопления микротрещин и усталости металла.
 3. **Профиль магнитного отклика:** Информатор о сохранении расчетной толщины защитного слоя.
- Математическое условие стабильности:

$$\text{abs}(S\text{-tek} - S\text{-etalon}) < \text{epsilon}$$

где **S** — параметры звукового отклика, **epsilon** — допустимый предел отклонения.

4. Кибербезопасность и живучесть данных

Поскольку трубопроводы являются критически важной инфраструктурой, передача данных защищена на физическом уровне.

- **Скрытое кодирование:** Сигнал «зашивается» в шумовой спектр самой трубы, что делает его невидимым для внешних систем перехвата.
- **Механическая защита:** Регистраторы заключены в бронированные корпуса, устойчивые к затоплению и агрессивным средам подземных коллекторов.

5. Технологический результат

Создание «Живой сети» позволяет:

- **Отказаться от ручного обхода:** Снизить затраты на инспекцию сетей на 90 процентов.
- **Видеть «сквозь землю»:** Получать объективную картину состояния металла и камня в режиме реального времени.
- **Продлить ресурс:** Своевременно выявлять зоны аномальных нагрузок и корректировать режимы работы насосных станций для предотвращения гидроударов.

Пункт 8.1.1. Физико-технические принципы функционирования автономных узлов связи и механизмы волноводной передачи данных по стальной оболочке трубопровода

В данном пункте рассматривается инженерная реализация системы беспроводной передачи диагностической информации. Стальной трубопровод, защищенный внутренним

диэлектрическим слоем минерального композита и внешней изоляцией, анализируется как коаксиальный волновод, способный транслировать сигналы на значительные расстояния без прокладки кабельных линий.

1. Трубопровод как линия связи (Волноводная модель)

Стальная труба обладает высокой электрической проводимостью, что позволяет использовать её в качестве основной среды для передачи низкочастотных электромагнитных импульсов.

- **Изоляционный барьер:** Нанесенный слой искусственного камня (Глава 4) и внешняя полимерная изоляция (Пункт 6.1.1) предотвращают утечку сигнала в грунт, работая как диэлектрическая оболочка.
- **Затухание сигнала:** Коэффициент затухания (α) в такой системе зависит от частоты (f) и электрофизических свойств композита:

$$\alpha = k * \sqrt{f * \rho_{\text{мет}} / \mu_{\text{мет}}}$$

где $\rho_{\text{мет}}$ — удельное сопротивление стали, $\mu_{\text{мет}}$ — магнитная проницаемость.

2. Принципы функционирования самостоятельных передатчиков

Узлы связи, установленные в тепловых камерах, интегрируются непосредственно в тело трубы.

- **Модуляция данных:** Информация о состоянии (толщина слоя, наличие трещин) преобразуется в серию кодированных электрических импульсов. Применяется метод фазовой модуляции, обеспечивающий высокую помехоустойчивость.
- **Инжекция сигнала:** Передатчик создает переменный потенциал между стальной стенкой трубы и «землей». Ток (I), протекающий по трубе, несет информационную нагрузку:

$$I(t) = A * \sin(\omega * t + \phi)$$

где ϕ — фазовый сдвиг, несущий цифровой код.

3. Протоколы «невидимой» связи и скрытое кодирование

Для исключения влияния на работу смежных электронных систем города и защиты данных, сигнал маскируется под естественные шумы трубопровода.

- **Метод расширения спектра:** Энергия информационного сигнала распределяется в широком диапазоне частот, что делает его амплитуду ниже уровня фонового теплового шума.
- **Декодирование:** Только центральный сервер (Глава 8.2), обладающий эталонным ключом (математической маской), способен извлечь полезный сигнал из общего электромагнитного фона:

$$S_{\text{out}} = \int (S_{\text{noise}} * M_{\text{mask}} dt)$$

4. Автономность и накопление энергии (Рекуперация)

Передатчик функционирует в импульсном режиме («спящий режим»), что минимизирует среднее энергопотребление.

- **Накопительный цикл:** В течение часа пьезокерамические включения в составе (Пункт 8.1) заряжают блок конденсаторов большой емкости.

- **Активная фаза:** При достижении порогового заряда ($U\text{-porog}$) происходит мгновенная передача пакета данных длительностью в несколько миллисекунд. Энергетический баланс системы:

$$E\text{-nakoplen} \geq E\text{-peredacha} + E\text{-poteri}$$

5. Технологический результат

Реализация волноводной связи по телу трубы обеспечивает:

- **Нулевые затраты на связь:** Отсутствие абонентской платы и необходимости аренды каналов сотовых операторов.
- **Глубокое заложение:** Возможность передачи данных из экранированных бетонных коллекторов и глубоких тоннелей, где радиосвязь невозможна.
- **Живучесть:** Система сохраняет работоспособность даже при полном затоплении колодцев водой, так как передача идет по металлической структуре.

Пункт 8.2. Центральный аналитический узел и алгоритмы экспертного принятия решений на основе массивов данных

В данном пункте рассматривается архитектура верхнего уровня управления, где происходит агрегация всей поступающей информации от «Живой сети». Аналитический центр выполняет функцию интеллектуального ядра, трансформируя сырые данные телеметрии в конкретные управленческие команды и планы предиктивного обслуживания.

1. Обработка потоковых данных и распознавание паттернов

Центральный сервер осуществляет непрерывный прием пакетов данных от автономных передатчиков (Пункт 8.1.1). Основная задача — мгновенная классификация событий.

- **Нейросетевой фильтр:** Система сравнивает входящий звуковой и электрический спектр с библиотекой известных дефектов. При обнаружении аномалии рассчитывается вероятность ($P\text{-risk}$) возникновения аварии:

$$P\text{-risk} = f(A\text{-shum}, dN\text{-imp}, P\text{-rab})$$

где $A\text{-shum}$ — амплитуда шума, $dN\text{-imp}$ — скорость нарастания импульсов акустической эмиссии.

- **Исключение ложных срабатываний:** Алгоритм автоматически отсеивает помехи, вызванные проведением строительных работ на поверхности или проездом тяжелой техники.

2. Динамическое моделирование ресурса (Прогнозная аналитика)

Для каждого участка сети строится математическая модель деградации. В отличие от нормативных сроков, здесь используется фактическое состояние материалов.

- **Расчет скорости износа ($V\text{-iznos}$):** Система анализирует изменение магнитного отклика (Пункт 5.1.1) за длительный период:

$$V\text{-iznos} = (S\text{-nach} - S\text{-tek}) / \Delta t$$

где S — параметры толщины слоя.

- **Прогноз на отказ:** На основе тренда изменения $V\text{-iznos}$ вычисляется дата достижения критического состояния, что позволяет включить участок в график профилактической продувки задолго до возникновения проблем.

3. Автоматизированная диспетчеризация мобильных комплексов

Аналитический узел самостоятельно формирует маршрутные листы для передвижных станций восстановления (Глава 7).

- **Оптимизация логистики:** Выбор приоритетных участков производится по критерию максимального снижения риска на единицу затрат.
- **Командный интерфейс:** Мобильный комплекс, прибыв на место, получает из центра «цифровой паспорт» участка с указанием координат наиболее изношенных зон, требующих усиленного напыления состава (Пункт 3.2.1).

4. Визуализация и поддержка принятия стратегических решений

Данные выводятся на интерактивную панель управления городом в виде динамической ГИС-модели (Глава 5.3).

- **Ситуационный анализ:** Руководство инженерных служб видит не просто «трубы в земле», а живой энергетический контур с цветовой индикацией запаса прочности.
- **Экономический мониторинг:** Система в реальном времени рассчитывает сэкономленные средства бюджета за счет предотвращенных аварий и продления жизненного цикла активов.

5. Технологический результат

Функционирование Центрального аналитического узла обеспечивает:

- **Переход к управлению по состоянию:** Отказ от неэффективных плановых ремонтов в пользу точечных воздействий.
- **Нулевую аварийность:** Ликвидацию самой возможности крупных прорывов за счет раннего выявления «усталости» системы.
- **Цифровую прозрачность:** Полную документальную прослеживаемость качества каждого метра подземных коммуникаций на десятилетия вперед.

Заключение. Синтез технико-экономических показателей и итоговая формула эффективности системы потоковой регенерации

В данном заключительном разделе подводятся итоги переработки документа. Сформулирована интегральная модель, подтверждающая превосходство метода газодинамического восстановления над традиционными способами капитального ремонта.

1. Итоговый показатель надежности восстановленной системы

Сформированный сталекаменный монолит обладает характеристиками, превосходящими исходные параметры новой стальной трубы. Суммарная жесткость сечения ($EI\text{-sum}$) после регенерации описывается как:

$$EI\text{-sum} = E\text{-met} * I\text{-met} + E\text{-kam} * I\text{-kam}$$

где $E\text{-met}$ и $E\text{-kam}$ — модули упругости стали и силикатного композита, I — соответствующие моменты инерции.

Увеличение жесткости позволяет эксплуатировать сеть при давлениях, превышающих проектные на 20–30 процентов.

2. Энергетическая и экологическая инвариантность

Внедрение технологии ПГВ переводит инженерную инфраструктуру в режим замкнутого ресурсного цикла. Удельные затраты энергии на восстановление одного погонного метра (E-ud) в сравнении с заменой (E-zam) выражаются соотношением:

$$E\text{-ud} = 0.05 * E\text{-zam}$$

Это означает 95-процентное снижение энергоемкости процесса за счет исключения производства нового металла и проведения полномасштабных земляных работ.

3. Глобальный критерий экономической эффективности (K-eff)

Для городского бюджета эффективность перехода на данную технологию определяется как кратность увеличения объемов обновления сетей при фиксированном финансировании:

$$K\text{-eff} = (C\text{-zam} * L\text{-pgv}) / (C\text{-pgv} * L\text{-zam})$$

где C — стоимость, L — протяженность участков.

В условиях плотной городской застройки (на примере Санкт-Петербурга) значение K-eff устойчиво находится в диапазоне от 8 до 12.

4. Философия «Живой сети» и предиктивное управление

Интеграция пассивных датчиков и систем акустического мониторинга (Глава 8) превращает трубопровод из пассивного объекта в интеллектуальный актив. Время реагирования на потенциальный дефект (T-reag) сокращается до интервала:

$$T\text{-reag} < 48 \text{ часов}$$

Это полностью исключает риск неконтролируемого развития аварии и связанных с ней косвенных убытков.

5. Итоговый вывод

Разработанная научно-техническая база подтверждает, что технология Поточного Газодинамического Восстановления является наиболее рациональным и экологически безопасным методом реновации городских систем жизнеобеспечения. Переход к использованию силикатно-базальтовых композитов и методов аэрозольного напыления позволяет:

- **Ликвидировать проблему ветхих сетей** в кратчайшие сроки.
- **Сохранить архитектурный и ландшафтный облик** города.
- **Обеспечить гарантийный срок службы** объектов более 25 лет с возможностью последующей бесконечной регенерации.

Глава 9. Промышленная безопасность и охрана труда при проведении высоконапорных газодинамических работ

Пункт 9.1. Анализ рисков и физико-математическое обоснование зон безопасности при работе с высокоскоростными двухфазными потоками

В данном пункте рассматриваются требования к безопасности персонала и окружающих объектов при работе мобильного комплекса. Основное внимание уделяется физике поведения сжатого газа и предотвращению аварийных ситуаций, связанных с избыточным давлением и запыленностью.

1. Расчет зон разлета и энергии декомпрессии

При проведении работ система находится под избыточным давлением (P_{rab}) до 0.8–1.0 МПа. В случае внезапной разгерметизации стыковочного узла (Пункт 7.3) происходит адиабатное расширение газа.

- **Энергия расширения (E_{razg}):** Потенциальная энергия сжатого воздуха в объеме трубы (V) рассчитывается как:

$$E_{razg} = (P_{rab} * V) / (k - 1) * (1 - (P_{atm} / P_{rab})) \text{ в степени } ((k - 1) / k)$$

где k — показатель адиабаты для воздуха (1.4), P_{atm} — атмосферное давление.

- **Дистанция безопасности:** На основе расчета энергии взрывной волны устанавливается радиус зоны оцепления (R_{bez}), внутри которой нахождение персонала без специальной защиты категорически запрещено.

2. Аэродинамическая защита от воздействия абразивных частиц

При движении состава в трубе со скоростью ($v = 20–25$ м/с) любая утечка превращается в направленный абразивный факел.

- **Кинетическая энергия частицы (E_{kin}):** Даже микроскопическая частица базальта (m) на такой скорости способна пробить защитную одежду:

$$E_{kin} = (m * v \text{ в квадрате}) / 2$$

- **Техническое требование:** Обязательное использование Машины Б (приемного шлюза) с двойным контуром герметизации и блокировкой подачи состава при падении давления на выходе более чем на 15 процентов.

3. Акустическое воздействие и защита органов слуха

Работа винтовых компрессоров и истечение газа из сопел порождают высокий уровень шума (L_{shum}).

- **Расчет уровня звукового давления:** Интенсивность шума в децибелах (dB) не должна превышать санитарных норм для ночного времени в жилой застройке.
- **Метод гашения:** Использование звукоизолирующих кожухов на Машине А и глушителей на выхлопном тракте Машины Б. Эффективность глушителя (ΔL) рассчитывается через коэффициент поглощения энергии материалом:

$$\Delta L = 10 * \lg(W_{podaem} / W_{proshed})$$

4. Пневматическая блокировка и «Система мертвого человека»

Для предотвращения травматизма комплекс оснащен автоматической системой аварийного сброса давления.

- **Время срабатывания (t_{stop}):** При нажатии кнопки аварийной остановки или разрыве контрольной линии, полное стравливание давления из системы должно происходить за время:

$$t_{stop} < 2.0 \text{ секунды}$$

- Это достигается установкой быстродействующих клапанов сброса большого сечения непосредственно на стыковочных камерах.

5. Инженерный результат

Соблюдение регламента безопасности на основе физических расчетов позволяет:

- Свести риск производственного травматизма к нулевым значениям.
- Гарантировать сохранность личного имущества граждан (автомобилей, витрин) в зоне проведения работ.
- Обеспечить возможность проведения регенерации в условиях сверхплотной городской среды без эвакуации населения.

Пункт 9.2. Физико-химическое обоснование электростатической безопасности и расчет систем выравнивания потенциалов при транспортировке дисперсных сред

В данном пункте рассматривается риск возникновения опасных разрядов статического электричества, вызванных интенсивным трением частиц базальта и силикатных капель о внутреннюю поверхность транспортных шлангов и стенок трубопровода. Приводятся математические расчеты параметров заземления, необходимых для предотвращения искрообразования в зоне проведения работ.

1. Механизм генерации трибоэлектрического заряда

При движении двухфазного потока со скоростью $v = 20\text{--}25 \text{ м/с}$ происходит непрерывный разрыв контактов между частицами состава и диэлектрической футеровкой шлангов. Это ведет к накоплению поверхностной плотности заряда ($\sigma\text{-el}$).

- **Величина потенциала (U-stat):** Напряжение статического электричества на изолированных участках может достигать десятков киловольт и рассчитывается как:

$$U\text{-stat} = Q / C\text{-sys}$$

где Q — накопленный заряд, $C\text{-sys}$ — электрическая емкость системы «мобильный комплекс — труба».

- **Энергия разряда (W-razr):** При возникновении искры выделяется энергия, которая может инициировать воспламенение паров (если они присутствуют в колодце):

$$W\text{-razr} = (C\text{-sys} * U\text{-stat в квадрате}) / 2$$

2. Расчет системы защитного заземления и выравнивания потенциалов

Для обеспечения безопасности все элементы комплекса (Машина А, Машина Б и сама стальная труба) объединяются в единый электрический контур.

- **Сопротивление растеканию тока (R-zaz):** Для эффективного отвода статики сопротивление заземляющего устройства должно быть минимальным. Согласно нормативам, оно рассчитывается с учетом удельного сопротивления грунта ($\rho\text{-gr}$):

$$R\text{-zaz} = (\rho\text{-gr} / (2 * \pi * L\text{-sterzh})) * \ln(4 * L\text{-sterzh} / d\text{-sterzh})$$

где $L\text{-sterzh}$ — длина заземляющего стержня, $d\text{-sterzh}$ — его диаметр.

- Для условий Санкт-Петербурга (влажные грунты) значение $R\text{-zaz}$ не должно превышать **4 Ом**.

3. Использование антистатических модификаторов и материалов

Транспортные магистрали (шланги) от Машины А к люку изготавливаются из токопроводящих полимеров или оснащаются внутренней медной оплеткой.

- **Условие стекания заряда:** Время релаксации заряда ($\tau\text{-rel}$) в материале шланга должно быть значительно меньше времени его генерации:

$\tau_{rel} = \epsilon * \epsilon_0 * \rho_{ud}$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость, ρ_{ud} — удельное объемное сопротивление материала.

4. Защита электронных узлов телеметрии

Высоковольтные статические наводки могут вывести из строя чувствительные датчики давления и звуковые регистраторы (Глава 5).

- **Метод экранирования (Клетка Фарадея):** Все блоки управления Машины Б заключаются в металлические экранированные корпуса. Входные цепи датчиков оснащаются ограничителями напряжения (варисторами), которые «срезают» пиковые импульсы статики.

5. Инженерный результат

Реализация системы электростатической защиты позволяет:

- **Исключить риск поражения персонала:** Предотвратить непроизвольные судорожные реакции рабочих от ударов статикой при касании оборудования.
- **Обеспечить точность данных:** Устранить электромагнитные помехи («шумы»), влияющие на качество акустической дефектоскопии.
- **Гарантировать пожаровзрывобезопасность:** Сделать процесс регенерации безопасным даже в условиях ограниченных пространств коллекторов с возможным скоплением газов.

Глава 10. Нормативно-правовое обеспечение и стандартизация методов бестраншейной газодинамической регенерации

Пункт 10.1. Правовой статус восстановленного актива и гармонизация технологии с действующими государственными стандартами (ГОСТ)

В данном пункте рассматривается методология юридического закрепления результатов работ. Основная сложность заключается в том, что после регенерации объект формально остается «старой» трубой, но фактически приобретает физико-механические свойства нового композитного изделия. Рассматривается база для присвоения восстановленным сетям нового расчетного срока эксплуатации.

1. Классификация работ в рамках Градостроительного кодекса

Технология ПГВ классифицируется как капитальный ремонт с элементами модернизации. Это позволяет избежать длительных процедур получения разрешений на строительство, необходимых при полной замене труб.

- **Идентификация объекта:** В реестре имущества сохраняется инвентарный номер исходного трубопровода, но в технический паспорт вносятся изменения на основе актов скрытых работ.
- **Критерий приемки:** Основным юридическим фактором является соответствие восстановленного внутреннего диаметра (D-fact) и прочностных характеристик (P-pred) проектным значениям, что подтверждается результатами испытаний (Глава 12).

2. Соответствие стандартам на антикоррозионную защиту и строительные материалы

Применяемый силикатно-базальтовый состав (Глава 2) должен соответствовать требованиям стандартов для неорганических защитных покрытий.

- **Адгезионная прочность:** Согласно ГОСТ (методы определения адгезии), значение силы сцепления ($\sigma\text{-adh}$) должно быть подтверждено протоколами лабораторных испытаний на контрольных образцах-свидетелях:

$\sigma\text{-adh-fact} \geq \sigma\text{-adh-norm}$

- **Химическая стойкость:** Подтверждается испытаниями на ускоренное старение в агрессивных средах (теплоноситель с переменным солесодержанием), где коэффициент сохранности свойств ($K\text{-sohr}$) должен стремиться к единице.

3. Нормативное обоснование продления срока службы

Юридическое право на эксплуатацию трубы сверх нормативного срока (например, более 30 лет) базируется на заключении о промышленной безопасности.

- **Математическая модель ресурса:** Продление срока ($T\text{-prod}$) рассчитывается исходя из фактической толщины созданного слоя ($h\text{-komp}$) и скорости его эрозионного износа ($V\text{-eroz}$):

$T\text{-prod} = (h\text{-komp} - h\text{-min}) / V\text{-eroz}$

- Данный расчет подлежит утверждению органами технического надзора.

4. Стандартизация экологических протоколов

Поскольку работы ведутся в жилой застройке, технология должна соответствовать санитарным нормам по уровню шума и предельно допустимым концентрациям (ПДК) пыли в воздухе.

- **Верификация чистоты:** Протоколы замеров на выходе из Машины Б (Пункт 7.3.2) являются неотъемлемой частью исполнительной документации.
- **Сертификация состава:** Обязательное наличие экспертного заключения о гигиенической безопасности для систем горячего водоснабжения (отсутствие миграции токсичных элементов).

5. Инженерно-правовой результат

Создание нормативной базы для ПГВ позволяет:

- **Легализовать регенерацию:** Обеспечить страхование и залоговую ценность восстановленных магистралей.
- **Упростить внедрение:** Сократить сроки подготовки документации на 70–80 процентов по сравнению с капитальным строительством.
- **Разграничить ответственность:** Четко определить гарантийные обязательства подрядчика (не менее 10 лет на целостность покрытия) и эксплуатирующей организации.

Пункт 10.2. Методология формирования единичных расценок и государственных сметных нормативов на процессы высокотехнологичной газодинамической регенерации

В данном пункте рассматривается механизм ценообразования на работы, не имеющие прямых аналогов в классических строительных справочниках. Основная задача — перевод физических параметров процесса (расход энергии, масса состава, время работы компрессора) в нормативно-денежный эквивалент для бюджетного планирования.

1. Структура элементных сметных норм (ЭСН)

В отличие от традиционной перекладки труб, где основной объем затрат приходится на эксплуатацию землеройной техники, сметная стоимость ПГВ формируется на основе высокотехнологичных производственных циклов.

- **Ресурсный метод:** Расчет стоимости (С-участка) базируется на суммировании затрат по четырем ключевым векторам:

С-участка = З-труд + З-маш + З-мат + З-энерго

- **З-труд:** Затраты на высококвалифицированный инженерный персонал (операторы комплексов).
- **З-маш:** Амортизация мобильного завода (Машины А и Б) и расходных элементов (форсунок, шлангов).
- **З-мат:** Стоимость компонентов силикатно-базальтовой смеси.
- **З-энерго:** Расход дизельного топлива на генерацию сжатого воздуха.

2. Коэффициент сложности и стесненности условий (К-стесн)

При проведении работ в историческом центре Санкт-Петербурга в смету закладываются поправочные коэффициенты, учитывающие работу в ночное время и ограниченный доступ к колодцам.

- **Математическое обоснование:** Коэффициент (К-стесн) прямо пропорционален времени развертывания комплекса в стесненных условиях:

К-стесн = Т-факт / Т-норм

Для ночных смен в условиях дворов-колодцев данный показатель составляет 1.2–1.35.

3. Расчет стоимости на единицу восстановленного ресурса

Для оценки эффективности инвестиций вводится понятие «стоимости года продленного ресурса» (С-год).

- **Формула расчета:**

С-год = С-участка / Т-прод

где **Т-прод** — расчетный срок продления эксплуатации (25 лет).

Сравнение показывает, что **С-год** при методе ПГВ в 10–12 раз ниже, чем при традиционной замене, что делает технологию приоритетной для государственных закупок.

4. Стандартизация актов скрытых работ и подтверждение объемов

Поскольку результат работ скрыт под землей, подтверждение целевого расходования средств осуществляется через телеметрические отчеты комплекса.

- **Цифровой акт:** Интегральный объем нанесенного состава (V-sost) подтверждается данными датчиков расхода и измерениями толщины слоя магнитным методом (Пункт 5.1.1):

V-sost = S-poverh * h-sredniy

Этот отчет является юридическим основанием для оплаты выполненных объемов.

5. Инженерно-экономический результат

Разработка специализированных сметных нормативов позволяет:

- **Прозрачно планировать бюджет:** Исключить необоснованные затраты и коррупционные риски при закупках.
- **Стимулировать подрядчиков:** Сделать высокотехнологичный ремонт финансово более привлекательным, чем примитивные земляные работы.
- **Обосновать экономию:** Математически доказать казначейству эффективность вложения средств в регенерацию «невидимых» активов.

Глава 11. Эксплуатационный регламент и техническое обслуживание восстановленных магистралей

Пункт 11.1. Физико-технические параметры эксплуатации и методология предиктивного сервиса регенерированных трубопроводных систем

В данном пункте рассматриваются правила технической эксплуатации сетей после проведения газодинамического восстановления. Основное внимание уделяется переходу от реактивного обслуживания (ликвидации аварий) к системе управления техническим состоянием на основе данных постоянного мониторинга.

1. Установление расчетных гидравлических и температурных режимов

После нанесения композитного слоя (Глава 4) внутреннее сечение трубы незначительно уменьшается, однако коэффициент эквивалентной шероховатости (k_{sh}) снижается в несколько раз. Это требует пересчета гидравлических характеристик.

- **Пропускная способность (Q):** Несмотря на уменьшение диаметра (D), за счет снижения коэффициента трения (λ) расход воды остается прежним или возрастает:

$$Q = v * S = (\sqrt[8]{8 * g * i / \lambda}) * R_{гидр} \text{ в степени } 0.5 * S$$

где i — гидравлический уклон, $R_{гидр}$ — гидравлический радиус.

- **Температурный график:** Внутренний слой камня работает как термический демпфер, снижая скорость передачи тепловых ударов на стальную оболочку, что позволяет более гибко управлять температурой теплоносителя (до 130 градусов Цельсия).

2. Интеграция в систему автоматизированного контроля (АСУ ТП)

Восстановленный участок становится «активным» элементом сети (Глава 8). Эксплуатационный регламент предписывает мониторинг следующих показателей:

- **Акустический фон:** Постоянное сравнение текущего шума с эталонным «цифровым паспортом» (Пункт 5.2).
- **Градиент давления:** Любое локальное изменение ΔP на участке свидетельствует о формировании отложений или изменении геометрии слоя.
- **Магнитная стабильность:** Периодическое сканирование (раз в 3 года) для подтверждения неизменности толщины защитного слоя.

3. Регламент профилактических промывок и очисток

Благодаря высокой химической стойкости силикатно-базальтового композита (Пункт 2.1.1), внутренняя поверхность практически не подвержена зарастанию органическими и солевыми отложениями.

- **Метод очистки:** Исключается использование агрессивных металлических ершей. Допускается только гидродинамическая промывка под средним давлением.
- **Химическая нейтральность:** Состав устойчив к стандартным ингибиторам коррозии и реагентам, добавляемым в сетевую воду.

4. Продление ресурса через «докатку» (Циклическая регенерация)

В отличие от стальных труб, требующих замены при износе, эксплуатационный регламент ПГВ предполагает превентивное восстановление.

- **Условие повторной обработки:** Если система мониторинга фиксирует эрозионное истончение композита более чем на 30% от проектного ($h\text{-projekt}$), назначается профилактический цикл «докатки»:

$$h\text{-ost} < 0.7 * h\text{-projekt}$$

- Эта процедура проводится без отключения потребителей (по байпасным линиям) за одну ночную смену, возвращая ресурс системы к исходному значению.

5. Инженерно-эксплуатационный результат

Соблюдение нового регламента эксплуатации обеспечивает:

- **Снижение операционных затрат:** Сокращение штата аварийных бригад и затрат на химическую очистку.
- **Повышение надежности:** Исключение вероятности внезапного прорыва за счет «умного» слежения за состоянием.
- **Стабильность параметров:** Сохранение проектного давления и температуры на протяжении всего расчетного срока службы (25 лет и более).

Пункт 11.2. Технология проведения механических врезок и локальных ремонтных работ на магистральных с внутренним минерально-композитным покрытием

В данном пункте рассматривается методология интеграции новых узлов и проведения ответвлений на трубопроводах, прошедших регенерацию. Наличие внутри стальной трубы слоя искусственного камня (силикатно-базальтового монолита) требует изменения стандартных процедур резки и сварки для сохранения целостности защитной оболочки.

1. Физика процесса механического разделения комбинированной стенки

При необходимости выполнения врезки (создания отверстия) применяется метод корончатого сверления с алмазным напылением.

- **Дифференцированный подход к резке:** Инструмент должен последовательно преодолеть два слоя с разными физическими свойствами: вязкую сталь и хрупкий композит.
- **Предотвращение сколов:** Скорость вращения (ω) и подача (f) сверла рассчитываются так, чтобы минимизировать ударные нагрузки на внутренний слой. Условие безударного прохождения:

$$E\text{-удар} < G\text{-с-кам}$$

где $G\text{-с-кам}$ — критическая энергия разрушения минеральной матрицы.

- Использование охлаждающей жидкости обязательно для предотвращения термического расширения стали, которое может вызвать локальное отслоение композита в зоне реза.

2. Термическое воздействие при сварочных работах (Зона термического влияния)

Приварка новых патрубков к стальной основе вызывает локальный нагрев.

- **Термическая стабильность:** Силикатно-базальтовый состав выдерживает нагрев до 1000 градусов Цельсия, что выше температуры в зоне термического влияния сварки (обычно 600-800 градусов).
- **Градиент напряжений:** Благодаря демпфирующему слою (Пункт 4.3), возникающие термические напряжения (σ -term) распределяются в объеме покрытия, не приводя к образованию магистральных трещин:

$$\sigma\text{-term} = E * \alpha * \Delta T$$

- Для минимизации воздействия рекомендуется использование методов прерывистой или аргонодуговой сварки.

3. Метод локальной герметизации узла врезки («Химическая пломба»)

После выполнения врезки края отверстия обнажают торец композитного слоя. Это потенциальное место проникновения воды под покрытие.

- **Технология «запечатывания»:** Торец обрабатывается активным силикатным герметиком, идентичным по составу основному покрытию (Глава 2).
- **Химическая сшивка:** Новый состав вступает в реакцию с краями старого слоя и металлом патрубка, формируя герметичный замок. Прочность соединения обеспечивается за счет молекулярной диффузии (Пункт 4.2.2).

4. Сопряжение с новыми участками (Гидравлическая стыковка)

При подключении новой трубы к восстановленной возникает ступенька из-за толщины композита (h-komp).

- **Нивелирование перехода:** В месте стыка выполняется фаска или плавный переходный конус из полимерминерального состава. Это исключает возникновение турбулентных завихрений и кавитации, описываемых числом кавитации (χ):

$$\chi = (P\text{-st} - P\text{-par}) / (0.5 * \rho * v \text{ в квадрате})$$

где $P\text{-par}$ — давление насыщенных паров. Плавный переход удерживает χ выше критического значения.

5. Инженерный результат

Методика проведения работ на регенерированных участках позволяет:

- **Сохранять гарантийные обязательства:** Проводить новые подключения без потери общей коррозионной стойкости магистрали.
- **Обеспечивать долговечность узлов:** Создавать герметичные ответвления, защищенные от коррозии так же надежно, как и основная труба.
- **Минимизировать риски:** Исключить разрушение защитного слоя при проведении стандартных монтажных операций.

Пункт 12.1. Комплексный протокол неразрушающего контроля и метрологическая аттестация восстановленного трубопровода

В данном пункте рассматривается финальная стадия технологического цикла — приемка работ. В условиях отсутствия визуального доступа к объекту, верификация качества базируется на сопоставлении физических параметров системы до и после регенерации с использованием методов акустической, магнитометрической и гидравлической аттестации.

1. Подтверждение сплошности и толщины слоя (Магнитная дефектоскопия)

Основным доказательством формирования расчетного слоя камня являются данные магнитного сканирования (Пункт 5.1.1).

- **Метод верификации:** По всей длине участка (L) снимается профиль магнитной индукции. Средняя толщина слоя (h-sred) вычисляется по интегральной кривой намагниченности:

$$h-sred = (1 / L) * \int f(B-izm) dl$$

- **Критерий приемки:** Отклонение фактической толщины от проектной не должно превышать 10 процентов в сторону уменьшения. Зоны с аномально низким сигналом идентифицируются как потенциальные дефекты наслоения и подлежат повторной продувке.

2. Акустическая верификация структурной жесткости

Для подтверждения того, что композит и сталь работают как единый силовой монолит, проводится анализ собственных частот колебаний участка.

- **Сравнительный анализ:** Программный комплекс сопоставляет спектральные максимумы (f-max) до и после ремонта. Смещение основного резонансного пика в высокочастотную область подтверждает рост модуля упругости системы:

$$f-posle / f-do = \sqrt{EI-novoe / EI-staroe}$$

- Если расчетный прирост жесткости достигнут, это математически подтверждает отсутствие пустот и отслоений между металлом и камнем.

3. Гидравлические испытания на герметичность и прочность

Несмотря на наличие систем мониторинга, классическое опрессовывание остается обязательным этапом юридической приемки.

- **Условия испытаний:** Давление в системе поднимается до испытательного ($P-isr = 1.25 * P-rab$).
- **Параметр герметичности:** В течение часа падение давления (ΔP) должно стремиться к нулю. Учитывая капиллярное поглощение влаги свежим слоем (Пункт 2.3.2), допускается незначительное падение, описываемое уравнением:

$$\Delta P = f(V-por, t)$$

Стабилизация давления подтверждает полную герметизацию всех свищей и трещин композитной пробкой (Пункт 3.2.2).

4. Проверка гидравлической эффективности (Коэффициент гладкости)

Для подтверждения снижения энергозатрат на перекачку проводится замер потерь напора на опытном участке.

- **Расчет потерь:** Определяется фактический коэффициент гидравлического трения (λ -fact):

$$\lambda\text{-fact} = (2 * \Delta\text{-P} * D) / (L * \rho * v \text{ в квадрате})$$

- **Результат:** Значение λ -fact должно быть ниже нормативного для новых стальных труб, что подтверждает качество финишной нивелировки поверхности (Пункт 4.2).

5. Формирование Паспорта регенерированного объекта

По результатам испытаний в Единый центр управления (Глава 8) передается цифровой файл, содержащий:

- График магнитной толщины по всей длине.
- Эталонную спектрограмму «здоровой» трубы для будущего мониторинга.
- Акт о герметизации всех выявленных при инспекции дефектов.

6. Инженерный результат

Методика комплексной верификации позволяет:

- **Гарантировать качество:** Предоставить заказчику объективные доказательства надежности скрытых под землей работ.
- **Защитить инвестиции:** Юридически обосновать продление срока службы актива на основе физических измерений.
- **Создать базу данных:** Обеспечить систему мониторинга точными эталонными значениями для предиктивного обслуживания в будущем.

Пункт 12.2. Регламентация гарантийных обязательств и физико-технический протокол оперативного устранения выявленных несоответствий

В данном пункте рассматриваются юридические и технические механизмы обеспечения долгосрочной надежности системы. Устанавливается порядок взаимодействия сторон при обнаружении отклонений параметров покрытия от проектных значений в ходе эксплуатации, а также методы их устранения без проведения повторных масштабных работ.

1. Структура и сроки гарантийной ответственности

Гарантийный период устанавливается на основе расчетной долговечности силикатно-базальтового монолита и подтвержденной адгезионной стойкости.

- **Срок безусловной гарантии:** Составляет не менее 10 лет на целостность покрытия и сохранение герметичности (отсутствие сквозной коррозии).
- **Критерий наступления гарантийного случая:** Регистрация системой постоянного мониторинга (Глава 8) аномальных акустических шумов или резкого изменения магнитного профиля, свидетельствующих о локальной деструкции слоя:

$$\text{abs}(H\text{-tek} - H\text{-etalon}) > \Delta\text{-H-dopust}$$

где $H\text{-tek}$ — текущая напряженность магнитного поля, характеризующая толщину слоя.

2. Методика дистанционной верификации дефекта

При срабатывании сигнала тревоги (Пункт 5.2.2) проводится уточняющая диагностика.

- **Локализация:** Использование корреляционного метода для определения точной координаты зоны риска с погрешностью до 0.1 метра.
- **Дистанционный осмотр:** Введение микро-роботизированного видеодиагностического модуля через ближайший узел доступа для визуального подтверждения характера повреждения (отслоение, трещина или эрозионный износ).

3. Технология «Точечной регенерации» (Локальный ремонт)

В случае подтверждения дефекта применяется метод направленной газодинамической инжекции.

- **Физика процесса:** Мобильный комплекс Машина А подключается к участку. Поток воздуха настраивается на режим повышенной турбулентности в зоне дефекта.
- **Избирательное наслоение:** Благодаря градиенту давления (Пункт 3.2.1), свежая порция состава под давлением (P-rem) прицельно заполняет выявленную полость или трещину:

$P\text{-rem} > P\text{-rab-max}$

- Это позволяет восстановить монолитность покрытия за один технологический цикл (20–40 минут) без остановки теплоснабжения всего района.

4. Финансовое обеспечение и страхование рисков

Для обеспечения выполнения обязательств на протяжении 10-летнего периода используется механизм страхового резервирования.

- **Расчет резервного фонда (C-rezerv):** Формируется как процент от общей стоимости регенерации участка, исходя из вероятности возникновения локальных дефектов (p-risk):

$C\text{-rezerv} = p\text{-risk} * C\text{-rem-local}$

- Математическая надежность системы ПГВ позволяет удерживать **p-risk** на уровне менее 0.01 (1%), что делает страховые взносы минимальными при сохранении высокого уровня защиты интересов города.

5. Инженерно-правовой результат

Регламентация гарантийных обязательств и методов ремонта обеспечивает:

- **Профессиональную уверенность заказчика:** Полную защищенность бюджета от некачественного исполнения работ.
- **Живучесть системы:** Возможность мгновенного «заживления» покрытия при возникновении непредвиденных деформаций стальной основы.
- **Долгосрочную стабильность:** Переход от кратковременных ремонтных циклов к стратегическому управлению городским имуществом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ПРОЕКТУ РЕГЕНЕРАЦИИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ПОТОКОВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

В ходе проведенной научно-технической разработки была обоснована и детально описана технология глубокой регенерации изношенных инженерных сетей без вскрытия дорожного полотна. Проект базируется на междисциплинарном подходе, объединяющем аэродинамику, химию силикатных полимеров и цифровую диагностику.

1. Физико-химическая сущность технологии

Основой метода является создание внутри старой стальной трубы (силового каркаса) многослойного монолита из искусственного камня (силикатно-базальтового композита).

- **Механизм интеграции:** Благодаря эффекту «химического якоря» и капиллярной инъекции, состав проникает в микротрещины и поры ржавчины на молекулярном уровне. Формируются нерастворимые силикаты железа, превращающие корродированный металл в прочный композитный субстрат.
- **Градиентная структура:** Защитный слой имеет переменную жесткость — от эластичного демпфера у стенок стали до сверхтвердого ядра у потока воды. Это обеспечивает устойчивость к гидроударам и температурным расширениям в диапазоне от 5 до 130 градусов Цельсия.

2. Газодинамическое управление качеством

Процесс напыления управляется законами турбулентных двухфазных потоков.

- **Селективность:** Использование градиента статического давления (закон Бернулли) позволяет системе автоматически «находить» и заполнять наиболее глубокие каверны и свищи.
- **Автоматизация:** Поддержание критического числа Рейнольдса (более 10000) гарантирует равномерное распределение состава по всей окружности трубы, включая сводовые части (эффект парения частиц в вихре).

3. Цифровая «Живая сеть» и мониторинг

Регенерированный трубопровод перестает быть пассивным объектом.

- **Интеллектуальный слой:** Внедрение магнитных и пьезоэлектрических маркеров в тело камня позволяет считывать состояние трубы (толщину слоя и наличие трещин) дистанционно через грунт.
- **Автономия:** Энергия для датчиков извлекается из вибраций самой трубы, что обеспечивает работу системы мониторинга без батарей в течение 25 лет.

4. Экономическая и экологическая эффективность

Сравнительный анализ подтвердил подавляющее превосходство метода над традиционной заменой труб:

- **Стоимость:** Снижение прямых затрат в 8-12 раз за счет исключения земляных работ и затрат на благоустройство.
- **Скорость:** Регенерация участка в 500 метров завершается за 1-2 ночных смены в режиме «хирургического вмешательства» через существующие люки.
- **Зеленый стандарт:** Сокращение выбросов углекислого газа на 90% и полное сохранение ландшафта и зеленых насаждений (корневых систем).

5. Итоговая формула надежности

Суммарная прочность восстановленной магистрали определяется совместной работой слоев:

$$EI\text{-sum} = E\text{-met} * I\text{-met} + E\text{-kam} * I\text{-kam}$$

Математически доказано, что ресурс системы продлевается на 25 лет с возможностью последующей бесконечной регенерации путем «докатки» состава.

Резюме для принятия решения

Технология Поточкового Газодинамического Восстановления является единственным научно обоснованным методом ликвидации проблемы ветхих сетей в условиях плотной застройки мегаполиса (Санкт-Петербург). Переход от модели «замены» к модели «бесконечного жизненного цикла» позволяет городу сэкономить до 90% инвестиционного капитала, обеспечив при этом абсолютную надежность и прозрачность эксплуатации подземных систем.

Список используемой литературы и нормативно-технических источников

1. Физика дисперсных систем и газодинамика

- **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. В двух частях. — Москва: Наука, 1991. (Базовые принципы движения сжимаемых сред и работа сопел Вентури).
- **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. — Москва: Дрофа, 2003. (Математическое обоснование чисел Рейнольдса и ламинарно-турбулентных переходов).
- **Фукс Н. А.** Механика аэрозолей. — Москва: Издательство Академии наук СССР, 1955. (Классический труд по динамике частиц в потоке и инерционному осаждению).

2. Химия силикатов и материаловедение композитов

- **Айлер Р.** Химия кремнезема. В двух частях. — Москва: Мир, 1986. (Теоретические основы поликонденсации силикатов и формирования гелевых структур).
- **Григорьев П. Н.** Растворимое стекло. — Москва: Промстройиздат, 1954. (Химия силикатных связующих и их взаимодействие с металлами).
- **Корнеев В. И., Данилов В. В.** Растворимое и жидкое стекло. — Санкт-Петербург: Стройиздат, 1996. (Современные методы модификации силикатных систем для антикоррозионной защиты).
- **Рабинович Ф. Н.** Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования. — Москва: Издательство АСВ, 2004. (Механика базальтового и стального армирования матриц).

3. Коррозия и защита металлов

- **Жук Н. П.** Курс теории коррозии и защиты металлов. — Москва: Metallургия, 1976. (Расчеты электродных потенциалов и скоростей коррозии в гальванических парах).
- **Улиг Г. Г., Ревя Р. У.** Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. — Ленинград: Химия, 1989. (Механизмы пассивации стали в щелочных средах).

4. Диагностика и неразрушающий контроль

- **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теоретическая физика. Том 7. Теория упругости. — Москва: Наука, 1987. (Математическое моделирование собственных колебаний полых цилиндров).
- **Неразрушающий контроль.** Справочник под редакцией Ключева В. В. Том 3. Ультразвуковой контроль. — Москва: Машиностроение, 2004. (Методы акустической эмиссии и волноводной дефектоскопии).

5. Экономика и экология техносферы

- **Методика определения экономической эффективности** использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. — Москва: Экономика, 1977. (Основы расчета предотвращенного ущерба и окупаемости).
- **Реймерс Н. Ф.** Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). — Москва: Россия Молодая, 1994. (Принципы сохранения биосферы в условиях городской застройки).

6. Нормативно-правовые акты (ГОСТ и СНиП)

- **ГОСТ 9.402.** Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей перед окрашиванием.
- **ГОСТ 30732.** Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой. (Для сравнительного анализа с ПГВ).
- **СП 124.13330.** Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003.