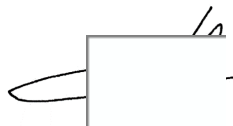


На правах рукописи



Дятлов Вячеслав Николаевич

**МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ**

Специальность: 2.5.11. Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ПГУПС).

Научный руководитель:

Кононов Дмитрий Павлович
доктор технических наук, доцент;

Официальные оппоненты:

Сладкова Любовь Александровна
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Российский университет
транспорта (МИИТ)», г. Москва, кафедра
«Наземные транспортно-технологические
средства», профессор;

Селиверстов Григорий Вячеславович
кандидат технических наук, доцент,
НВПО «Проиннотех», г. Тула, отдел
научно-исследовательской работы,
начальник;

Ведущая организация:

**ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого»**

Защита диссертации состоится «27» мая 2025 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.05 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220). Тел./Факс: (812) 316-58-73; e-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/dyatlov-vyacheslav-nikolaevich>

Автореферат разослан «14» апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета




Грушевский С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Отличительной конструктивной особенностью эскалаторов является замкнутый контур лестничного полотна, что позволяет отнести их к группе подъемно-транспортных машин непрерывного действия. Эскалаторы отнесены к категории опасных объектов, в отношении которых осуществляется обязательное страхование имущественных интересов в случае наступления страхового риска и возможном причинении вреда потерпевшим. Ряд объектов, представляющих собой часть общей транспортной системы, на которых используются эскалаторы, определяются как опасные производственные объекты, к которым устанавливаются обязательные требования в области промышленной безопасности, направленные на предупреждение несчастных случаев, аварий и инцидентов.

Наземные транспортно-технологические средства и комплексы включают в себя различные виды транспорта и оборудования, предназначенные для перевозки людей и грузов, в том числе подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование, к которым согласно отнесены эскалаторы. Несущая металлоконструкция является неотъемлемой частью эскалатора, непосредственно отвечающей за его функционирование.

Несущая металлоконструкция представляет собой сложную каркасную структуру, устанавливаемую на фундаменты тоннеля или перекрытия, которая в свою очередь выступает в качестве основы для всех последующих устанавливаемых элементов, узлов и агрегатов. Изготовление металлоконструкций эскалаторов осуществляется с помощью специализированных производственных процессов с применением профилированной и листовой стали. Для эскалаторов российского производства характерно применение сталей марок СтЗсп и СтЗпс.

Несущая металлоконструкция выполняет важнейшую функцию, так как является ключевым элементом функционирования всего эскалатора. К ней крепятся все необходимые агрегаты – двигатели, тяговые цепи, поручни и прочие механизмы. Именно несущая металлоконструкция должна выдерживать не только собственный вес и суммарный вес прикрепленных к ней узлов и механизмов, но и обеспечивать стойкость к динамическим нагрузкам, возникающим в процессе их работы.

Несущие металлоконструкции в силу особенностей их конструктивного исполнения и монтажа при проведении различных ремонтов практически всегда остаются на своих местах в течение всего периода эксплуатации, заменяются в основном вышедшие из строя агрегаты и механизмы, обеспечивающие функционирование эскалатора. Любая возникшая неисправность

в том или ином конструктивном элементе металлоконструкции эскалатора может стать критической для его нормального функционирования.

Установленный срок эксплуатации эскалаторов составляет 20 лет, если иное не определено в техническом паспорте на изделие, после чего проводится обследование объекта с целью определения его фактического состояния, по результатам которого должна быть представлена прогнозная оценка возможности его дальнейшего использования по прямому назначению.

Общее состояние металлоконструкций, их эксплуатационная и функциональная пригодность определяется также влиянием внешних факторов. Наличие дефектов и повреждений у металлоконструкций может обуславливаться как влиянием человеческого фактора, так и отсутствием возможных альтернатив при выборе материала, принятии тех или иных решений при проектировании, изготовлении и монтаже отдельных конструктивных элементов. На дальнейшее их развитие могут влиять состав окружающей среды, определяющий ее агрессивность; режимы работы, выходящие за рамки штатных; качество проводимых профилактических мероприятий, обслуживания и ремонтов.

Коррозия – это постепенный процесс, приводящий к тому, что ответственные конструктивные элементы теряют свою целостность и первоначальные геометрические параметры сечений. Связанный с этим общий рост значений напряжений, а также возникновение отдельных зон-концентраторов напряжений приводит к появлению и развитию многочисленных усталостных трещин, что непосредственно сказывается на несущей способности металлоконструкции.

В настоящей работе произведен анализ различных методов диагностирования и контроля технического состояния металлоконструкций подъемно-транспортных машин на примере эскалаторов; произведен отбор и анализ факторов, определяющих и влияющих на состояние металлоконструкции эскалаторов; разработан оригинальный метод диагностики и прогнозной оценки состояния как металлоконструкции эскалатора в целом, так и отдельных узлов, дающий основу для решения вопроса о возможности их дальнейшей эксплуатации при внесении опережающих корректив в соответствующие планы и графики проведения технических обслуживаний и ремонтов на основании использования полученных закономерностей с учетом условий, в которых осуществляется эксплуатация эскалаторов.

Степень разработанности темы исследования. Выделение и рассмотрение ключевых проблем, разработка специализированных методик, направленных на исследование и контроль технического состояния, а также на оценку остаточного ресурса грузоподъемных машин, в том

числе эскалаторов, осуществлялись в работах: Бардышева О.А., Бортякова Д.Е., Вагулина Я.С., Коровина С.К., Попова В.А., Сладковой Л.А., Семенова И.И., Уралова В.Л., Филина А.Н., Шафороста А.Н.; основные положения теорий коррозии и коррозионно-механического разрушения металлов изложены в трудах: Герасименко А.А., Карпенко Г.В., Х. Логана, Махутова Н.А., Овчинникова И.Г., Панасюка В.В., Петрова В.В., Похмурского В.И, Селиверстова Г.В. и др. В то же время, вопросы повышения надежности несущих металлоконструкций эскалаторов в связи с их коррозионной поврежденностью достаточного развития не получили.

Цель работы – разработка метода прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов на основании показателей детального диагностирования их технического состояния.

Задачами исследования являются:

1. Анализ и оценка технической возможности адаптации для металлоконструкций эскалаторов методов и методик контроля технического состояния металлоконструкций подъемно-транспортных машин;
2. Обзор и анализ металлоконструкций эскалаторов с выделением отдельных конструктивных особенностей и факторов, определяющих изменение их состояния во времени;
3. Разработка метода определения технического состояния частично замоналиченных шпилечных элементов подвеса крановых путей грузоподъемного оборудования в машинных залах эскалаторов;
4. Определение и анализ характерных особенностей протекания процесса коррозионного повреждения металлоконструкций эскалаторов при воздействии внешних и внутренних факторов в специфичных условиях эксплуатации с выявлением взаимосвязи между усталостным разрушением металлоконструкций эскалаторов и их коррозионным повреждением;
5. Разработка метода прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов с моделированием процесса накопления усталостных повреждений при совокупном влиянии коррозии и циклических нагрузок.

Объектом исследования являются секции и фермы металлоконструкций эскалаторов, а также отдельные элементы, используемые в машинных залах эскалаторов.

Предмет исследования: применяемые методы и методики контроля технического состояния несущих металлоконструкций подъемно-транспортных машин; факторы, определяющие протекание процесса коррозии и ее непосредственное влияние на состояние несущих металлоконструкций при одновременном сочетании с циклическими нагрузками.

Научную новизну работы составляют:

1. Разработанные регрессионные зависимости параметров окружающей среды с учетом конструктивных особенностей несущих металлоконструкций эскалаторов и наработки;
2. Метод оценки технического состояния отдельных конструктивных элементов, связанных с обслуживанием и ремонтом эскалаторного оборудования в машинных залах, доступ к которым затруднен или невозможен;
3. Многофакторная прогнозная математическая модель, связывающая коррозионные и физико-механические параметры, определяющие динамику состояния несущей металлоконструкции эскалатора;
4. Метод прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов с учётом зависимостей, связывающих количество циклов нагружения с диагностическими параметрами при применении соответствующей методики неразрушающего контроля, и их математическое описание.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов анализа протекающих процессов при эксплуатации эскалаторов.

Практическая ценность состоит в формировании методов контроля технического состояния элементов несущих металлоконструкций эскалаторов, использование которых дает возможность при осуществлении диагностирования оценивать состояние отдельных конструктивных элементов, прогнозировать изменения этого состояния, а также идентифицировать элементы металлоконструкций с предельным состоянием, что окажет положительное влияние на надежность функционирования и безопасность эскалаторов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Установленные условия эксплуатации металлоконструкций эскалаторов и регрессионные зависимости параметров окружающей среды с учетом конструктивных особенностей несущих металлоконструкций эскалаторов и наработки;
2. Метод оценки технического состояния отдельных узлов вспомогательного оборудования машинных залов эскалаторов;
3. Математическая модель, связывающая коррозионное влияние с физико-механическими аспектами эксплуатации несущих металлоконструкций эскалаторов;
4. Метод прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов с учётом номограмм (графических зависимостей), связывающих

количество циклов нагружения с диагностическими параметрами при применении соответствующей методики неразрушающего контроля и их математическое описание.

Методология и методы исследования. Статистический и регрессионный анализ, методы и методики структурного анализа материалов и определения технического состояния металлических конструкций эскалаторов, основы механики разрушения твердых тел и конечно-элементное моделирование. В качестве инструментов компьютерного моделирования применялись программные пакеты MathCad, SigmaPlot, а также входящие в состав программной платформы SolidWorks модули Simulation и Motion.

Область исследования соответствует предметной области знаний, определенной паспортом научной специальности 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы, а именно п. 3 «Экспериментальные исследования и испытания транспортно-технологических средств и их комплексов, а также отдельных систем, агрегатов, узлов, деталей и технологического оборудования» и п. 4 «Техническая эксплуатация транспортно-технологических средств и их комплексов».

Степень достоверности подтверждается проведением многочисленных контрольно-диагностических мероприятий и экспериментальных исследований на эскалаторах, корректностью поставленных задач и сопоставлением результатов экспериментальных исследований с результатами, полученными расчетным путем и исследованиями известных авторов. Все представленные зависимости прошли дополнительную проверку по критериям Фишера, Дурбин-Ватсона и Колмогорова-Смирнова, что подтверждает адекватность моделей в целом.

Апробация результатов. Положения работы были представлены на III-ем Бетанкуровском международном инженерном форуме ФГБОУ ВО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт Петербург, 2021 год), на V-ом Бетанкуровском международном инженерном форуме ФГБОУ ВО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (Санкт Петербург, 2023 год) и на конференциях: Всероссийской научно-практической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «История и перспективы развития транспорта на севере России» (Ярославль, 2021 год), Всероссийской научно-практической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Образование. Наука. Профессия» (Узловая, 2022 год), X-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Системы автоматизированного

проектирования на транспорте» (Санкт-Петербург, 2023 год), XVI-ой Международной конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах» (Санкт-Петербург, 2024 год).

Публикации. По теме работы опубликовано 12 печатных работ, 4 из них в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертационного исследования. Структура представленного диссертационного исследования включает следующие разделы: введение; четыре основные главы, освещающие исследовательскую часть; заключение, в котором суммируются основные выводы. Также представлен список литературы, состоящий из 127 позиций и необходимые приложения. Объем работы составляет 160 страниц. Наглядность обеспечивается за счет включения 57 иллюстраций, 9 таблиц и 68 формул.

Во введении исследования осуществляется оценка значимости рассматриваемой темы, устанавливаются основные направления исследования и перечень задач, решение которых необходимо для достижения целей. Также продемонстрировано обоснование научной оригинальности работы, ее теоретической и практической ценности, акцентируется внимание на ключевых тезисах, являющихся предметом защиты.

В первой главе рассматривается комплекс проблематик, связанных с работой подъемно-транспортных устройств. Здесь также проводятся детальный анализ и оценка различных аспектов, влияющих на техническое состояние эскалаторов, основываясь на анализе статистических данных.

Во второй главе выполнен глубокий анализ подходов к исследованию коррозионных процессов и выявлению связей между коррозионными процессами и явлениями усталости в структуре металла; исследуются основные методы, применяемые для оценки состояния металла в условиях сочетания коррозии и механического износа; акцентируется внимание на индивидуальных характеристиках эксплуатации отдельных конструкций, расположенных в машинных залах эскалаторов, и на влиянии этих особенностей на выбор методов диагностирования. Детально рассмотрены внутренние и внешние факторы, которые необходимо учесть при разработке математической модели. Такая модель предназначена для адекватной оценки текущего состояния и динамики его изменения у элементов металлоконструкций эскалаторов.

В третьей главе путем обработки экспериментальных данных при использовании соответствующих программных комплексов получены закономерности, введенные в состав общей многофакторной математической

модели с учетом особенностей отдельных конструктивных элементов, доступ к которым ограничен или невозможен.

В четвертой главе произведен анализ экспериментальных результатов в сравнении с данными, полученными на основе разработанной математической модели; представлен метод для диагностики состояния металлоконструкций эскалаторов; выделяется область применения данного метода и формулируется концепция рационализации при выполнении исследований и обследований элементов металлоконструкций эскалаторов.

В заключении подведены итоги, отражающие научный и прикладной вклад исследования; выявлены перспективные направления и возможности для продолжения последующих исследований в данной области.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Установленные условия эксплуатации металлоконструкций эскалаторов и регрессионные зависимости параметров окружающей среды с учетом конструктивных особенностей несущих металлоконструкций эскалаторов и наработки.

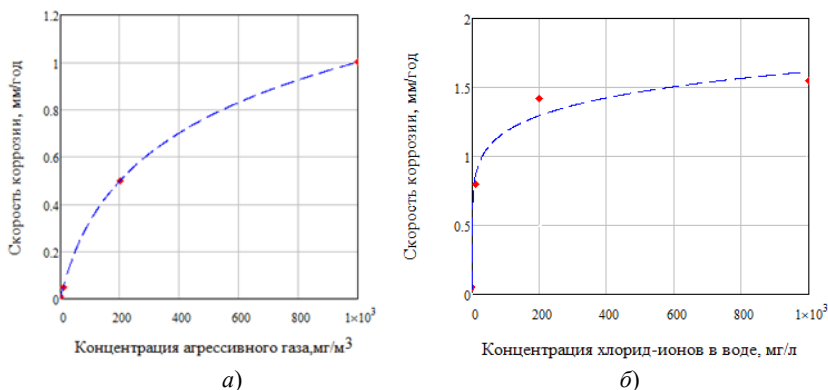
Опорная каркасная металлоконструкция эскалатора, служащая его несущей основой, фиксируется на опорах в туннеле или междуэтажных перекрытиях. Все механизмы и устройства, составляющие общую функциональную конструкцию эскалатора, размещаются на этой металлоконструкции, которая в результате подвергается разнообразным видам нагрузок: статическим – от собственного веса и динамическим – от приводных компонентов и цепей с поручнями. Каждый отдельный узел или механизм эскалатора генерирует вибрационные воздействия, характеризующиеся различными параметрами. Итоговая нагрузка является результатом суммирования этих воздействий. Также на уменьшение несущей способности влияет прогрессирующее коррозионное воздействие.

Агрессивность атмосферы определяется в этом случае наличием в своем составе различных загрязнений. Наиболее активными загрязнителями являются сернистый ангидрид (SO_2) и хлориды – источники хлорид-ионов. Соединения серы частично попадают в атмосферу естественным путем (вулканическая деятельность и испарение с поверхности океана), а частично антропогенным. Уровень загрязнения хлоридами может носить сезонный характер, что связывается с использованием реагентов для растворения снежного покрова и наледей в городской обстановке, наличие морского побережья или заливов с морской водой также является источником хлоридов.

Температурный напор для несущих металлоконструкций эскалаторов в общем понимании присутствует как в летние и зимние периоды, так и по уровню залегания.

В действительности, коррозия – это не процесс разрушения материала или деградации природы, а именно энтропийная функция, направленная на восстановление баланса в природе.

Скорость коррозии напрямую взаимосвязана с концентрацией коррозионно-активных загрязнений (рисунок 1а, 1б).



◆◆◆ – экспериментальные точки; — – установленная зависимость

Рисунок 1 – Скорости коррозии низкоуглеродистых сталей:

а – зависимость от концентрации SO_2 (нормальная влажность);

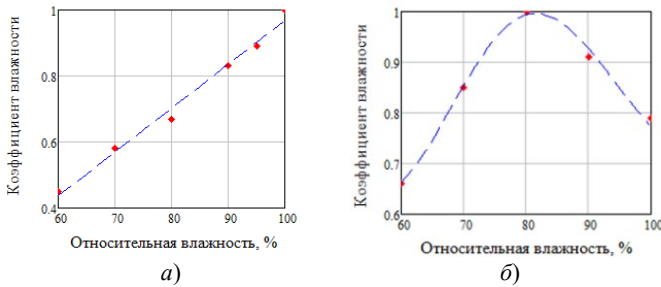
б – зависимость от концентрации хлорид-ионов в воде

Используя программное обеспечение для статистического анализа (MathCad 14 и SigmaPlot v12) было выполнено регрессионное моделирование на основе экспериментальных данных. В результате была получена математическая формула, квантифицирующая данную взаимосвязь:

$$v = 0,362 \cdot \ln(C + 68,066) - 1,526, \quad (1)$$

где v – скорость коррозии, мм/год; $C = C_{Cl} + 1,211 \cdot C_{\text{SO}_2}$ – эквивалентная концентрация коррозионно-активных загрязнений, мг/м³; C_{Cl} – концентрация хлорид-ионов, мг/м³; C_{SO_2} – концентрация сернистого ангидрида, мг/м³.

Влияние влажности среды на скорость коррозии учитывается посредством введения коэффициента влажности среды k_ϕ , что графически изображено на рисунке 2а.



♦♦♦♦ – экспериментальные точки; — — установленная зависимость

Рисунок 2 – Влажностный аспект атмосферной коррозии при различных количествах сконденсированной на поверхности материала воды:

$a - 0,5 \text{ г/дм}^2$; $b - 2,3 \text{ г/дм}^2$

В результате регрессионного анализа было получено математическое уравнение, моделирующее значение k_ϕ в зависимости от относительной влажности воздуха ϕ , изменяющейся в диапазоне от 60% до 100%:

$$k_\phi = -0,3610 + 0,0133 \cdot \phi. \quad (2)$$

При сведении (1) и (2) воедино получено обобщенное выражение:

$$\nu = (0,362 \cdot \ln(C + 68,066) - 1,526) \cdot k_\phi. \quad (3)$$

При более значительном количественном содержании влаги и ее конденсации на поверхности металла или скоплением в каких-либо полостях, ситуация меняется существенно (рисунок 2б).

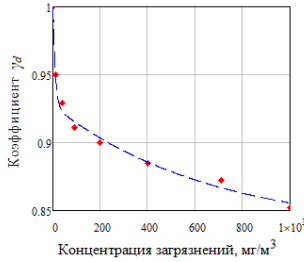
Соответственно в таких случаях:

$$k_\phi = 0,5994 + 0,3997 \cdot e^{\left[-0,5 \left(\frac{\ln\left(\frac{\phi}{81,4660}\right)}{0,1597} \right)^2 \right]}. \quad (4)$$

При анализе и оценке воздействия агрессивных сред и температурных перепадов на механические свойства материалов применяется установленная зависимость:

$$\sigma_{(T)C} = \sigma_{T0} \cdot e^{\left[0,00341 \cdot \beta \cdot \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) \right]} \cdot \gamma_d \cdot k_t, \quad (5)$$

где $\sigma_{(T)C}$ – рассчитываемый предел текучести при влиянии агрессивной среды; σ_{T0} – исходный предел текучести материала при стандартной температуре $T_0 = 293,15 \text{ K}$ (20°C); β – коэффициент устойчивости сечения против коррозии; γ_d – коэффициент, учитывающий снижение прочности материала из-за адсорбции; $k_t = 1 - 0,0016 \cdot \tau$ – временная составляющая.



◆◆◆ – экспериментальные точки; — — установленная зависимость

Рисунок 3 – Зависимость коэффициента изменения прочности материала от концентрации загрязнений

Анализ воздействия агрессивных загрязнителей при их различной концентрации на прочностные показатели материалов позволил разработать регрессионную модель. Эта модель выявляет функциональные связи и определяет коэффициент γ_d при нормальной влажности (рисунок 3).

$$\gamma_d = 0,8350 + 0,0726 \cdot e^{-0,1055 \cdot C} + 0,0922 \cdot e^{-0,0015 \cdot C}. \quad (6)$$

Объединив (5) и (6), получаем:

$$\sigma_{(T)C} = \sigma_{T0} \cdot e^{\left[0,00341 \cdot \beta \cdot \left(\frac{T_0}{T} - 1\right)\right]} \times \\ \times \left(0,8350 + 0,0726 \cdot e^{-0,1055 \cdot C} + 0,0922 \cdot e^{-0,0015 \cdot C}\right) \cdot k_t. \quad (7)$$

Универсальность адсорбционного воздействия среды позволяет сделать вывод, что изменение предела выносливости материала $\sigma_{(e)C}$ будет происходить аналогично.

$$\sigma_{(e)C} = \sigma_{e0} \cdot e^{\left[0,00341 \cdot \beta \cdot \left(\frac{T_0}{T} - 1\right)\right]} \cdot \left(0,8350 + 0,0726 \cdot e^{-0,1055 \cdot C} + 0,0922 \cdot e^{-0,0015 \cdot C}\right) \cdot k_t \quad (8)$$

где σ_{e0} – предел выносливости материала при температуре $T_0 = 293,15$ К (20°C).

2. Метод оценки технического состояния отдельных узлов вспомогательного оборудования машинных залов эскалаторов.

В технических условиях машинных залов эскалаторов, если таковые предусмотрены исходя из конструктивных особенностей, применяются подвесные тали, которые обладают возможностью как ручного, так и электрического управления. Их основное предназначение заключается в перемещении тяжеловесных объектов вдоль специально устроенных маршрутов, выполненных в форме двутавровых металлических балок. Для крепления двутавров к потолочным строительным элементам конструкции

используют шпилечные соединения (рисунок 4), которые после монтажа частично оказываются замоноличенными.

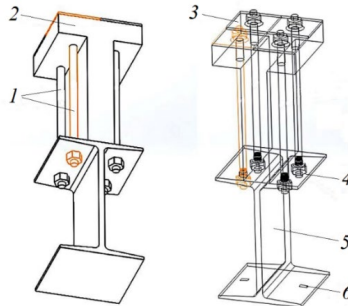


Рисунок 4 – Шпилечный подвес ездового двутавра:

1 – шпильки; 2 – фрагмент бетонного перекрытия; 3 – замоноличенный узел крепления шпилечного подвеса; 4 – узел крепления ездового двутавра; 5 – ездовой двутавр; 6 – зоны приложения статической нагрузки от веса тельфера

В соответствии с техническими параметрами, описанными в проектной документации, типовая шпилька имеет диаметр 16 мм и длину 400 мм. Они изготавливаются из сталей марок 40Х, 45Х, обладающими необходимыми характеристиками прочности и устойчивости. Фиксация в нужном положении достигается посредством резьбового соединения.

Применение классических мониторинговых методов за состоянием шпилечных соединений иногда оказывается неосуществимым из-за специфики их установки. В таких случаях в качестве альтернативы предлагается вибрационный метод, который основывается на изучении реакций конструкции, а именно на анализе мод колебаний ее стержневых элементов. Посредством центрального удара, который реализуется с помощью механического ударника, объекту исследования передается динамический импульс (рисунок 5).



Рисунок 5 – Передача исследуемому объекту механической энергии генератором ударных импульсов

Ударник оснащен конусным индентором и встроенной пружиной с заданной жесткостью, что обеспечивает дублирование ударного воздействия с точно регулируемой скоростью и достижением пика ускорения до 100 м/с^2 в течение короткого времени – до 10 мс.

Для активации колебательных процессов в структуре с наибольшей эффективностью, использовался метод численного моделирования, который позволил установить локации для приложения импульсов и определить направление их распространения. Для этого использовался специализированный модуль Simulation в рамках системы CAD (компьютерное проектирование) SolidWorks.

Процесс моделирования напряжений и деформаций в узле переходит через две стадии. На первом этапе анализируются напряжения и деформации, возникающие вследствие предварительной затяжки резьбовых соединений. Затем, на втором этапе, изучается влияние рабочих нагрузок, которыми будет подвергаться конструкция в процессе эксплуатации.

Для того чтобы сделать условия моделирования затяжки резьбовых соединений более приближенными к реальности, в модель был введен параметр отрицательной температурной нагрузки (рисунок 6) для имитации условий, которые приводят к сокращению объема материала шпилек и, как следствие, созданию сжимающей нагрузки в шпильках и изгибанию верхней полки ездового двутавра.

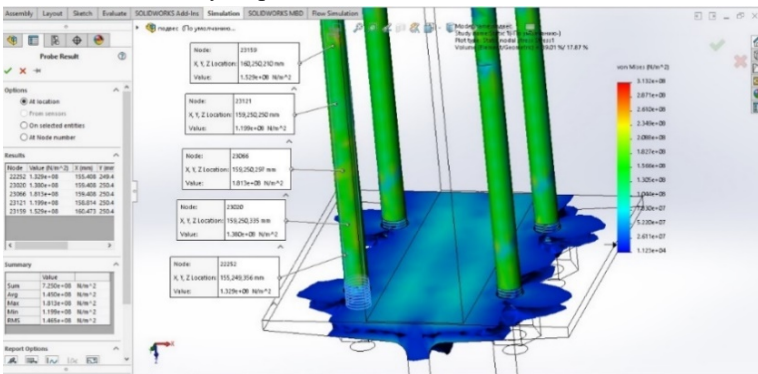


Рисунок 6 – Эпюра напряжений шпильчных соединений узла подвеса при предварительном натяжении резьбовыми соединениями

Использование метода линейной аппроксимации дало возможность установить взаимосвязи между напряжениями, которые возникают в сечениях шпилек, и воздействующей на них температурной нагрузкой, имитирующей процесс затяжки резьбовых соединений (рисунок 7).

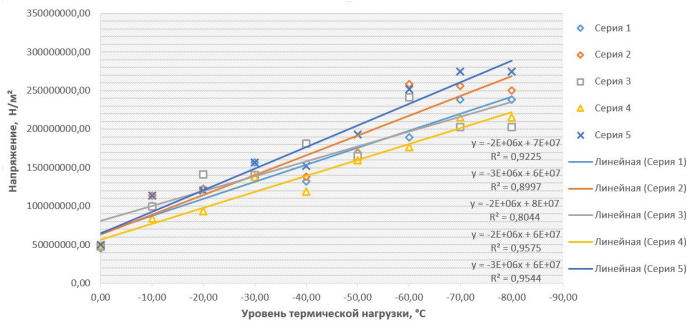


Рисунок 7 – Зависимость напряженно-деформированного состояния шпилечного соединения от прикладываемой термической нагрузки

С целью повышения результативности методик, использующих импульсное возбуждение при исследовании конструкций, применяется модальный анализ. Этот метод позволяет детально изучить вибрационные параметры и является ключевым инструментом для оценки напряженно-деформированного состояния в элементах конструкций.

В процессе модального анализа осуществляется детектирование определенных точек на поверхности конструктивных элементов, которые под воздействием вибрации показывают наибольшие отклонения. Подобные участки чередуются с участками, где вибрационный отклик сведен к минимуму или полностью отсутствует. Идентификация этих участков происходит через создание форм мод низших частот, что представляет собой образец первичных собственных колебаний системы.

Для достижения высокой точности частотного анализа важно правильно воссоздать условия взаимодействия между анализируемым компонентом и его соединениями с другими частями в конструкции.

В таблице 1 представлена информация о первых пяти собственных частотах компонентов, для которых характерны определенные дефекты.

Таблица 1 – Таблица собственных частот элемента, Гц

№ моды	Исправное	Трещина 50% площади поперечного сечения	Остаточная деформация (прогиб)	Коррозия 30% площади поперечного сечения
1	571,44	535,93	500,65	461,62
2	571,83	562,81	706,05	461,97
3	1325,5	1315,1	1214,5	728,62
4	1581,4	1544,7	1489,0	1429,9
5	1582,4	1570,3	1517,5	1431,0

Выявление дефектов в структуре происходит благодаря анализу данных, полученных при сканировании частотных значений, а также благодаря точной позиции установленного датчика: у шпильчатого соединения с коррозионным повреждением замоноличенной части узел с нулевым значением амплитуд обнаруживается непосредственно на границе заделки (рисунок 8а), у шпильчатого соединения с остаточной деформацией (например, изгиб) максимальные амплитуды возникают в среднем сечении шпильки (рисунок 8б).

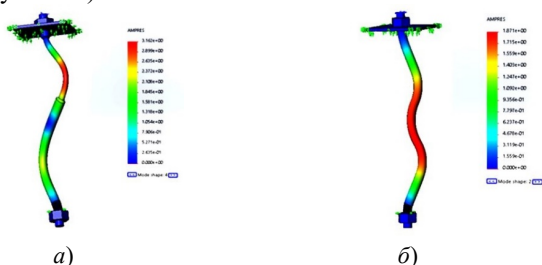


Рисунок 8 – Пример моды № 2 колебания элемента с характерными повреждениями: а – коррозия 30% площади сечения, б – остаточная деформация (изгиб)

При совместной работе элемента в составе сборочного узла при условии достаточного предварительного натяжения, характер виброотклика значительно меняется (усложняется): в отличие от свободных колебаний незафиксированного элемента в сборке энергия удара частично передается связным элементам, соответственно условиям их взаимодействия. В процессе исследования динамического поведения узла подвеса под воздействием нагрузки при моделировании типовых повреждений (рисунок 9) были выделены моды, наиболее полезные для целей диагностики.

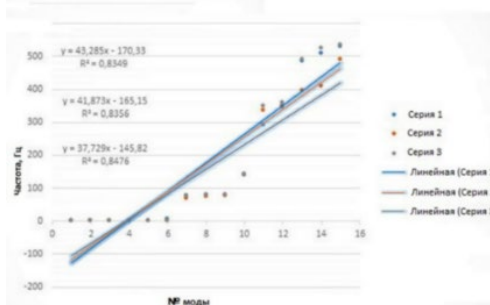


Рисунок 9 – Исследование динамики нагружения узла подвеса с моделированием повреждений: серия 1 – изгиб с радиусом 100 мм; серия 2 – коррозия 50% площади поперечного сечения; серия 3 – трещина 50% сечения

Анализ показал, что в модах, начиная с шестой и выше, содержится важная информация для диагностики состояния узла. Эти моды представлены в диапазоне частот между 100 и 500 Гц.

Для обеспечения стабильного функционирования метода, важно удостовериться в том, что шпильчный элемент разгружен. Основным индикатором нарушения равномерности монтажной нагрузки на элементы шпильчного узла служит резонанс шпильки на ее собственной частоте при соответствующем возбуждении. В случае затяжки резьбовых соединений, предпочтительно использовать частотные диапазоны, превышающие шестую моду колебаний.

При проведении вибрационного анализа состояния шпильчного соединения, дополнительным диагностическим аспектом может являться исследование траектории движения контрольной точки в пространстве. Представление данной траектории графически выявляет ее форму в пространстве, которая может быть описана как кривая, соединяющая концы последовательных положений векторов переменной величины. Иллюстративный пример такой орбиты, которая указывает на наличие остаточной деформации элемента в виде изгиба показан на рисунке 10.

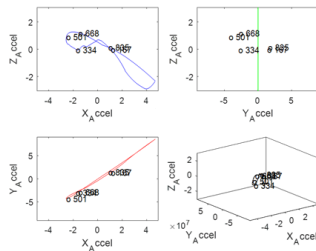


Рисунок 10 – Орбита движения исследуемой точки элемента подвеса, поврежденной остаточной деформацией

Особенности изменения формы орбиты контрольной точки могут указывать на различия в жесткости исследуемого узла в зависимости от направления. Это дает возможность более точно установить границы конкретных участков диагностируемого узла и сделать вывод о его техническом состоянии в целом.

3. Математическая модель, связывающая коррозионный аспект с физико-механическими аспектами эксплуатации опорных металлоконструкций эскалаторов.

Для анализа степени коррозионного воздействия на материалы используется показатель, который отображает интенсивность влияния агрессивной среды – глубина деградации материала s с течением времени t :

$$s = v \cdot \tau, \quad (9)$$

где v – усредненное значение скорости коррозии, мм/год;

Коррозионный износ приемлемо описывается также и степенной функцией

$$s = K \cdot \tau^n. \quad (10)$$

В контексте изучения коррозионной активности, значения коэффициентов K и n получают через экспериментальные исследования. Коэффициент K по аналогии с (9), определяется как средняя скорость коррозии, фиксируемая за первый год наблюдений, и одновременно является мерой степени агрессивности среды. Коэффициент n служит для оценки замедления процесса коррозии, что позволяет констатировать коррозионную стойкость материала. Однако на данном этапе представленные модели (9) и (10) не дают возможности проследить влияние аэрохимического воздействия среды. Для устранения данного недостатка приравняем выражения (9) и (10), тогда

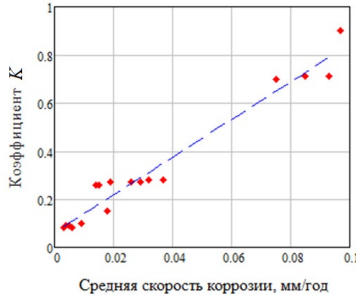
$$v \cdot \tau = K \cdot \tau^n. \quad (11)$$

В результате преобразований получим

$$n = \log_{\tau} \left(\frac{v}{K} \right) + 1. \quad (12)$$

Из анализа уравнения (12) следует, что определение коэффициента n возможно только при известном значении коэффициента K . Тогда для установления значения K очевидно стало необходимым выявление его функциональной связи с величиной v , что можно представить как $K = f(v)$. Данное соотношение было выведено на основании регрессионного анализа имеющихся экспериментальных данных (рисунок 11) с учетом того, что коэффициент K ограничивается пределом от 0,05 до 0,9:

$$K = 0,063 + 7,831 \cdot v. \quad (13)$$



◆◆◆ – экспериментальные точки; — — установленная зависимость

Рисунок 11 – Определение коэффициента K

Геометрические характеристики металлических конструкций, такие как как слитность сечения и аэродинамические качества в виде обтекаемости элементов конструкции, играют существенную роль в прогрессировании коррозионных процессов.

Скорость коррозии может принимать различные значения на разных участках конструкции даже без смены их положение в пространстве. В то же время изменение положения или ориентации элементов конструкции в пространстве может привести к еще большему разбросу в значениях скорости коррозии.

Изучение эпюр скоростей коррозии (рисунок 12) позволяет выделить критические области, к которым следует применять дополнительные меры превентивного ухода.

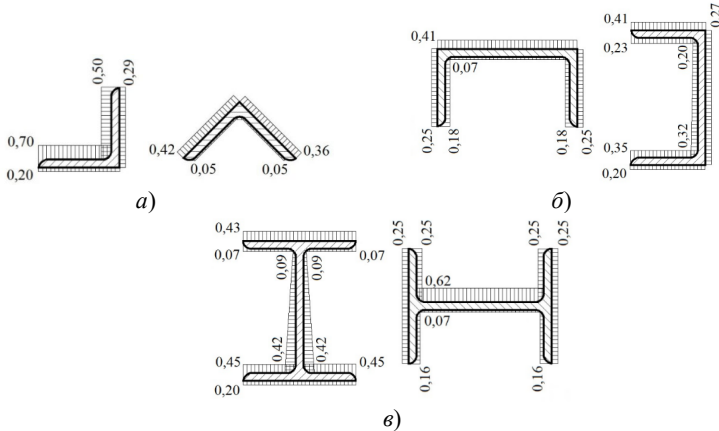


Рисунок 12 – Значения скоростей коррозии по периметру сечения стальных профилей при изменении их положения в пространстве, мм/год:

а – равнополочного уголка, *б* – швеллера, *в* – двутавра

Особенно уязвимы к коррозии верхние горизонтальные поверхности и зоны соединения их с вертикальными поверхностями. Это объясняется склонностью таких мест к скоплению влаги, что ускоряет процессы коррозионного разрушения.

Для адекватной оценки потенциала коррозионных повреждений определенной части конструкции, исходя из ее расположения и ориентации в пространстве, вводится коэффициент конструктивного исполнения $k_{ки}$. Для большей универсализации математической модели в нее интегрируется дополнительный параметр – глубина деградации материала δ , отображающий динамику величины коррозионного износа.

Для адаптации модели к возможным изменениям скорости коррозии во времени вводится коэффициент пассивности k_n . В течение первого года ($\tau = 1$) эксплуатации значение коэффициента приравнивается к 1,0, что соответствует базовому уровню скорости коррозии. Однако с увеличением срока службы проявляется потенциал замедления коррозионных процессов из-за развития пассивных слоев и других защитных механизмов. При $\tau > 1$, k_n может быть рассчитан по эмпирической формуле:

$$k_n = \frac{0,051 \cdot \tau^{0,426} - 0,05025}{0,05 \cdot (\tau - 1)}. \quad (14)$$

Если глубина деградации материала в первый год составила $\delta = \delta_1$, то дальнейшее развитие процесса можно описать следующим выражением:

$$\delta_\tau = \delta_1 \cdot (\tau - 1) \cdot k_{ки} \cdot k_n. \quad (15)$$

Добавив в выражение (15) глубину деградации материала в первый год эксплуатации, получим:

$$\delta = \delta_1 + \delta_\tau = \delta_1 \cdot (1 + (\tau - 1) \cdot k_{ки} \cdot k_n). \quad (16)$$

Посредством введения дополнительного коэффициента k_{en} , учтем то, что внутренний подслои в общей толщине слоя ржавчины приходится от 45 до 54%. По физико-механическим свойствам он близок к основному материалу.

Выражение (16) в таком случае примет следующий вид:

$$\delta = \delta_1 \cdot (1 + (\tau - 1) \cdot k_{ки} \cdot k_n) \cdot k_{en}, \quad (17)$$

где $k_{en} = 0,45-0,54$.

Выражение для определения глубины питтинга δ_n :

$$\delta_n = \delta \cdot \frac{k_{no} \cdot k_{ки}}{k_m}, \quad (18)$$

где $k_{no} = 2-2,5$ – коэффициент питтингообразования; k_m – коэффициент материала (для низкоуглеродистых сталей $k_m = 1$).

Питтингообразование в материале проявляется в виде возникновения концентраторов напряжений, представляющих собой локальные дефекты, из могут развиваться усталостные трещины.

Инструментом для анализа начального этапа усталостного разрушения материалов служит модель Л.А. Сосновского

$$N_T = -\frac{1}{C_N} \int_{\mu_0}^1 \frac{(1 - \mu_{nT})^{m_c}}{\Delta \sigma_n^{m_c}} d(1 - \mu_{nT}), \quad (19)$$

где N_T – число циклов, выдерживаемых материалом на стадии рассеянной повреждаемости; C_N и m_c – коэффициенты, численные значения которых

определяются физическими и механическими характеристиками конкретного материала; μ_0 – количественная доля структурных дефектов материала, которые уже присутствуют до начала эксплуатационной нагрузки; μ_{nT} – количественная доля деградации структуры из-за накопления усталостных повреждений во время эксплуатационной нагрузки; $\Delta\sigma_n$ – величина повреждающих напряжений.

Значение повреждающих напряжений можно определить, воспользовавшись формулой

$$\Delta\sigma_n = \sigma_{\max n} - \sigma_{RK}, \quad (20)$$

где σ_{RK} – предел выносливости.

Анализ формулы (20), позволяет еще на предварительном этапе сделать следующие предположения и выводы: рост уровня повреждающих напряжений происходит, во-первых, в среде, содержащей коррозионно-активные загрязнений, что является причиной усиления коррозионного износа и приводит к увеличению $\sigma_{\max n}$, во-вторых, при адсорбционном воздействии среды, обеспечивающем снижение σ_{RK} . Не исключается вариант, когда может происходить одновременное изменение соответствующих величин, что приводит к общему росту уровня повреждающих напряжений.

Скорость накопления усталостной повреждаемости по величине накопленного критического объема повреждений V_{ny} тогда определяется по формуле

$$v_{pn} = \frac{V_{ny}}{N_T \cdot \Delta\sigma_n}, \quad (21)$$

В результате сведения всех полученных уравнений воедино, получена совокупная многофакторная прогностическая математическая модель (22), описывающая сплошную равномерную и неравномерную коррозии, локальные виды коррозии (питтинговую), адсорбционную усталость при одновременном влиянии конструктивного исполнения, сплошности сечений и ориентации тех или иных поверхностей отдельных конструктивных элементов в пространстве.

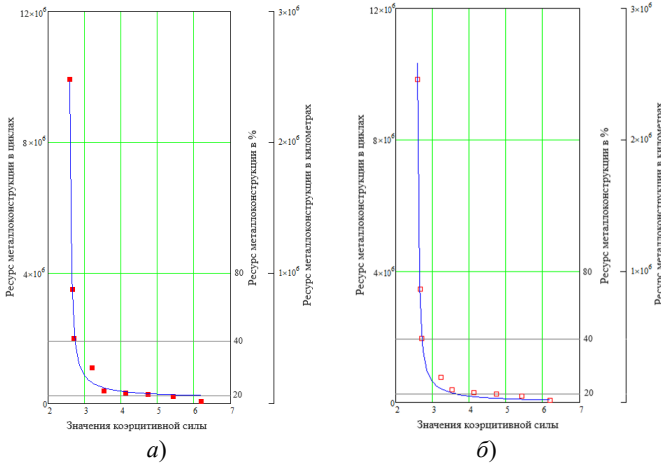
Основываясь на данных уравнениях, можно не только учесть прямые влияния внешней среды, но и отследить внутренние структурные и физические изменения материала при многократных циклах нагрузки в течение его службы.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 s = K \cdot \tau^n \\
 n = \log_{\tau} \left(\frac{\upsilon}{K} \right) + 1 \\
 K = 0,063 + 7,831 \cdot \upsilon \\
 \upsilon = (0,362 \cdot \ln(C + 68,066) - 1,526) \cdot k_{\varphi} \\
 \sigma_{(T)C} = \sigma_{T0} \cdot e^{\left[0,00341 \cdot \beta \cdot \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) \right]} \cdot \gamma_d \cdot k_t \\
 \delta = \delta_1 \cdot (1 + (\tau - 1) \cdot k_{ku} \cdot k_n) \cdot k_{en} \\
 \delta_n = \delta \cdot \frac{k_{no} \cdot k_{ku}}{k_M} \\
 \upsilon_{pn} = \frac{V_{n\gamma}}{N_T \cdot \Delta \sigma_n}
 \end{array} \right. \quad (22)$$

4. Метод прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов с учётом номограмм (графических зависимостей), связывающих количество циклов нагружения с диагностическими параметрами при применении соответствующей методики неразрушающего контроля и их математическое описание.

Анализ методов магнитного контроля для определения остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин, а также результатов комплексного обследования металлоконструкций эскалаторов на примере ГУП «Петербургский метрополитен» позволил определить ряд ключевых точек и установить определенную зависимость между ресурсом металлоконструкции эскалатора и величиной коэрцитивной силы.

На рисунке 13а изображена графическая зависимость без учета влияния окружающей среды на ресурс металлоконструкции, описывающая физико-механические изменения в металле только в зависимости от количества циклов нагружения. Отделение коррозионной составляющей осуществлено расчетным методом с усредненным содержанием сернистого ангидрида и хлорид-ионов в окружающей атмосфере при средней влажности 70%. На рисунке 13б представлена графическая зависимость с учетом разработанной коррозионной математической модели (22), позволяющей также моделировать иные факторы повреждаемости с учетом количества циклов нагружения в период эксплуатации.



□□□, ■■■ – экспериментальные точки; — – установленные зависимости.

Рисунок 13 – Графики магнитного контроля остаточного ресурса:

a – чистый, *б* – с учетом коррозионной модели

Для повышения точности прогнозных оценок предел допустимых значений коэрцитивной силы был разделен на три диапазона

$$\text{I: } 2,48 \leq H_C \leq 3,00,$$

$$\text{II: } 3,01 \leq H_C \leq 5,00,$$

$$\text{III: } 5,01 \leq H_C \leq 6,35.$$

Анализ данных для каждой группы значений позволил установить отдельные зависимости, стыкующиеся на граничных значениях с отклонениями не более 3,7 %, что позволяет рассматривать совокупные математические модели как базовые для определения остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов.

Модель, описывающая номограмму, представленную на рисунке 15а в соответствии с принятыми диапазонами

$$\begin{cases} N_I = \frac{21163,0719 - 10975,4676 \cdot H_C}{1 - 0,6522 \cdot H_C + 0,1025 \cdot H_C^2} \\ N_{II} = \frac{1 + 3277135,3096 \cdot H_C}{-299,3813 + 108,6487 \cdot H_C} \\ N_{III} = \frac{-6,3543 + H_C}{-0,00006752 + 0,000008876 \cdot H_C} \end{cases} \quad (23)$$

Модель, описывающая номограмму, представленную на рисунке 15б с учетом коррозионной составляющей в соответствии с принятыми диапазонами

$$\begin{cases} N_I = \frac{22387,0758 - 11470,6133 \cdot H_C}{1 - 0,6486 \cdot H_C + 0,1011 \cdot H_C^2} \\ N_{II} = \frac{1 + 969707697,1745 \cdot H_C}{-92865,9187 + 33615,6134 \cdot H_C} \\ N_{III} = \frac{19546,8352 - 3041,0255 \cdot H_C}{1 - 0,3330 \cdot H_C + 0,0296 \cdot H_C^2} \end{cases} \quad (24)$$

На основе имеющихся математических моделей, а также большого количества начальных данных в их различных комбинациях и интерпретациях появилась возможность создать алгоритм для решения представленных задач с использованием ресурсов ЭВМ, что было реализовано в ходе данного диссертационного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследования были сделаны следующие выводы:

1. Осуществлен анализ существующих методов по оценке технического состояния металлоконструкций грузоподъемных машин. Основной целью ставилось определение возможности их применения для аналогичных оценок в контексте элементов металлоконструкций эскалаторов.

2. Осуществлен комплексный анализ ряда определяющих факторов, влияющих на интенсивность и характер процесса атмосферной коррозии низкоуглеродистых сталей. К наиболее значимым из них отнесены: степень влажности окружающего воздуха, присутствие в атмосфере агрессивных примесей и загрязнителей, собственно химический состав сплава, а также его структурные характеристики, особенности конструкции и фазовый состав образующейся на поверхности ржавчины.

3. Разработана математическая модель, которая комплексно отражает процесс коррозии элементов металлоконструкций эскалаторов. Данная модель учитывает не только кинетику коррозионных процессов, но и взаимное влияние нескольких основных факторов.

К таким факторам относятся: относительная влажность воздуха; присутствие коррозионно-активных компонентов; свойства образующихся

продуктов коррозии, способствующих защите металла и замедлению процесса коррозии; конструктивные особенности элементов; воздействие множества циклов нагружения на основной материал.

Модель является достаточно гибкой, поскольку позволяет модифицировать ее параметры согласно конкретным условиям эксплуатации объектов.

4. Разработан метод определения технического состояния частично замоноличенных шпилечных элементов подвеса крановых путей грузоподъемного оборудования в машинных залах эскалаторов, основанный на анализе их виброотклика на ввод ударного импульса в контрольные точки.

5. Разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния металлоконструкции эскалатора на примере использования коэрцитиметра КРЦ-М-2 как составная часть метода прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов.

6. Получены графические зависимости значений коэрцитивной силы от количества циклов нагружения – без учета коррозионной составляющей и с учетом разработанной математической модели. Математическое описание представленных графических зависимостей дало возможность создать алгоритм по оценке остаточного ресурса металлоконструкции эскалаторов и описать его на языке программирования высокого уровня PascalABC.Net. Исходный код является открытым, что подразумевает возможность внесения изменений с целью усовершенствования и расширения выполняемых функций.

7. В рамках метода прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов также описана ускоренная методика по оценке глубинного показателя коррозии для низкоуглеродистых сталей. Используемый в ней принцип рационализации значительно ускоряет процесс проведения испытаний или обследований конструктивных элементов металлоконструкции эскалаторов не менее чем на 28%.

8. Интеграция представленных методов в процессы технического обслуживания позволяет преобразовать подходы к управлению состоянием оборудования, переориентировав их на обслуживание как по фактическому техническому состоянию, так и прогнозной его оценке.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ:

1. Дятлов, В.Н. Моделирование процесса коррозии несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена / В.Н. Дятлов // Вестник МАДИ. – 2022. – №1 (68). – с. 29-35.
2. Дятлов, В.Н. Уточнение модели развития коррозионных дефектов несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена / В.Н. Дятлов // Вестник МАДИ. – 2022. – №3 (70). – с. 46-50.
3. Ватулин, Я.С. Техническое диагностирование закладных элементов крановых путей грузоподъемного оборудования в машинных залах тоннельных эскалаторов / Я.С. Ватулин, В.А. Попов, В.Н. Дятлов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2022. – Т. 16, № 3. – с. 241-250.
4. Дятлов, В.Н. Рационализация периодов проведения диагностических обследований элементов металлоконструкций эскалаторов метрополитена / В.Н. Дятлов, Д.П. Кононов // Вестник СибАДИ. – 2024. – Т. 21, № 5. – с. 662-671.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613806. Программа для оценки остаточного ресурса металлоконструкции эскалаторов метрополитена / Дятлов В.Н., Козлов М.Н., Попов В.А., Воробьев А.А. – Заявка № 2024612398 от 07.02.2024; дата государственной регистрации 15.02.2024.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024613803. Программа обработки телеметрической информации технического состояния эскалаторов / Козлов М.Н., Дятлов В.Н., Метлякова С.А., Ватулин Я.С., Воробьев А.А. – Заявка № 2024612400 от 07.02.2024; дата государственной регистрации 15.02.2024.

Публикации в прочих изданиях, индексируемых в РИНЦ:

7. Дятлов, В.Н. Методика расчета рисков возникновения отказов несущих металлоконструкций эскалаторов с определением уточняющих коэффициентов запаса прочности / В.Н. Дятлов // История и перспективы развития транспорта на севере России. Вып. 1. – 2021. – с. 100-104.
8. Дятлов, В.Н. Математическое моделирование развития коррозионных дефектов в металлоконструкциях эскалаторов метрополитена / В.Н. Дятлов // III Бетанкуровский международный инженерный форум:

сборник трудов. В 2 томах. Том 1, Санкт-Петербург, 2-3 декабря 2021 года. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021 – с. 134-136.

9. Дятлов, В.Н. Анализ причин изменения состояния опорных металлоконструкций эскалаторов метрополитена / В.Н. Дятлов // Техник транспорта: образование и практика. – 2023. – 4(4). – с. 406-412.

10. Дятлов В.Н. Моделирование и прогнозирование процессов коррозии / В. Н. Дятлов, В. А. Попов // Системы автоматизированного проектирования на транспорте: Материалы X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 27–28 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2023. – с. 109-114.

11. Дятлов, В.Н. Оценка напряженно-деформированного состояния металлоконструкций на примере эскалаторов с определением их остаточного ресурса / В.Н. Дятлов, О.А. Дятлова // V Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов в 2 томах. Том. 1. Санкт-Петербург, 29 ноября-1 декабря 2023 года. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023 – с. 251-255.

12. Дятлов В.Н. Совместное влияние циклических нагрузок и коррозии на техническое состояние металлоконструкций эскалаторов метрополитена / В. Н. Дятлов, С. В. Орлов, В. А. Попов // Мир транспорта. – 2023. – Т. 21. No 4 (107). – с. 21–28.

Компьютерная верстка В. С. Весниной

Подписано к печати 21.03.2025. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,6. Тираж 120 экз. Заказ 31.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А