

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I»

На правах рукописи

Дятлов Вячеслав Николаевич

**МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и
комплексы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., доцент
Кононов Дмитрий Павлович

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
1.1 Общая характеристика проблем эксплуатации подъемно-транспортных машин	12
1.2 Конструкции эскалаторного парка	14
1.3 Определение направлений исследования.....	18
1.4 Нормативная база допуска к эксплуатации и проведения экспертизы промышленной безопасности эскалаторов.....	19
1.5 Исследование влияния условий эксплуатации на состояние несущих металлоконструкций эскалаторов	21
1.5.1 Нагрузки, действующие на металлоконструкцию эскалатора.....	21
1.5.2 Усталость материала.....	26
1.5.3 Коррозия.....	28
1.6 Загрязнение поверхностей металлоконструкций эскалаторов.....	35
1.7 Анализ существующих подходов к исследованию коррозионных процессов.....	36
1.8 Выводы по главе. Основные задачи исследования.....	42
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОЙ КОРРОЗИИ НА СКОРОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ	44
2.1 Диагностика коррозионного состояния.....	44
2.2 Магнитный контроль основных элементов металлоконструкций эскалаторов	46
2.3 Вспомогательное оборудование машинных залов эскалаторов	50
2.4 Влияние аэрохимической среды на развитие коррозии.....	52
2.5 Структура слоя ржавчины	57
2.6 Кинетика и динамика атмосферной коррозии	60

2.7 Питтинговая коррозия.....	63
2.8 Зависимость химического состава сплавов и скорости атмосферной коррозии	66
2.9 Выводы по главе.....	67
ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ	69
3.1 Постановка целевой задачи и выбор объекта эксперимента.....	69
3.2 Модель описания основных параметров коррозионной поврежденности.....	70
3.3 Модель аэрохимического воздействия среды.....	72
3.4 Моделирование параметра адсорбционного понижения прочности материала.....	75
3.5 Моделирование процесса коррозии.....	77
3.6 Уточнение модели развития коррозионных дефектов с учетом локальных дефектов (питтингов).....	82
3.7 Определение особенностей влияния циклических нагрузок и коррозии.....	86
3.8 Учет временного фактора при оценке состояния металлоконструкций эскалаторов	90
3.9 Особенности моделирования при проведении оценки состояния отдельных узлов вспомогательного оборудования машинных залов эскалаторов	96
3.10 Риск-ориентированное моделирование.....	105
3.11 Выводы по главе.....	107
ГЛАВА 4 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ	109
4.1 Определение области практического применения.....	109
4.2 Оценка напряженно-деформированного состояния металлоконструкций эскалатора.....	111
4.3 Использование коэрцитиметра КРЦ-М-2.....	120

4.4	Обработка результатов измерений.....	123
4.5	Программное обеспечение для прогнозной оценки остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов	126
4.6	Рационализация испытаний на коррозионную стойкость низкоуглеродистых сталей или обследований элементов металлоконструкций эскалаторов	132
4.7	Выводы по главе.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		138
ПРИЛОЖЕНИЯ		151
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....		151
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....		155
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....		157

ВВЕДЕНИЕ

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 [99, 100, 101].

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 [20] 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 [77], 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 [66]. 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., Ватулина 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 замоноличенных 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 несущих 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 модули Simulation и Motion программной платформы SolidWorks.

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 в совокупности опубликовано 12 печатных работ, 4 из которых в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертационного исследования. Работа состоит из: введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 160 страниц, в том числе содержит 57 рисунков, 9 таблиц, 68 формул, 127 наименований литературы.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Общая характеристика проблем эксплуатации подъемно-транспортных машин

Технологичное использование подъемно-транспортных устройств стало широко распространенным явлением в различных сферах экономики. Основными причинами этого являются: существенное снижение физической нагрузки на человека, увеличение скорости производственных процессов и наличие потенциала для автоматизации систем управления этим оборудованием.

Эксплуатационная пригодность, последующая функциональность металлоконструкций, а также прогнозируемый остаточный ресурс зависят не только от их внутренних характеристик, но и от ряда внешних условий. Проявление дефектов и повреждений у металлоконструкций может обуславливаться как влиянием человеческого фактора, так и ограничением по доступности необходимых материалов или принятием тех или иных решений, связанных с преодолением технологических ограничений, при проектировании, изготовлении и монтаже отдельных конструктивных элементов. Дальнейшая динамика их развития определяется параметрами окружающей среды, включая ее коррозионную активность; эксплуатационными режимами, связанными с интенсификацией нагрузки и возможным выходом их за рамки штатных; качеством проводимых профилактических мероприятий, обслуживания и ремонтов.

По разным оценкам, общее количество используемого сегодня металла, представленного во всех формах и исполнениях, составляет около 6-ти миллиардов тонн. Это составляет примерно 35% процентов от совокупного количества, произведенного за последние 3000 лет. Коррозионные процессы рассматриваются в качестве основной причины, по которой металл безвозвратно выходит из употребления [41].

Процессы, инвариантные по скорости, но неуклонно ведущие к тому, что

критически важные элементы конструкций теряют свою целостность и первоначальные геометрические параметры сечений, определяются как коррозионные. Результатом становится рост значений напряжений, а также возникновение отдельных зон-концентраторов напряжений, что приводит к появлению и развитию многочисленных усталостных трещин. Коррозия по-прежнему остается актуальной и нерешенной проблемой на глобальном уровне.

Коррозия является природным процессом, ориентированным на поддержание баланса в окружающей среде. Этот процесс может запускаться в разнообразных условиях, начиная со сред слабой агрессивности и заканчивая сильноагрессивными средами. Ирреверсивный характер коррозии порождает множество технических задач, решение которых влияет на появление, ускорение или замедление развития данного процесса [118].

Применение самородного железа, являющегося термодинамически устойчивым сплавом железа с никелем (с массовой долей никеля от 3 до 80 %), могло бы стать решением коррозионной проблемы [38], однако его редкость и физико-механические свойства не позволяют использовать данный материал в промышленных масштабах.

Внешняя среда, являясь своего рода совокупностью факторов аэрохимической или метеорологической природы, не обладающих постоянством во времени и в составе, оказывает значительное влияние на комплекс параметров, характеризующих процесс коррозионного разрушения. Это объясняет актуальность и необходимость разработки математических моделей, описывающих процессы атмосферной коррозии, главной целью которых является расчет и прогнозирование потерь металлов с одновременной утратой их прочностных характеристик.

Металлические конструкции эскалаторов, как и любых других подъемно-транспортных машин, проектируются с учетом того, что они должны использоваться в пределах выполнения закона Гука (то есть в пределах упругих деформаций), где существует однозначная связь между значениями возникающих напряжений и проявляющейся деформацией [8]. Однако, согласно

исследованиям, на элементах металлоконструкций можно обнаружить зоны с локальными перегрузками, которые приводят к усталостным отказам с нелинейным упругопластическим и пластическим деформированием.

Современные технологии, основанные на реализации конечно-элементного моделирования на базе различных пакетных программных комплексов, позволяют с достаточной точностью определять напряженно-деформированное состояние узлов и элементов металлоконструкций.

Неразрушающий метод магнитного контроля, основанный на взаимосвязанности магнитных и физико-механических свойств ферромагнитных материалов, применительно к эскалаторам, позволяет фактически уточнять расположение наиболее нагруженных зон элементов несущих металлоконструкций, находящихся под действием распределенных во времени циклических нагрузок, определять уровень усталостных повреждений и пластической деформации, а также оценивать напряженно-деформированное состояние металла [59].

Своеобразным уникальным датчиком пикового значения силы в данном случае выступает структура ферромагнитного материала, а ряд иных контролируемых магнитных параметров, связанных с целостностью структуры металла, наглядно отображает силовые характеристики режимов работы несущей металлоконструкции.

Состояние металлоконструкции в данном случае является важнейшим звеном, так как выход из строя практически любого конструктивного элемента влечет за собой полную остановку подъемно-транспортной машины. Соответственно актуальным становится вопрос прогнозирования изменения состояния того или иного конструктивного элемента на основании имеющихся диагностических показателей.

1.2 Конструкции эскалаторного парка

Эскалаторы – это подъемно-транспортные устройства с замкнутым

контуром лестничного полотна для транспортирования людей с одного уровня на другой. Тоннельные и пролетные эскалаторы представляют собой одновременно и машину, и сооружение (рисунки 1.1, 1.2).

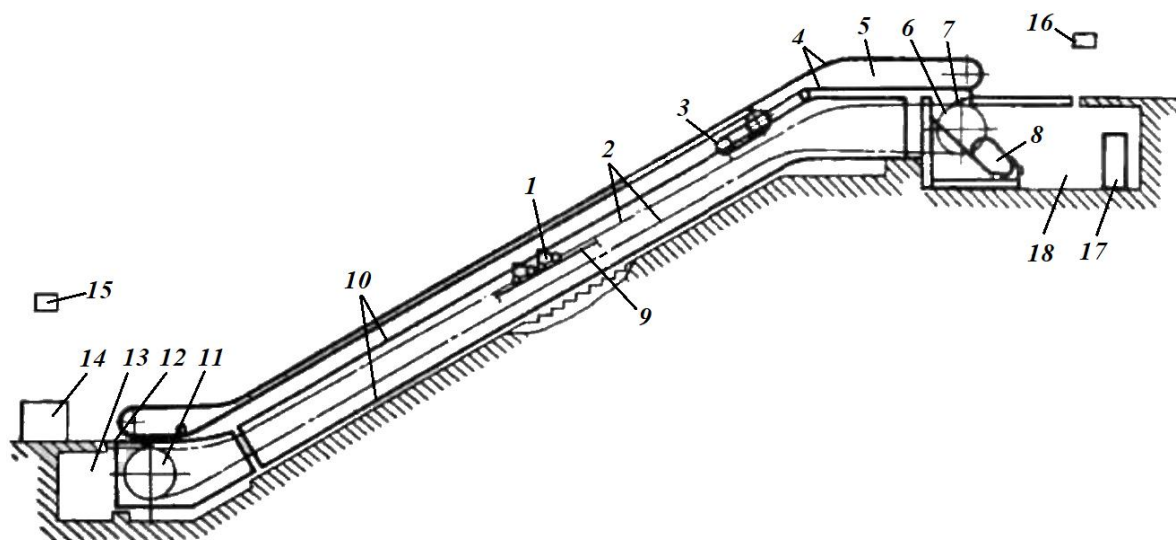


Рисунок 1.1 – Общая схема тоннельного эскалатора [73]:

- 1 – ступени; 2 – тяговые цепи; 3 – привод поручня; 4 – поручень; 5 – балюстрада;
 6 – тяговая звездочка; 7 – верхняя площадка; 8 – передаточный механизм и механизм привода; 9 – направляющие; 10 – металлоконструкции; 11 – натяжная звездочка;
 12 – нижняя площадка; 13 – натяжная камера; 14 – кабина оператора;
 15, 16 – пульта управления; 17 – шкафы управления; 18 – машинное помещение

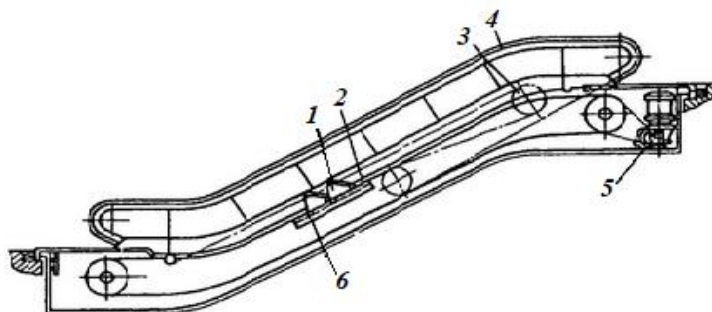


Рисунок 1.2 – Схема пролетного эскалатора [73]:

- 1 – ступени; 2 – тяговые цепи; 3 – привод поручней; 4 – поручневое устройство;
 5 – привод лестничного полотна; 6 – направляющие ходовых катков ступеней

Тоннельные эскалаторы обеспечивают перемещение пассажиров между уровнем вестибюля и уровнем платформы, например, станции. Хотя по сравнению с другими типами подъемного оборудования они отличаются повышенной пропускной способностью, однако эта способность все же ограничена. Пролетные эскалаторы предназначены для установки в открытых пространствах зданий, создавая связь между различными этажами или уровнями.

Металлоконструкция эскалаторов – это несущая основа, устанавливаемая на фундаменты тоннеля или перекрытия. Все металлоконструкции эскалаторов – сварные из профильного проката и листовой стали. Наиболее часто для металлоконструкций эскалаторов в России используется сталь СтЗсп или СтЗпс.

Металлоконструкция относится к ответственным узлам эскалатора. Сварка ее выполняется электродами высокого качества. Металлоконструкция должна быть прочной и жесткой.

Отдельные части металлоконструкции современных эскалаторов (зоны) поставляют в собранном виде с закрепленными на них узлами и деталями.

В отечественных эскалаторах применяют два типа металлоконструкции – коробчатую (эскалаторы серии ЭП) и стержневую (все остальные эскалаторы).

Коробчатая металлоконструкция представляет собой листовую коробчатую сварную конструкцию открытого типа с усиленными боковыми стенками, с днищем, с ребрами жесткости, поперечными связями и кронштейнами для установки оборудования. Коробчатая конструкция проста и долговечна, но более сложна при изготовлении. Все остальные отечественные эскалаторы имеют конструкцию, сваренную из уголков, швеллеров и другого профильного проката.

Металлоконструкция эскалаторов опирается на бетонные фундаменты (рисунок 1.3). Вдоль фундаментов укладывают балки-прогоны; по ним спускают фермы, на которых затем устанавливают зоны Б_н, Б и И. Металлоконструкцию зон А, В и Е или А, В, Д и Е_д крепят на фундаментных болтах. В состав зон удлиненного эскалатора включается зона Д с установкой на ней привода поручневого устройства, а зона Е заменяется на зону Е_д, отличающуюся от зоны Е отсутствием привода поручневого устройства. Блоки зон Б_н, Б и И соединяются между собой призонными болтами с контролируемым усилием затяжки.

Фермы эскалаторов ЭМ жестко соединены друг с другом и в собранном виде представляют собой единый металлический каркас. Фермы (зоны) эскалаторов ЛТ и ЭТ не соединяют жестко: они как бы расчленены на отдельные

участки, что позволяет им в некоторых пределах свободно изгибаться. Это имеет большое значение при осадках строительных конструкций.

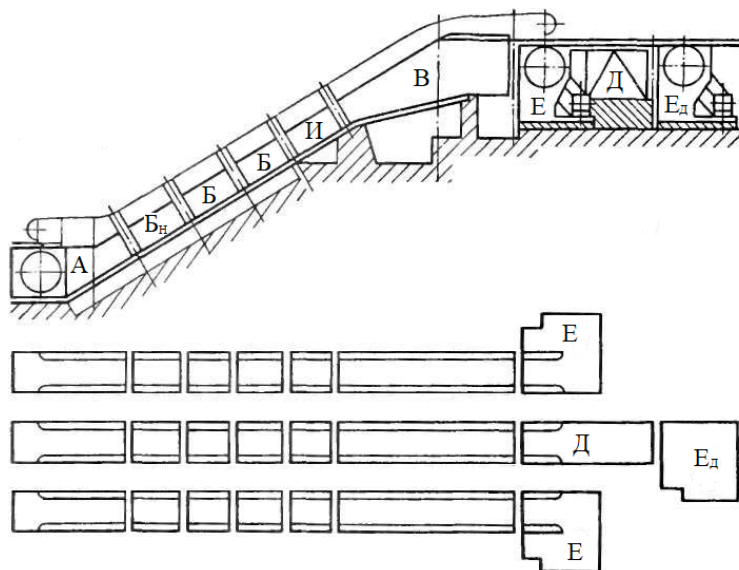


Рисунок 1.3 – Зоны тоннельных эскалаторов [73]

Фермы зон А, В и Е или А, В, Д и Е_д, испытывающие значительные усилия при работе или в случае обрыва двух тяговых цепей, выполняют более массивными и тяжелыми по сравнению с фермами зон Б и И.

На несущей металлоконструкции размещено все механическое оборудование эскалатора и часть электрооборудования. На основной металлоконструкции устанавливают кронштейны для крепления балюстрады, поручневое устройство, трубы для прокладки электропроводки, площадки обслуживания и другие части эскалатора [51, 70, 75].

В процессе эксплуатации несущие металлоконструкции эскалатора неизменно занимают свои ключевые позиции в общей структуре сооружения, пребывая на месте и выполняя свои функции на протяжении всего срока службы независимо от проводимых вариативных ремонтных мероприятий, включающих замену отработавших свой ресурс механизмов и агрегатов. Этот временной интервал подразделяется на две фазы: в течение нормативного срока службы и по истечении нормативного срока службы.

Превышение определенного в нормативно-технической документации срока службы означает то, что выход из строя любого конструктивного элемента несущей металлоконструкции эскалатора может стать критическим и повлечь за

собой не только собственно его остановку на период устранения поломки и приведения всех показателей к уровню нормативных, но и затруднить использование конкретного объекта, на котором используется эскалатор.

Именно этот факт обуславливает актуальность данного исследования и заставляет прежде всего обратить внимание на выявление качественных методов по прогнозной оценке величины остаточного ресурса несущих металлоконструкций эскалаторов, особенно эксплуатирующихся за пределами нормативного срока службы. Статистика возникших нарушений в работе эскалаторов [24] и ее анализ позволил идентифицировать конкретные конструктивные узлы и механизмы в общей функциональной системе эскалатора с наименьшей вероятностью безотказной работы (рисунок 1.4).

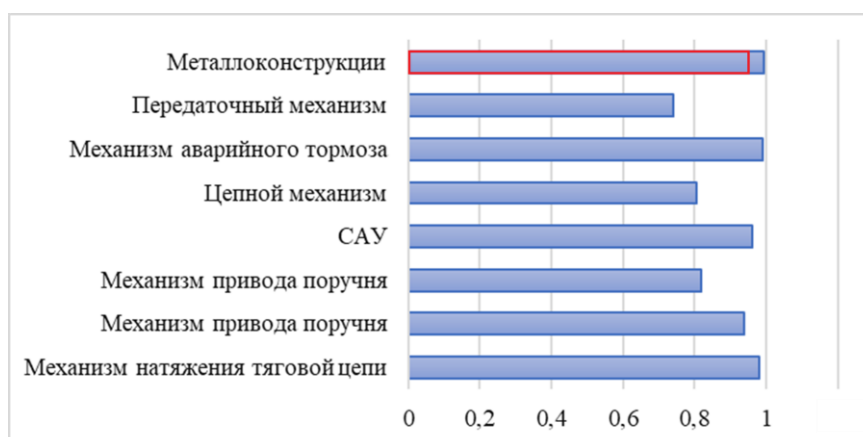


Рисунок 1.4 – Вероятность безотказной работы основных узлов и механизмов эскалатора

В ходе детального рассмотрения результатов обследований эскалаторов была обнаружена динамика снижения значения этой величины в пункте, касающемся несущих металлоконструкций (рисунок 1.4) на 5-7 %.

1.3 Определение направлений исследования

Актуальность данного исследования заключается в обеспечении необходимого уровня безопасности эксплуатации эскалаторов посредством превентивного влияния на состояние их металлоконструкций при эксплуатации посредством прогнозной оценки их остаточного ресурса. Основной целевой

задачей является определение и анализ факторов, влияющих на изменение состояния несущих металлоконструкций эскалаторов, выявление возможных неисправностей, возникновение которых в их взаимосвязи может привести к отклонению контролируемых показателей от указанных в нормативно-технической документации.

Определение факторов, возникающих дефектов и неисправностей возможно только при условии конкретного понимания протекающих процессов и формировании комплекса диагностических признаков.

Математическое моделирование в данном случае – это наиболее предпочтительный метод для определения и создания устойчивых зависимостей. Первоочередными критериями, на которые следует обратить внимание при разработке модели, являются выделение свойств или показателей в исследуемых процессах, определение явлений и их компонентов, способных каким-либо значимым образом охарактеризовать выделенные свойства или показатели, их описание. Следует также помнить, что исследуемый объект является плохо организованной системой с недостаточным уровнем изученности причинно-следственных отношений и отсутствием детерминированности между отдельными процессами и явлениями [4, 40, 46, 65].

Для повышения достоверности крайне важно произвести тщательный отбор внешних и внутренних факторов в их совокупном влиянии на физико-механические характеристики материала.

1.4 Нормативная база допуска к эксплуатации и проведения экспертизы промышленной безопасности эскалаторов

Комплекс обязательных требований к техническим устройствам, к которым относят также эскалаторы, закреплён в законодательстве Российской Федерации [20, 99, 100, 101]. Оно также определяет процедуры оценки их соответствия этим требованиям и устанавливает правила для проведения испытаний этих устройств.

Эксплуатационный цикл эскалаторов в современных реалиях включает два этапа: в пределах нормативного срока службы и за пределами нормативного срока службы.

Когда техническое регулирование не предписывает альтернативный подход к подтверждению соответствия эскалаторов, обязательной процедурой перед их запуском на опасных производственных объектах становится экспертиза промышленной безопасности. Во время эксплуатации критически важно строго следовать инструкциям, указанным в руководстве по эксплуатации. Сохранение функциональности и безопасности эксплуатации эскалаторов требует строгого выполнения ряда мероприятий, к которым относится не только проведение плановых технических осмотров, профилактических работ и ремонтов, предусмотренных техническими регламентами, но и строгое придерживание календарных сроков между их проведением. Эти действия коллективно обеспечивают стабильную и безаварийную работу эскалаторов.

По истечении срока службы или при превышении количества циклов нагрузки эскалатора, установленных организацией-изготовителем, проводится очередная экспертиза промышленной безопасности, при которой определяется степень соответствия эскалатора критериям предельных состояний, вырабатывается комплекс мероприятий по повышению уровня безопасности эскалатора или принимается решение о выводе его из эксплуатации [20, 84, 95, 100, 101].

Кроме того, экспертиза промышленной безопасности может проводиться еще в двух случаях [20, 101]: если в технической документации отсутствуют данные о сроке службы эскалатора, и его фактический срок службы превысил двадцать лет, а также после проведения работ, связанных с изменением конструкции, заменой материала несущих элементов эскалатора или восстановительного ремонта после аварии, в результате которого был поврежден эскалатор.

1.5 Исследование влияния условий эксплуатации на состояние несущих металлоконструкций эскалаторов

Поддержание соответствия значений всех параметров механизмов, входящих в общую конструкцию эскалатора и монтируемых на несущую металлоконструкцию, указанным в нормативной документации, а также состояния непосредственно самой несущей металлоконструкции, возможное диагностирование этих значений и прогнозирование динамики их изменения, достигается посредством регулярного мониторинга технического состояния, включающего в себя диагностику оборудования с применением специализированных математических моделей, настроенных на учет уникальных условий, в которых эскалаторы выполняют свои функции.

Выделение и рассмотрение ключевых проблем, разработка специализированных методов и методик, направленных на исследование и контроль технического состояния, а также на оценку остаточного ресурса грузоподъёмных машин, в том числе эскалаторов, осуществлялись в работах: Бардышева О.А., Бортякова Д.Е., Ватулина Я.С., Коровина С.К., Попова В.А., Сладковой Л.А., Семенкова И.И., Уралова В.Л., Филина А.Н., Шафороста А.Н. [2, 3, 63, 72, 103, 110, 111]; 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. [41, 42, 47, 58, 73, 78, 86] и др. В то же время, вопросы повышения надёжности опорных металлоконструкций эскалаторов в связи с их коррозионной повреждаемостью достаточного развития не получили.

1.5.1 Нагрузки, действующие на металлоконструкцию эскалатора

Эскалаторы – подъемно-транспортные машины непрерывного действия также выполняют функцию сооружения, поскольку непосредственно связаны с

эскалаторным тоннелем (наклоном) или перекрытиями зданий или сооружений, обеспечивая межуровневую связь.

На основе общего принципа работы эскалаторов все механизмы устанавливаются на несущую металлоконструкцию, которая в конечном итоге будет подвергаться динамическим и статическим нагрузкам. Передающаяся на металлоконструкцию результирующая нагрузка складывается из значительного количества составляющих, имеющих различную природу происхождения.

Рассматривая, например, тяговые цепи эскалатора как систему с распределенными параметрами [12, 60], можно выделить существенное влияние динамических характеристик тягового органа на колебательные процессы.

Режим работы несущих элементов металлоконструкций эскалаторов определяется циклическими нагрузками на растяжение-сжатие и изгиб. Возбуждение динамических нагрузок происходит за счет непосредственного контакта приводных звездочек с тяговыми цепями, при этом их движение имеет неравномерный характер.

Неравномерность в данном случае обусловлена тем, что цепь состоит из отдельных звеньев и располагается на звездочке не по окружности, а по многоугольнику, вследствие чего возникает колебательный процесс, при котором мгновенный радиус набегания цепи на приводную звездочку начинает изменяться от значения R до $R \cdot \cos(\alpha_0/2)$, где R – радиус звездочки по начальной окружности, м; α_0 – центральный угол звездочки, соответствующий шагу цепи (рисунок 1.5).

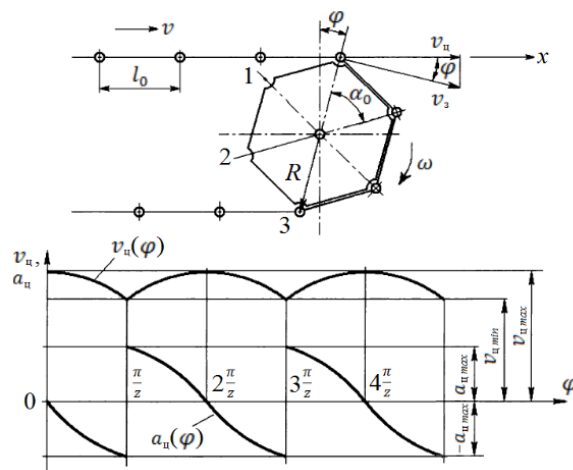


Рисунок 1.5 – Кинематика цепного привода

Проекция скорости цепи на горизонтальную ось x при постоянном значении угловой скорости приводной звездочки ω [51]

$$v_{\text{ц}} = \omega \cdot R \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где $\varphi = \omega \cdot t$ – угловое перемещение цепи, рад;

t – текущее значение времени, с.

Возникновение поперечных колебаний ветвей тяговой цепи связано с определенным интервалом значений скоростей. При вхождении в контакт шарнира с зубом, вертикальные составляющие их скоростей направлены навстречу друг другу, это означает, что соприкосновение шарнира и зуба сопровождается ударом, из последовательности которых складывается шум передачи.

Число ударов цепи в секунду при набегании ее на зубья звездочек и сбегании с них определяется следующим образом

$$w = \frac{4 \cdot z \cdot n}{60 \cdot f} \leq [w], \quad (2)$$

где n – частота вращения звездочки, мин^{-1} ;

z – число зубьев;

f – число звеньев цепи;

$[w] = 508/l_0$ – допускаемое значение числа ударов;

l_0 – шаг цепи, мм.

Ускорение цепи

$$a_{\text{ц}} = \frac{dv_{\text{ц}}}{dt} = -\omega^2 \cdot R \cdot \sin \omega t \quad (3)$$

приобретает максимальное значение при угле поворота $\frac{\alpha_0}{2} = \frac{\pi}{z}$

$$|a_{\text{ц} \max}| = \omega^2 \cdot R \cdot \sin \frac{\alpha_0}{2} = \omega^2 \cdot R \cdot \frac{l_0}{2 \cdot R} = \frac{\omega^2 \cdot l_0}{2}. \quad (4)$$

Выразив приближенно длину начальной окружности звездочки через число зубьев z , $2 \cdot \pi \cdot R \approx z \cdot l_0$, получим

$$\omega = \frac{v_{\text{ц}}}{R} = \frac{2 \cdot \pi \cdot v_{\text{ц}}}{z \cdot l_0} \quad (5)$$

и, следовательно,

$$a_{ц max} = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{v_{ц}^2}{z^2 \cdot l_0} = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{v_{ц}^2 \cdot l_0}{D_0^2}. \quad (6)$$

где D_0 – диаметр начальной окружности звездочки, м.

Так как ускорение мгновенно изменяется от $-a_{ц max}$ до $+a_{ц max}$, то инерционная сила от ускорения равна $2 \cdot m \cdot a_{ц max}$, где m – приведенная масса движущихся частей лестничного полотна и перемещаемого количества пассажиров. Поскольку сила прикладывается мгновенно, производя удар, то динамическая нагрузка на цепь, а соответственно, и на конструктивные элементы несущих металлоконструкций составит $4 \cdot m \cdot a_{ц max}$. Если учесть инерционную силу, направление которой противоположно направлению ускорения $-a_{ц max}$ в момент замедления, то расчетная динамическая нагрузка составит

$$S_d = 4 \cdot m \cdot a_{ц max} - m \cdot a_{ц max} = 3 \cdot m \cdot a_{ц max}. \quad (7)$$

Приведенная масса для пассажирского эскалатора

$$m = \frac{(c' \cdot q_0 + q_{гр}) \cdot L}{g}, \quad (8)$$

где L – длина эскалатора, м;

c' – коэффициент, учитывающий уменьшение приведенной массы движущихся частей эскалатора,

$$c' = 2 \text{ при } L < 25 \text{ м};$$

$$c' = 1,5 \text{ при } L = 25 \dots 60 \text{ м};$$

$$c' = 1,0 \text{ при } L > 60 \text{ м};$$

g – ускорение свободного падения, м/с²;

q_0 – погонная нагрузка ходовой части, Н/м;

$q_{гр}$ – эксплуатационная нагрузка нагруженной ветви эскалатора, Н/м.

Подставив значения $a_{ц max}$ и m , получим

$$S_d = \frac{6 \cdot \pi^2 \cdot (c' \cdot q_0 + q_{гр}) \cdot L \cdot v_{ц}^2}{g \cdot z^2 \cdot l_0}. \quad (9)$$

То есть, основной причиной, которая влияет на формирование циклов нагружения в конструкции эскалатора, является неравномерное перемещение тяговых элементов. В итоге, при возрастании скорости движения, то есть при

наличии ускорения, в металлоконструкции появляются повышенные динамические нагрузки. Эти нагрузки оказывают значительное влияние, усиливая продольные силы, действующие на тяговые элементы системы. Кроме того, повторяющиеся динамические воздействия способствуют формированию усталостных процессов в конструктивных компонентах эскалатора, что может привести к их преждевременному износу и потребности в ремонте или замене.

Данные, полученные в ходе экспериментов, помогли установить, что влияние длины эскалатора, жесткости цепи и скорости распространения по ней упругой волны не оказывают существенного влияния на процесс циклического нагружения металлоконструкции [54, 59]. Число разгонов и торможений тягового элемента эскалатора и связанных с ним циклических нагружений металлоконструкции по сравнению с числом периодов неравномерности движения цепей мало. Поэтому основным фактором, влияющим на циклы нагружения металлоконструкции эскалатора является длительность периодов неравномерности движения цепей. Длительность периодов неравномерности движения цепей эскалатора равна времени поворота приводной звездочки на центральный угол, соответствующий одному звену цепи:

$$\tau = \frac{S}{v}, \quad (10)$$

где S – шаг звеньев цепи эскалатора, м;

v – установившаяся скорость лестничного полотна в м/с.

В отечественном эскалаторостроении приняты следующие длины шага звеньев цепей: 0,200; 0,135; 0,133 и 0,100 м.

Тогда общее число циклов нагружения металлоконструкции эскалатора на момент проведения магнитного контроля:

$$N = \left(\frac{T}{\tau}\right) K_{\text{пр}}, \quad (11)$$

где T – срок службы эскалатора, час;

$K_{\text{пр}}$ – коэффициент учета конструктивных и эксплуатационных особенностей эскалатора.

$$T = \frac{P_3}{v}, \quad (12)$$

где $P_э$ – пробег эскалатора на данный момент времени, м.

$$K_{пр} = K_k \cdot K_{дв} \cdot K_{п} \cdot K_c \quad (13)$$

где K_k – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности эскалаторов ($K_k = 1,1$ для эскалаторов ЛТ-5, ЭМ-1М; $K_k = 1,0$ для эскалаторов серии И, ЭМ, Е, ЛТ; $K_k = 0,9$ для эскалаторов серии ЭТ-М; $K_k = 0,8$ для эскалаторов серии ЭТ, ЛП, ЭП);

$K_{дв}$ – коэффициент, учитывающий направление движения эскалатора ($K_{дв} = 1,1$ для подъемных эскалаторов; $K_{дв} = 1,0$ для реверсивных эскалаторов; $K_{дв} = 0,9$ для служебных эскалаторов);

$K_{п}$ – коэффициент, учитывающий пассажиропоток ($K_{п} = 1,1$ для пассажиропотока на эскалатор менее 30 тыс. пас./сутки; $K_{п} = 1,0$ для пассажиропотока от 30 до 80 тыс. пас./сутки; $K_{п} = 0,9$ для пассажиропотока более 80 тыс. пас./сутки);

K_c – коэффициент скорости эскалатора ($K_c = 1,2$ при скорости менее 0,6 м/с; $K_c = 1,1$ при скорости от 0,6 до 0,75 м/с; $K_c = 1,0$ при скорости 0,75 м/с).

Вибрации механизмов работающего эскалатора передаются на несущую металлоконструкцию при жестком контакте. Они складываются из множества составляющих различного происхождения, чье появление обуславливается наличием разных источников колебательных сил с разной природой и свойствами [23, 69, 90].

В данной работе не рассматривается возможное нагружение несущих металлоконструкций эскалаторов, которое может возникнуть при нарушении целостности строительных конструкций по разного рода геологическим и техногенным причинам.

1.5.2 Усталость материала

Эскалатор представляет собой сложную систему, где каждая деталь взаимодействует с другими в непрерывном процессе работы. Несущие металлические конструкции эскалаторов подвержены периодически

меняющимся нагрузкам в отношении циклически изменяющегося положения составных частей, а также изменений в величине и направлении действующих нагрузок. Это циклическое воздействие создает условия для возникновения усталостных процессов и может приводить к отказам конструктивных элементов даже при напряжениях значительно меньших, чем предел текучести или предел прочности [60, 61].

Механизм усталостного разрушения материалов, который часто начинается с формирования и распространения трещин, тесно связан с их внутренней неоднородностью. Такая неоднородность определяется различием в форме и размерах зерен металла, их расположением относительно друг друга, а также присутствием в материале посторонних включений вроде шлака и иных примесей. Кроме того, дефекты в структуре кристаллической решетки и поверхностные повреждения, например, царапины или следы коррозии, также могут вносить свой вклад в процесс усталостного разрушения (рисунок 1.6).

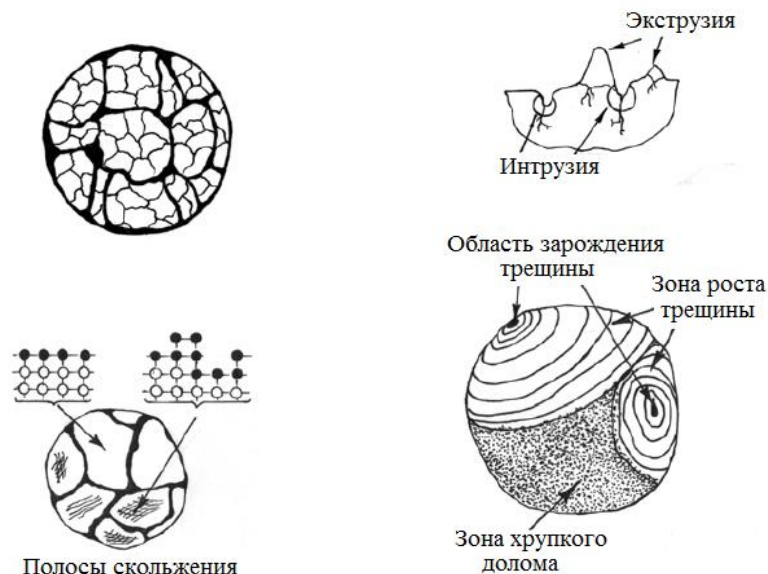


Рисунок 1.6 – Усталостное разрушение металлов

Под воздействием переменных напряжений, особенно в местах с неоднородностями материала, такими как границы отдельных включений, микроскопические пустоты и дефекты, возникают зоны концентрации напряжений. Это приводит к микроскопическим сдвиговым деформациям зерен металла, что воспринимается на их поверхности в виде полос скольжения. Со

временем, эти деформации накапливаются, в некоторых материалах это может проявиться в виде микроскопических выпуклостей и впадин, называемых экструзиями и интрузиями. Эти изменения в структуре могут переходить в микротрещины, которые в процессе начинают расти и сливаться.

На заключительном этапе этого процесса формируются одна или несколько макротрещин, которые быстро увеличиваются в размерах. В зоне роста трещины, из-за фрикционного взаимодействия берегов трещины, возникающего при изменении нагрузок, формируется отполированная поверхность. Рост трещины приводит к постепенному ослаблению поперечного сечения детали и, в конечном итоге, к ее внезапному хрупкому разрушению. Зона такого разрушения обычно обладает грубой зернистой структурой, что характерно для хрупкого обрыва.

1.5.3 Коррозия

Использование определенных материалов и типов металлопроката при создании несущих конструкций эскалаторов может стать причиной их предрасположенности к коррозии с самых ранних стадий эксплуатации. Действительно, стремление к снижению затрат за счет упрощения конструкций порой способствует появлению значительных проблем. Такие проблемы непосредственно связаны с конфигурацией выбранных изделий, расположением поверхностей элементов, а также существованием узких зазоров, труднодоступных участков и закрытых пустот, которые могут способствовать накоплению влаги и, как следствие, ускорению коррозионных процессов [91, 113].

Коррозия металлов, согласно определению ГОСТ 9.106-2021 «Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозия металлов. Термины и определения», представляет собой процесс, при котором металлы постепенно разрушаются через химическое и электрохимическое взаимодействие с окружающей их агрессивной средой. При этом, стандарт ГОСТ Р 51693-2000 «Грунтовки антикоррозионные. Общие технические условия» расширяет данное

понимание, подчеркивая, что коррозия может негативно сказаться на работоспособности металла, окружающей его среды и даже на всей технической системе, которая включает данный металл, поскольку она изменяет его первоначальные свойства [42, 65, 76, 87, 88].

Дуалистичная система (коррозионная система), образуемая собственно металлом и окружающей коррозионно-активной гетерогенной по составу средой, включает протекание процесса коррозии. Количество вступающих в реакцию с металлом веществ определяется составом среды.

Коррозионный эффект означает изменения, которые происходят в результате коррозии и наблюдаются в любом сегменте рассматриваемой дуалистичной коррозионной системы. Разрушающее воздействие коррозии или «коррозионное повреждение» – это постепенное изменение характеристик и параметров, относящихся к металлу, защитным покрытиям, окружающей среде или их интеракции, которое приводит к ухудшению выделенных показателей качества и функциональности в результате коррозионного эффекта.

Кроме того, снижение показателей физико-механических свойств металла, проявляемое чаще всего в виде снижения кратковременной и усталостной прочности и пластификации приповерхностных слоев, может быть связано с эффектом Ребиндера, основой которого является разрыв или перестройка межатомных связей твердых тел при участии поверхностно-активных компонентов внешней среды или при механической нагрузке.

Продукты коррозии представляют собой новые химические соединения, сформированные из солей и оксидов, которые образуются в ходе коррозионного процесса металлов. В случае атмосферной коррозии, видимые ее результаты, такие как ржавчина или окалина, образуются главным образом из гидратированных оксидов железа [49, 106].

Коррозионные потери – это количественное выражение уменьшения объема, массы или иного выделенного показателя металла за счет его преобразования в коррозионные продукты за определенный период времени.

Коррозионная стойкость – способность материала противостоять коррозии, зависящая от его химического состава и рассматриваемая как один из важнейших критериев оценки качества материала.

Факторы, определяющие скорость и характеристики коррозии, делятся на две группы. Внутренние факторы связаны с самой природой металла, включая его состав, микроструктуру, внутренние напряжения и состояние его поверхности. Внешние факторы обусловлены воздействием окружающей среды, в том числе температурой, влажностью, составом и циркуляцией воздуха, а также давлением.

На сегодняшний день теоретические основы коррозии и защиты металлов достаточно широко освещены в трудах отечественных и зарубежных ученых, в частности Томашовым Н.Д., Скорчеллетти В.В., Жуковым А.П., Колотыркиным Я.М, Малаховым А.И., Карпенко Г.В. [39, 47, 88, 96] и др.

Коррозия металлов по своей сути отражает стремление природы к достижению энтропийного равновесия. Этот процесс, хотя и ведет к видимой деградации материала, на самом деле представляет собой перераспределение энергии посредством окислительно-восстановительных реакций. В результате эти термодинамически неустойчивые соединения преобразуются в их более стабильный продукт – ржавчину, что, с точки зрения термодинамики, является более выгодным и равновесным состоянием.

Коррозия металлов может быть разделена на две основные категории: химическая и электрохимическая, что зависит от механизма их взаимодействия с окружающей средой.

В случае химической коррозии, процесс описывается как деградация металла вследствие прямых химических реакций, происходящих на поверхности контакта с окружающей средой, особенно при повышенных температурах. Эта среда может содержать газы или пары, такие как кислород, сероводород (H_2S), углекислый газ (CO_2) и двуокись серы (SO_2), при этом могут фиксироваться и реакции с расплавами металлов.

Электрохимическая коррозия металлов происходит в электролитических средах, содержащих кислоты, соли и щелочи, независимо от их агрегатного состояния – будь то растворенные в воде или расплавленные. Этот тип коррозии также может быть стимулирован наличием влажных сред и газов. Основой процесса является генерация электрического тока, который проходит между различными зонами на металлической поверхности, называемыми анодными и катодными областями, ускоряющего процесс разрушения (рисунок 1.7).

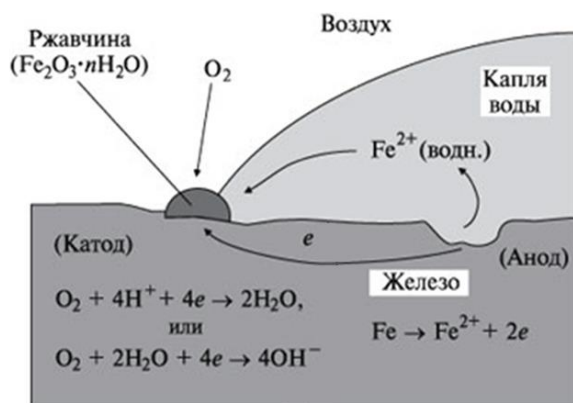
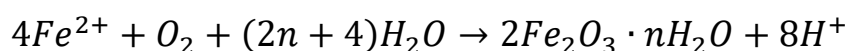


Рисунок 1.7 – Схема коррозионных процессов на железе с кислородной деполяризацией

Когда кислород поступает к металлической поверхности неоднородно, это приводит к образованию гальванической пары. Разделение на анодные и катодные участки обусловлено степенью взаимодействия (адсорбции) кислорода с металлом: зоны с более высокой адсорбцией кислорода превращаются в катоды, тогда как участки с низкой адсорбцией становятся анодами. Дополнительно, из-за формы водяной капли на поверхности – сплюсненной сферической – формируется кольцевая катодная зона по периферии капли, и анодная зона в центре под ней. Это пространственное разделение способствует локализованной коррозии, при которой центральная часть под каплей корродирует быстрее по сравнению с краями. [49, 105].

Общая реакция образования ржавчины принимает вид



Когда механические напряжения играют ключевую роль в процессе коррозии, возникает явление известное как механическая коррозия. Основные ее формы можно классифицировать следующим образом:

– коррозия под напряжением: такой процесс разрушения металла в агрессивной коррозионной среде происходит при одновременном приложении к нему механических напряжений.

– интеркристаллическая коррозия: этот процесс сопровождается образованием и распространением трещин по границам зерен в структуре металла при воздействии механических напряжений в сочетании с коррозией.

Специфика характерных повреждений, возникающих в результате коррозии, позволяет выделить некоторые отдельные виды:

– фреттинг-коррозия: данный вид коррозии возникает в результате вибрационных процессов соприкасающихся поверхностей или циклическом перемещении их относительно друг друга в коррозионной среде, что приводит к истиранию металла.

– коррозия при трения (эрозия): этот вид поражения металла происходит из-за трения, которое усугубляется коррозионными процессами.

– контактная коррозия: данный процесс становится осуществимым при взаимодействии двух различных металлов в коррозионной среде, при этом каждый из них имеет свой электрохимический потенциал.

Исходя из области поражения можно выделить следующие разновидности:

– локальная (местная) коррозия: такой процесс характеризуется нанесением ущерба определенным, локализованным участкам поверхности металла.

– универсальная (сплошная) коррозия: этот процесс сопровождается обширным и равномерным поражением поверхности, зачастую ведущим к одинаковой степени износа по всей затронутой области

На металлических элементах, составляющих общую несущую конструкцию эскалаторов, можно также наблюдать и такие коррозионные проявления, как послойная коррозия, обусловленная пластическими деформациями, которым может подвергаться металл в ходе эксплуатации, так и структурная коррозия, связанная с неоднородностью структуры металла.

Многообразие условий и режимов функционирования отдельных конструктивных элементов затрудняет однозначное определение типа или вида коррозии, несущего для них наибольшую угрозу. Влияние интеркристаллической коррозии и коррозионного растрескивания стоит рассматривать в контексте критических для силовых элементов конструкций, поскольку именно они наиболее уязвимы при этих типах коррозий. Отдельные структурные компоненты, которые в процессе эксплуатации регулярно испытывают воздействие трения и деформаций, например, при прокатывании, особенно уязвимы перед сплошной коррозией, способной нарушить их целостность и функциональность. Помимо самого коррозионного процесса, не менее значимый вред может нанести и шлам – осадок продуктов коррозии, который способен загрязнять поверхности и приводить к их дополнительному износу. Следовательно, риск коррозионного повреждения подчиняется специфике использования и требованиям к прочности материала в каждом индивидуальном использовании.

Типичные повреждения металлоконструкций эскалаторов представлены на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Коррозионные повреждения:
а – узел соединения горизонтальной и наклонной зон в зоне А снизу;
б – нижняя часть металлоконструкции в зоне Б;
в – опорный элемент и болтовое соединение в зоне А

О протекании коррозионного процесса можно судить по следующему ряду приведенных ниже показателей.

Скорость коррозии на практике чаще всего определяется как средняя интегральная скорость процесса за время τ , то есть $\Delta y / \Delta \tau$, где y – интегральный показатель коррозии [41, 68, 80].

Глубинный показатель δ_n представляет собой фактическую величину распространения коррозионного воздействия вглубь металла или значение толщины образующейся на металле пленки продуктов коррозии, отнесенные к определенному промежутку времени (например, мм/год).

Массовый показатель $K_m^\pm$ характеризует изменение массы Δm образца металла в результате коррозии, отнесенное к единице поверхности металла S и к единице времени τ (например, г/(м²·ч)):

$$K_m^\pm = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau} . \quad (14)$$

В некоторых случаях, например, металлы имеют различную плотность [25], тогда необходим перерасчет от показателя изменения массы $K_m^\pm$ (г/(м²·ч)) к глубинному показателю δ_n коррозии, что позволяет учесть различия в плотности материалов и наглядно отображает реальную картину повреждений, не зависящую от массы металла

$$\delta_n = \frac{K_m^\pm \cdot 8.76}{\rho_{Me}} , \quad (15)$$

где ρ_{Me} , – плотность металла, г/см³;

8.76 – коэффициент перехода от измерения массового показателя скорости коррозии в расчете на 1 ч к глубинному показателю в расчете на 1 год [5].

В зависимости от формы проявления, скорость механической коррозии может быть измерена с помощью механического показателя коррозии, который обычно измеряется в %. Например, механический показатель K_σ по потере прочности [5, 39]:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0} \cdot 100\% , \quad (16)$$

где σ_0 – предел прочности до коррозии;

σ_1 – предел прочности после коррозии, рассчитанный по отношению к первоначальной площади сечения металлического образца.

Обобщение опыта, приобретенного в ходе наблюдений за техническим состоянием и обследований несущих металлоконструкций эскалаторов, привело к следующим выводам: их предельное состояние достигается значительно позже, чем предполагается в соответствии с установленными стандартами и техническими регламентами, однако обнаруживаются и такие инциденты, когда отдельные компоненты металлических конструкций выходили из строя преждевременно, не достигнув даже обозначенного нормативного срока службы.

1.6 Загрязнение поверхностей металлоконструкций эскалаторов

На качество и длительность эксплуатации подъемно-транспортных машин, в том числе и эскалаторов, оказывает непосредственное влияние наличие загрязнений на различных поверхностях. В общем случае, все виды загрязнений разделяются на три основные категории [44]:

– к первой категории относятся коррозионные продукты, которые содержат в себе оксиды и соли. Эти вещества, как правило, представляют собой твердые включения. Их устранение зачастую бывает сложной задачей, поскольку они плохо растворимы в водной среде, а также в щелочных и большинстве органических растворителей. Заметно лучше они растворяются в кислотных растворах и могут в определенных ситуациях формировать плотные отложения на поверхности металла.

– во вторую категорию входят жировые и масляные загрязнения, а также эмульсии и прочие вещества, возникающие в ходе эксплуатации или оставшиеся после обработок металла, таких как штамповка и прокатка, где они используются в качестве смазки.

– к третьей категории относится фазное загрязнение случайного характера, включающее неорганическую и органическую пыль различных размеров, металлические частицы, а также химически активные вещества, в

числе которых моющие субстанции. Эти типы загрязнений легче всего удалять из доступных мест с применением технических средств, таких как щетки, водяные струи или ультразвуковые устройства. Однако в труднодоступных участках они могут скапливаться, ухудшая эксплуатационные характеристики и сокращая срок службы металлоконструкций.

Осознание специфики этих типов загрязнений имеет важное значение для разработки эффективных методов их устранения и повышения долговечности металлических конструкций.

Немаловажную роль в данном случае играет подготовка и очистка поверхности при проведении ремонтно-восстановительных и покрасочных работ, а также работ в рамках текущего обслуживания, поскольку вносимые при их проведении загрязнения могут дать дефекты, исправление которых при дальнейшей эксплуатации весьма затруднительно [10, 13, 18, 62].

Разнообразная природа загрязнений поверхности приводит к необходимости выполнять различные операции очистки с применением специфических очищающих средств и без них в определенной последовательности. Уборке и очистке всех конструктивных элементов эскалаторов следует уделять особое внимание, исходя из того, что это общая гигиена, безопасность работников и пассажиров, а также увеличение сроков эксплуатации.

1.7 Анализ существующих подходов к исследованию коррозионных процессов

При разработке моделей, назначение которых заключается в анализе влияния агрессивных сред на металлоконструкции, следует учитывать множество важных аспектов, определяющих итоговое поведение и долговечность конструкции. Исходя из особенностей моделирования, все основные подходы к построению математических моделей в данной области можно классифицировать на четыре ключевые категории [71, 73, 109, 114]:

1. Модели с одно-однозначными причинно-следственными связями. Примером может быть ситуация, когда изменение глубины коррозионных повреждений δ коррелирует исключительно с временем τ .

$$\delta = f(\tau). \quad (16)$$

2. Модели с много-однозначными причинно-следственными связями, учитывающие несколько переменных. Например, глубина коррозионных повреждений δ может зависеть одновременно от времени τ пребывания в агрессивной среде, ее температуры T и концентрации агрессивных агентов C .

$$\delta = f(\tau, T, C). \quad (17)$$

3. Модели с одно-многозначными причинно-следственными связями, исходящие из предпосылки, что один какой-либо фактор или переменная может оказать влияние на множественные аспекты или изменения в рамках анализируемой системы.

4. Сложные модели с много-многозначными причинно-следственными связями, основывающиеся на комбинации предыдущих моделей предыдущих категорий и учитывающие широкое взаимодействие влияющих параметров.

Центральным аспектом в создании модели становится внедрение принципа обратной связи, который позволяет моделям адаптироваться и точнее отображать динамику процессов коррозии. Например, модельное уравнение

$$\delta = f[\tau, \sigma(\delta)], \quad (18)$$

показывает взаимосвязь между глубиной коррозионных повреждений δ , временем τ и напряжениями σ , действующими в элементе конструкции. Это дает представление о том, как со временем меняется сечение элемента и как это влияет на уровень напряжений и, соответственно, на коррозионную стойкость конструкций. Рост напряжений в материале может вести к усилению коррозионного разрушения, что, в свою очередь, создает циклическую систему взаимосвязей, так как сама коррозия усиливает напряжения путем уменьшения поперечного сечения элемента.

К практике создания математических моделей, описывающих коррозионные процессы, существует два подхода [35].

Первый подход к оценке и прогнозу коррозионного износа металла базируется на использовании эмпирических формул. Эти формулы разрабатываются на основе анализа данных, собранных во время контролируемых экспериментов в лабораторных условиях. Применение регрессионного анализа позволяет выявить закономерности и связи между различными переменными и уровнем коррозионных повреждений. При этом подходе становится возможным определение вероятных потерь металла из-за коррозии с опорой на конкретные условия, под которыми были проведены испытания.

Один из самых ранних подходов к моделированию процессов коррозии был предложен в форме закона Фарадея, ставшего отправной точкой в этой области исследований. Согласно этой модели, коррозионные потери металла G прямо пропорциональны продолжительности процесса τ и силе тока i , проходящего через металл, а электрохимический эквивалент α служит масштабирующим коэффициентом этой связи:

$$G = \alpha i \tau, \quad (19)$$

где G – измеряемая коррозионная потеря металла по весу;

α – электрохимический эквивалент, значение которого устанавливается на основе экспериментальных данных;

i – сила тока, вызывающего протекание коррозионного процесса;

τ – промежуток времени, в течение которого протекает коррозия.

Модель (19) может быть признана базовой, поскольку она прямо ссылается на электрохимическое поведение коррозии, особенно в атмосферных условиях. Однако данная модель не отражает комплексную кинетику процессов коррозии, поскольку многие дополнительные факторы, влияющие на разрушение металла, такие как температура, влажность, наличие агрессивных веществ, в ней не учтены.

В ответ на потребность в более сложном моделировании, которое позволило бы учитывать присутствие коррозионно-активных веществ и климатические условия, были разработаны новые математические модели. Они

включают в себя следующие системы уравнений, иллюстрирующих зависимость коррозионных потерь металла G от различных факторов:

1. Учет содержания в окружающей среде сернистого ангидрида (SO_2) и времени увлажнения T_ϕ :

$$G = K_1 + K_2[SO_2] + K_3[T_\phi], \quad (20)$$

2. Учет содержания в окружающей среде хлоридов (Cl) и времени увлажнения T_ϕ :

$$G = K_1 + K_2[Cl] + K_3[T_\phi], \quad (21)$$

3. Комплексная модель, включающая содержание сернистого ангидрида (SO_2), хлоридов (Cl) в окружающей среде и время увлажнения T_ϕ :

$$G = K_1 + K_2[SO_2] + K_3[Cl] + K_4[T_\phi]. \quad (22)$$

где K_1 , K_2 , K_3 и K_4 – постоянные коэффициенты;

Данные системы уравнений обеспечивают возможность более детализированного анализа коррозионного процесса, учитывая влияние основных агрессивных компонентов и физических условий окружающей среды.

Следует отметить, что такие системы уравнений не могут применяться при долгосрочным прогнозировании (верхний предел ограничивается тремя годами). Для выхода из сложившейся ситуации и снятия временных ограничений уравнения приобрели степенные функции [22]:

$$G_\tau = K\tau^n, \quad (23)$$

где G_τ – коррозионная потеря массы;

K – коэффициент, соответствующий средней скорости коррозии за первый год;

n – коэффициент, учитывающий замедление процесса коррозии вследствие образования пленки продуктов коррозии;

τ – время протекания процесса.

В основе второго концептуального подхода лежит представление о том, что атмосферная коррозия является протекающим под тонким слоем электролита электрохимическим процессом.

В рамках второй концептуальной модели, атмосферная коррозия рассматривается как электрохимический процесс, происходящий под слоем электролита, который покрывает металл. Разработка моделей в этом случае осуществляется с соблюдением следующих принципов [65, 92, 93]:

- кинетика процесса коррозии определяется с позиции электрохимических и химических законов, это позволяет более точно оценивать скорость коррозионных реакций и предсказывать их ход;

- уровень влажности играет также важную роль, так как при определенных его значениях активизируется влияние коррозионных агентов, например, сернистого ангидрида и хлоридов;

- скорость, с которой протекает коррозия в атмосферных условиях, в значительной степени зависит именно от влажности воздуха;

- влажность, в сочетании с температурой окружающей среды, существенно влияет на толщину слоев влаги, адсорбированных и фазовых, на поверхности металла;

- состав и структура слоя ржавчины характеризуются разнообразием послойных фракций, что также важно для понимания и моделирования процессов коррозии.

Принимая во внимание эти принципы, модели становятся более сложными и многогранными, поскольку они должны учитывать комплексное воздействие множества факторов, определяющих коррозионную активность в различных атмосферных условиях.

Термодинамические свойства и химическая природа конкретного металла, в сочетании с атмосферными факторами, оказывают значительное влияние на инициацию и развитие коррозионных процессов. Иными словами, определенное сочетание характеристик металла и окружающей атмосферы может либо стимулировать, либо тормозить коррозионные изменения.

Это означает, что скорость атмосферной коррозии не является постоянной и может изменяться в зависимости от конкретных условий. Формирование плотных слоев коррозионных продуктов на поверхности металла

может служить защитой от дальнейшего воздействия корродирующей среды, эффективно замедляя процесс разрушения. С другой стороны, такие слои могут отслаиваться под действием механических знакопеременных напряжений или колебаний температуры, облегчая тем самым контакт поверхности металла с коррозионными агентами [16].

Следовательно, динамику развития коррозии можно рассматривать как результат сочетания множества переменных, среди которых физические характеристики, такие как плотность и целостность защитного слоя, играют немаловажную роль.

Прецизионный контроль и наличие надежной системы прогнозирования коррозионного износа являются ключевыми факторами для обеспечения безопасности и долговечности металлоконструкций эскалаторов в различных условиях их эксплуатации. Задача сводится не только к определению текущего уровня износа, но и к оценке дальнейшего изменения состояния конструкций для опережающего выявления потенциальных неисправностей и принятия профилактических мер.

Математическое моделирование в этом контексте выступает как основной инструмент, способный предоставить прогноз о скорости коррозионных процессов и их влиянии на срок службы конструкций. Такая модель должна учитывать множество факторов, включая тип металла, слитность сечений и обтекаемость отдельных конструктивных элементов, концентрацию коррозионных агентов в окружающей атмосфере, влажность, температурные изменения и механические нагрузки, воздействующие на конструкцию во время эксплуатации. Комплексный анализ этих данных позволит не только точно определить стадию коррозионного процесса, но и эффективно планировать техническое обслуживание и ремонт эскалаторов, гарантируя их безопасность.

Важно понимать, что взаимное сочетание физико-химического и механического воздействий на металлоконструкцию приводит к постепенной деградации первоначальных параметров и характеристик металла. Со временем

такие изменения могут значительно увеличить вероятность возникновения аварийных ситуаций и отказов в работе конструкций в целом.

1.8 Выводы по главе. Основные задачи исследования

Анализ состояния эскалаторного парка выявил необходимость решения трех ключевых задач для обеспечения их надежной и бесперебойной работы:

- диагностика текущего (мгновенного) состояния;
- моделирование отказов, в частности по коррозионной составляющей;
- прогнозирование технического состояния несущих металлоконструкций.

Основную роль в формировании требований к разработке и внедрению особых методов для оценки и прогнозирования технического состояния несущих металлоконструкций играет режим работы эскалаторов (с рабочими пробегами до 20 часов в сутки). Эти методы должны предусматривать возможность быстрого выявления местоположений дефектов с четким определением соответствующих им характеристик, что существенно сократит время простоев эскалаторов.

Соответственно, были сделаны следующие выводы:

1. Состояние эскалаторного парка требует пристального внимания, так как сроки их эксплуатации в большинстве случаев превышают установленные нормативно-технической документацией, что и определяет актуальность данного исследования.

2. Основной элемент эскалатора, замена которого не производится в течение всего периода эксплуатации – его несущая металлоконструкция.

3. Анализ литературных источников показал, что определение остаточного ресурса несущих металлоконструкций эскалаторов в связи с их коррозионной поврежденностью и количеством циклов нагружения не получили достаточного развития.

4. С целью прогнозирования динамики процессов накопления повреждаемости необходимо сформировать адаптированную математическую модель. Для этого требуется решить следующие задачи:

- провести анализ конструктивного исполнения несущих металлоконструкций эскалаторов с определением групп факторов, влияющих на изменение их состояния;
- провести анализ существующих подходов к описанию процессов коррозии и выявить особенности протекания коррозионного процесса в специфических условиях эксплуатации эскалаторов;
- установить и исследовать связь между коррозионным повреждением и процессами усталостного разрушения металлоконструкций эскалаторов с учетом внешних и внутренних факторов;
- разработать метод определения технического состояния частично замоноличенных шпилечных элементов подвеса крановых путей грузоподъемного оборудования в машинных залах эскалаторов;
- разработать модель на основании изученных взаимосвязей;
- разработать метод обследования и технического диагностирования несущих металлоконструкций эскалаторов с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации, а также величины остаточного ресурса.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОЙ КОРРОЗИИ НА СКОРОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ

2.1 Диагностика коррозионного состояния

Соотношение качества применяемых материалов и стабильности исходной конструкции в процессе эксплуатации является определяющим фактором конструктивной надежности. Эффективная работа металлических конструкций в течение их эксплуатационного периода зависит от ряда критически важных моментов. Сюда входит качество установки и сборки элементов конструкции, а также контроль за эксплуатацией и выполнением ремонтных работ, что вместе с соответствующими условиями хранения заменяемых компонентов и запасных частей способствуют увеличению срока службы оборудования и его надежности.

Процесс коррозии металлических объектов и их вероятное последующее разрушение условно протекает в три основных этапа [30]:

1. Этап начальной эксплуатации (пуска) и устранения возможных технических дефектов: в этом периоде объект может испытывать серьезные повреждения, если не соблюдаются условия эксплуатации, если проведение антикоррозионных защитных мер осуществлено недостаточно качественно, или если начальный монтаж проведен с ошибками.

2. Этап устойчивой работы: в этот период отказы, связанные с коррозионными повреждениями, возникают на регулярной основе. Несмотря на их регулярность, такие отказы зачастую кажутся случайными событиями из-за отсутствия непосредственных внешних признаков.

3. Этап износа или старения объекта: этот период времени характеризуется возрастанием числа повреждений, связанных с физическими разрушениями и коррозионным износом конструкционных материалов.

На сегодняшний день в распоряжении имеется широкий арсенал технологий для оценки коррозионного состояния элементов металлоконструкций. При этом процедуры обследования и диагностики выполняются в соответствии с программой экспертизы с применением неразрушающих методов контроля, а также в соответствии с «СТО 9701105632-003-2021. Инструкцией по визуальному и измерительному контролю», регламентирующими порядок визуальной и инструментальной проверки.

Программа обследования металлоконструкций эскалаторов предусматривает следующий перечень работ:

- визуальная оценка состояния всей металлоконструкции эскалатора с разделением по зонам;
- визуальный осмотр направляющих бегунков ступеней на рабочей и холостой ветвях, с последующим измерением толщины съемных деталей, которые в случае несоответствия нормативно-техническим показателям могут быть в последующем демонтированы и заменены на новые;
- использование толщиномеров: механических ручных для проверки легкодоступных участков открытых профилей и ультразвуковых устройств для замеров в менее доступных, закрытых профилях и зонах [10];
- применение методов магнитного контроля с целью определения величин остаточных коэрцитивных сил, что в дальнейшем позволяет вычислить оставшийся ресурс металлической конструкции на основе анализируемых данных.

Предварительную оценку изменения и состояния защитного покрытия микрогеометрии поверхности металла можно осуществить посредством визуального осмотра. Впрочем, данный метод имеет недостатки: он субъективен и не обладает достаточной достоверностью и чувствительностью.

Мониторинг состояния металлических элементов эскалаторных конструкций осуществляется посредством ультразвуковой толщинометрии. Этот метод предусматривает использование специализированных приборов и проводится в соответствии с методикой, изложенной в РД РОСЭК-001-96

«Машины грузоподъемные. Конструкции металлические. Толщинометрия ультразвуковая. Основные положения». Среди оборудования, активно применяемого в данном процессе, можно выделить толщиномеры таких типов как Булат-5УП, УТ-92П, УД2-102, Взлет УТ и иные (рисунок 2.1). Эти устройства обладают возможностью измерять толщину металлических конструкций в диапазоне от 0,025 до 300 миллиметров с минимальным приращением измерения в 0,1 миллиметра.



Рисунок 2.1 – Измерительные приборы:
 а – ультразвуковой дефектоскоп УД2-102;
 б – ультразвуковой толщиномер Булат-5УП;
 в – ультразвуковой толщиномер Взлет УТ

Для различных серий эскалаторов также определены свои нормы по коррозионному износу по отношению к первоначальным геометрическим характеристикам поперечного сечения: для серий ЭМ, ЛТ и Е разрешается уменьшение сечения в результате коррозионного износа до 30% от первоначального размера, в то время как эскалаторы серии ЭТ и ЭТХ имеют более строгие критерии, для которых установлен порог в 15% от исходной размера.

2.2 Магнитный контроль основных элементов металлоконструкций эскалаторов

Уникальность и малосерийность многих конструкций, в том числе и металлоконструкций эскалаторов, не дает возможности иметь в достаточном

объеме статистической информации, получаемой на основе их стендовых или натурных испытаний с целью оценки показателей безотказности и долговечности, а также вероятность наступления предельных состояний. В таких случаях применяют расчетно-теоретический метод, основанный на статистических данных относительно свойств применяемого металла, нагрузок и воздействий.

Возможные случаи наступления предельных состояний подразделяются на две группы: предельные состояния, наступившие в результате постепенного накопления в металле рассеянных повреждений, приводящих к зарождению и развитию макроскопических трещин; предельные состояния, связанные с чрезмерным износом трущихся деталей и поверхностей, находящихся в контакте с рабочей или окружающей средой. Однако, в обеих группах происходит изменение одного и того же параметра – механические свойства металла, из которого изготовлена исследуемая конструкция.

Механические свойства металлов напрямую влияют на их электрофизические свойства, что обосновывается многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями. Так как электрофизические параметры можно сравнительно легко измерить, они широко применяются для контроля механических свойств металлов, из которых изготовлены те или иные конструкции.

Сложнонапряженное состояние элементов металлоконструкции эскалаторов непосредственно определяет магнитные свойства металла, при этом идет процесс накопления повреждений и микропластической деформации, приводящий к снижению несущей способности конструкции в целом. В ходе этого процесса происходит возрастание величины коэрцитивной силы H_c – основного контролируемого параметра согласно [59].

Связь коэрцитивной силы H_c с остаточной пластической деформацией ε_p в процессе эксплуатации металлоконструкции при статическом и циклическом нагружении прослеживается при сравнении формул (24) и (25), а также при рассмотрении магнитных и деформационных петель гистерезиса

$$H_c = \frac{B}{E} + \left(\frac{B}{K}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (24)$$

$$\varepsilon_\rho = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{B}{K}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (25)$$

где B – остаточная индукция;

E – модуль упругости;

K – циклический коэффициент напряжения;

σ – амплитуда нагружения;

n – циклический коэффициент упрочнения.

Иными словами, своеобразным уникальным датчиком пиковых значений силовых нагрузок в данном случае выступает структура ферромагнитного материала, а ряд иных контролируемых магнитных параметров, связанных с целостностью структуры металла, наглядно отображает силовые характеристики режимов работы металлоконструкции.

При проектировании несущих элементов эскалаторов в их основу закладываются стали, относящиеся к классу разупрочняемых сталей, у которых значение циклического коэффициента упрочнения $n \leq 0,1$, величина коэрцитивной силы H_c на начальном этапе эксплуатации составляет примерно 1,5–10 А/см. Выбор данных сталей для металлоконструкций часто обусловлен их уникальными характеристиками, включая сильную коррелятивную связь между их магнитными свойствами и физико-механическими характеристиками, коэффициент которой достигает или превышает значение 0,9. Это взаимоотношение делает возможным использование методов магнитного контроля для мониторинга этих сталей, обеспечивая высокую эффективность при оценке структурного состояния нагруженных элементов металлоконструкций.

Благодаря такому подходу, магнитный метод неразрушающего контроля может использоваться для быстрой и надежной диагностики в режиме реального времени, что является особенно ценным для оперативного обнаружения возможных дефектов, не влияя при этом на эксплуатационные характеристики

или долговечность металлоконструкций. Для осуществления магнитного контроля используется структуроскоп магнитный КРМ-Ц-К2М (рисунок 2.2) или любое иное устройство с аналогичными функциями.



Рисунок 2.2 – Структуроскоп магнитный КРМ-Ц-К2М

Прибор функционирует на основе специфического физического принципа, связанного с измерением коэрцитивной силы, которая является мерой сопротивления металла размагничиванию. Это измерение осуществляется путем фиксации тока компенсации, который необходим для нейтрализации остаточной магнитной индукции внутри металла. Процесс измерения проходит внутри закрытого контура, сформированного магнитопроводом, который является частью прибора, и самим металлическим изделием, подвергаемым тестированию.

Такой метод обладает высокой предельной точностью и эффективен для выявления мест в металлоконструкциях, подверженных интенсивным нагрузкам. Это касается обнаружения присутствия или вероятности возникновения усталостных дефектов, необратимых пластических деформаций, а также позволяет измерять уровень остаточных напряжений и производить оценку деформаций. Применяемый подход к диагностированию значительно увеличивает надежность конструкций, предоставляя информацию, необходимую для раннего выявления возможных проблем и предотвращения серьезных отказов в работе конструктивных элементов.

По результатам магнитного контроля прогнозируемый срок работы эскалатора может быть разделен на три вероятных режима эксплуатации по

степени накопления остаточных деформаций и микрповреждений: режим надежной эксплуатации, режим контролируемой эксплуатации и критический режим эксплуатации, разница между которыми заключается в сравнении значений максимальных напряжений в конструкции (значений коэрцитивных сил) со значением предела текучести для данного металла (коэрцитивной силы, соответствующей данному параметру).

2.3 Вспомогательное оборудование машинных залов эскалаторов

В технических условиях машинных залов эскалаторов, если таковые предусмотрены исходя из конструктивных особенностей, при выполнении технических обслуживаний и ремонтных работ применяются компактные механизмы для подъема грузов, например, 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, которые после монтажа частично оказываются замоноличенными (рисунок 2.3).

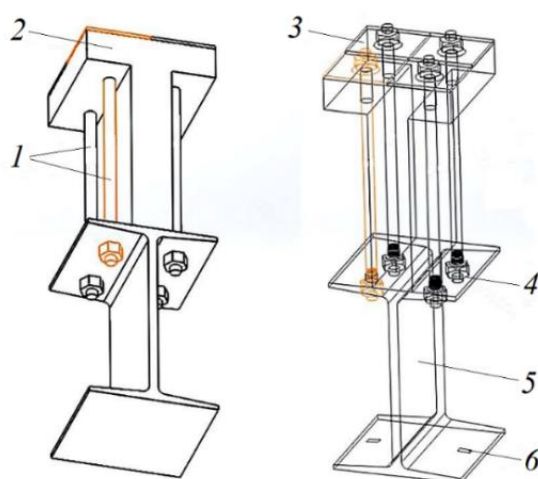


Рисунок 2.3 – Шпилечный подвес ездового двутавра:

- 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, обладающих необходимыми характеристиками прочности и устойчивости. Фиксация в нужном положении достигается посредством резьбового соединения.

Шпилечные соединения работают в условиях, когда нагрузка от использования грузоподъемного оборудования является относительно низкой даже при достижении максимальных показателей грузоподъемности. Это обеспечивает безопасность конструкции вне зависимости от интенсивности его эксплуатации, позволяя избегать чрезмерных нагрузок на крепежные элементы.

Доступ к внутренним, замоноличенным частям несущих конструкций часто ограничен или невозможен, что усложняет использование обычных способов и инструментов для осмотра и оценки их технического состояния. Эта проблема особенно важна учитывая, что вероятность ухудшения несущих характеристик этих элементов весьма велика.

Опыт эксплуатации подобных конструкций показывает, что они могут подвергаться постепенному повреждению вследствие неодинаковой загрузки компонентов подвесных узлов. Так, чрезмерное натяжение или нагрузка на одну шпильку может привести к тому, что другие шпильки перестанут функционировать должным образом, что может вызвать образование зазора, который в дальнейшем способен спровоцировать появление внезапных нагрузок инерционного типа и повлечь за собой дополнительное воздействие на другие компоненты узла. Динамичность таких нагрузок особенно опасна, так как способствует постоянному прогрессированию повреждений [7, 89, 115].

В процессе оценки основных параметров состояния конструкций при диагностике узлов подвеса, внимание уделяется определенным критическим факторам. К ним относятся образование и расширение усталостных трещин, которые могут достигать размеров, неприемлемых для дальнейшей безопасной эксплуатации конструкции, наличие остаточных пластических деформаций,

способных вызвать изменения в геометрических характеристиках и потерю устойчивости элементов конструкции.

Следующий важный критерий – это уменьшение площади сечений деталей, вызванное коррозионными процессами, что может привести к критическому ослаблению конструкции.

И, наконец, оценивается деградация физико-механических характеристик материалов, которая может быть результатом различных внешних воздействий в течение срока службы.

Учет этих критериев позволяет выявить потенциальные причины предполагаемых отказов и оценить текущее состояние элементов, чтобы решить, требуется ли ремонт или замена конкретных компонентов.

2.4 Влияние аэрохимической среды на развитие коррозии

Явление атмосферной коррозии подчиняется электрохимическим принципам, что дает возможность применить по отношению к ней законы, применимые к процессам электрохимического разрушения металлов. В то же время этот процесс имеет уникальные особенности, которые играют существенную роль в разработке эффективных методов защиты от коррозии в подобных условиях [39, 80, 124].

Исследования, проведенные в лабораторных условиях с использованием влажных камер [81], подтвердили наличие прямой связи между влажностью воздуха и скоростью коррозии образцов из низкоуглеродистой стали. В процессе экспериментов образцы взвешивали до начала воздействия влажной среды и по окончании, точность измерений обеспечивалась с погрешностью не более 0,01 грамма, что позволило достоверно оценить массу утраченного материала и, соответственно, степень коррозии. Результаты приведены на рисунке 2.4.

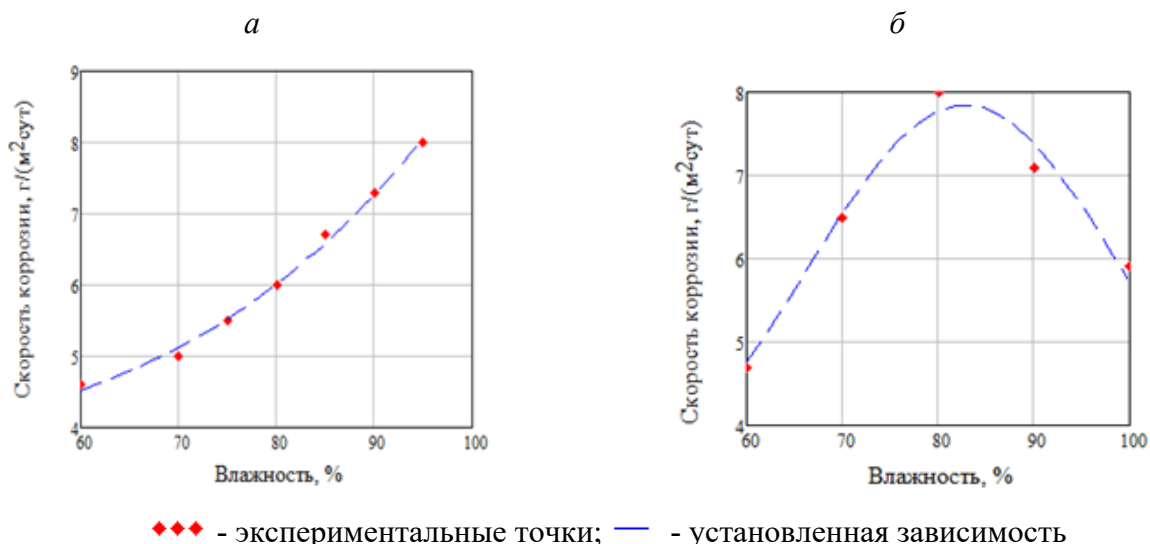
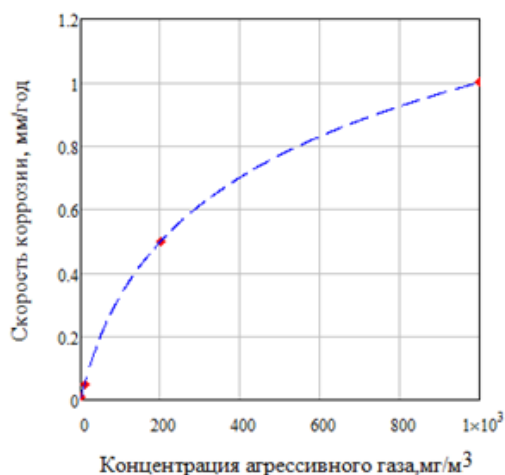


Рисунок 2.4 – Влияние влажности воздуха на скорость коррозии низкоуглеродистых сталей при различных количествах сконденсированной на поверхности материала воды: а - 0,5 г/дм²; б - 2,3 г/дм²

Исследования указывают также на то, что коррозионные процессы протекают медленнее при определенном уровне влажности. В рамках диапазона от 30% до 50% слой влаги на поверхности металлических изделий образуется в минимальном количестве, как правило, не превосходя максимальной толщины в 10 нм. С другой стороны, при увеличении влажности наблюдается рост толщины водной пленки до 1 мм, что влечет за собой значительное ускорение коррозионного износа металла. Эти выводы существенны при определении условий эксплуатации металлических конструкций для минимизации рисков, связанных с коррозией.

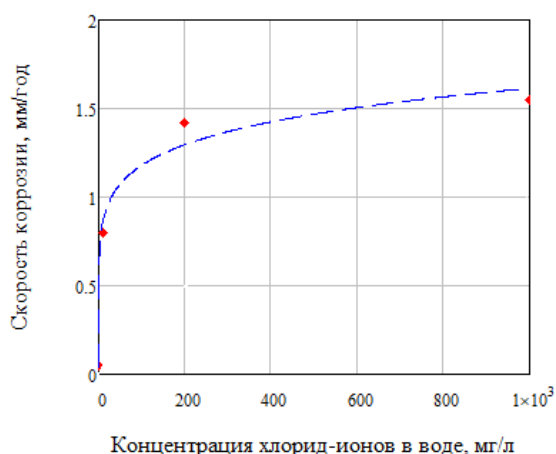
Агрессивность атмосферы определяется также наличием в своем составе различных загрязнений. Наиболее вредными загрязнениями являются сернистый ангидрид (SO_2) и хлориды [41, 42, 55, 79, 82].

В рамках исследования [117] были осуществлены лабораторные испытания, в ходе которых изучались процессы коррозии низкоуглеродистой стали. Эти испытания проходили в условиях воздействия влажности и наличия агрессивных примесей, таких как сернистый ангидрид (SO_2) и соединений, содержащих хлориды. Результат проводимых испытаний оценивался через массовый показатель коррозии, который определялся гравиметрическим методом. Результаты приведены на рисунках 2.5 и 2.6.



♦♦♦ - экспериментальные точки; — - установленная зависимость

Рисунок 2.5 – Зависимость скорости коррозии низкоуглеродистых сталей от концентрации SO_2 (нормальная влажность)



♦♦♦ - экспериментальные точки; — - установленная зависимость

Рисунок 2.6 – Зависимость скорости коррозии низкоуглеродистых сталей от концентрации хлорид-ионов в воде

В случае превышения концентрации сернистого ангидрида допустимого значения, скорость коррозии заметно возрастает. При его постоянной концентрации в атмосфере скорость коррозии будет зависеть от степени влажности. Изменение скорости коррозии при относительной влажности 70% будет определяться содержанием SO_2 в атмосфере [25, 41, 121].

Хлориды также играют значимую роль в процессе ускорения коррозии металлов. Воздействуя на металлические поверхности, они способствуют увеличению коррозионной активности окружающей среды. В процессе адсорбции на металлических поверхностях хлориды создают растворимые соединения, что приводит к повышению интенсивности коррозионного

процесса. Особенно агрессивное воздействие на металлы оказывают хлорид-ионы, находящиеся во влажной среде. Эти ионы имеют способность легко проникать сквозь защитные пленки на поверхности металла, ведя к ее разрушению [26]. Важно отметить, что при достижении и превышении концентрации хлоридов в воде в 180 мг/л, скорость коррозии низкоуглеродистой стали прирастает минимально. 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.

В рамках исследований [81] были выполнены испытания на образцах из низкоуглеродистой стали, благодаря которым удалось выявить ряд характеристик, присущих процессам коррозии. Одним из исследуемых параметров стало критическое статическое напряжение, которое определялось под воздействием статического растяжения: к образцам прикладывали постоянные во времени напряжения и фиксировали момент, при котором происходили необратимые изменения. Для определения критического динамического напряжения образцы подвергались воздействию переменных напряжений, имеющих заданную динамику и число циклов, в атмосфере, содержащей сернистый ангидрид и хлориды в разных концентрациях. Способность выдерживать постоянные нагрузки без разрушения в коррозионной среде иллюстрирует стойкость материала к коррозионной усталости, тогда как его устойчивость при переменных нагрузках указывает на сопротивление коррозионному растрескиванию.

Поверхностно-активные компоненты среды, адсорбирующиеся на поверхности материала, могут вызывать изменение его усталостной прочности. Этот эффект, особенно заметный при циклических напряжениях, объясняется явлением Ребиндера. Взаимодействие и совместное воздействие этих компонентов может привести к уменьшению усталостной прочности материала, что известно как адсорбционная усталость [47].

ГОСТ 9.107-2023 «Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы. Основные положения» выделяет шесть категорий атмосфер по коррозионной агрессивности – от очень низкой до экстремально высокой, однако для целей данного исследования предусмотрена классификация сред, включая атмосферные, на основе их агрессивности в соответствии с уровнем их воздействия на материалы (таблица 2.1). Это позволит более детально анализировать и сравнивать различные условия, влияющие на коррозионные процессы, и обеспечивает более точное определение потенциальной стойкости материалов в разных эксплуатационных условиях.

Таблица 2.1 – Классификация агрессивности сред

Агрессивность среды	Скорость коррозии низкоуглеродистой стали, мм/год	Снижение прочности, %
Неагрессивная	До 0,01	0
Слабоагрессивная	0,01 - 0,05	до 5
Среднеагрессивная	0,05 - 0,5	до 10
Сильноагрессивная	Более 0,5	15

Изменение температуры, а также ее стабильность в определенных пределах оказывает неоднозначное влияние на протекание процессов коррозии. В данном случае температурный фактор определяется расположением эскалатора (помещение-улица, ниже или выше уровня земли и т.д.), а также сезонными изменениями направлений воздушного потока.

Повышение температуры в области положительных значений, сопровождаемое сохранением влажных пленок на поверхности образцов, вызывает ускорение коррозионных процессов. Наличие же искусственного воздухообмена при росте температуры приводит к высыханию поверхности и, как следствие, к снижению скорости протекания коррозионного процесса [54].

Снижение температуры обычно приводит к замедлению коррозионных процессов. В зимний период наблюдается изменение уровня содержания сернистого ангидрида в атмосфере, значения которого колеблются в диапазоне от 0,007 до 0,035 мг/м³, концентрация хлор-ионов увеличивается. Такие факторы, несмотря на низкие значения температур, могут приводить к интенсификации

коррозии [95]. Все это указывает на комплексное влияние различных атмосферных условий на коррозионную активность.

2.5 Структура слоя ржавчины

Металлоконструкции эскалаторов эксплуатируются в условиях, имеющих ряд особенностей, важных для данного исследования.

В рамках изучения состава коррозионных образований [79], был проведен анализ ржавчины с комбинированием двух методов. В частности, использовался рентгенофазовый дифракционный анализ на установке УРС-50И и термографический анализ на терморегистраторе НТР-70. Для сравнения применялись стандартные образцы синтезированных гидроксидов – гетита (α -FeOOH), лепидокрокита (γ -FeOOH), магнетита (Fe_3O_4), гематита (Fe_2O_3), а также различных солей. В результате было установлено, что коррозионные продукты в основном состоят из гидратированных форм железных оксидов (α -, β -, γ -FeOOH), магнетита (Fe_3O_4), наряду с аморфными веществами. Формирование этих соединений происходит согласно законам термодинамики, которые регулируют взаимодействие элементов в системе железо-вода [79, 94, 120].

Рассматривая ржавчину более детально, можно отметить, что ее слой характеризуется неоднородностью как в физическом, так и в химическом аспекте. По разнице механических свойств было установлено, что в структуре ржавчины присутствует четыре отличных друг от друга подслоя (рисунок 2.7).

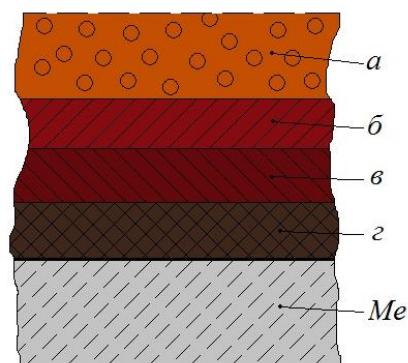


Рисунок 2.7 – Структурный состав слоя ржавчины:
a - опавший подслой; *б* - казовый подслой; *в* - средний подслой;
г - внутренний подслой; *Me* – основной металл.

Первый или казовый подсло́й ржавчины (рисунок 2.7, б) является легко снимаемым, поскольку его структура достаточно рыхлая. Этот слой обычно без труда убирается с помощью металлической щетки. В отличие от него, второй или средний подсло́й (рисунок 2.7, в), более прочный и плотный, обычно требует для удаления более агрессивных методов механического воздействия. Еще глубже расположен третий или внутренний подсло́й (рисунок 2.7, г), наиболее близкий по своим характеристикам и предельно плотно прилегающий к основному металлу. Эта часть слоя ржавчины может быть удалена только в процессе травления, при использовании реагентов с добавлением ингибиторов коррозии. Четвертый или опавший подсло́й (рисунок 2.7, а) при продолжительном воздействии окружающей среды в основном самостоятельно отслаивается и теряется [9, 53].

На рисунках 2.8 и 2.9 продемонстрировано, как распределяется масса коррозионных продуктов по подсло́ям. Это распределение наблюдается у проб, которые подвергались воздействию конкретных условий.

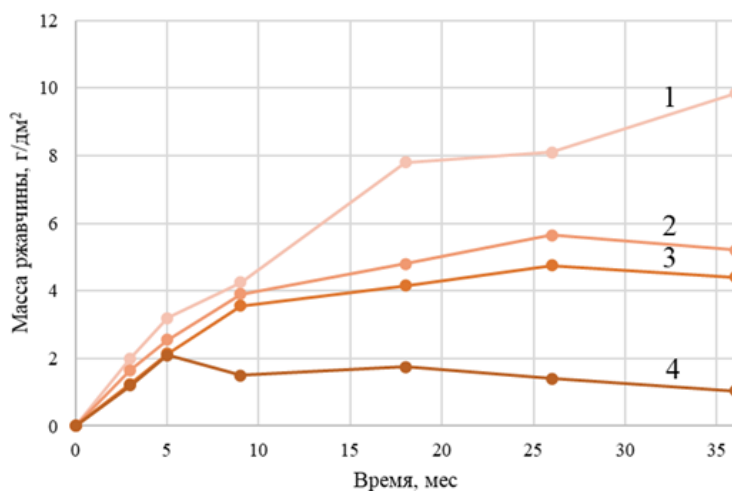


Рисунок 2.8 – Распределение массы ржавчины по подсло́ям (атмосфера городской среды):
 1 – опавший подсло́й; 2 – казовый подсло́й; 3 – средний подсло́й;
 4 – внутренний подсло́й

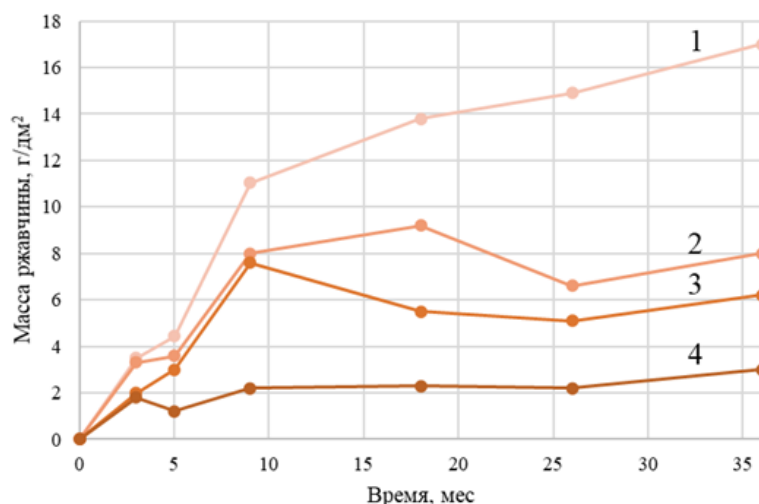


Рисунок 2.9 – Распределение массы ржавчины по подслоям (усредненная атмосфера промышленной зоны):
 1 – опавший подслей; 2 – казовый подслей; 3 – средний подслей;
 4 – внутренний подслей

Агрессивность окружающей среды оказывает прямое влияние на скорость коррозионных процессов, что, собственно, определяет изменение толщины коррозионных отложений. В средах с высокой агрессивностью, также обозначаемых как коррозионно-активные, наблюдается ускоренный рост толщины слоя ржавчины. Это приводит к быстрому разрушению и деградации металла. Напротив, в менее агрессивных средах процесс коррозии протекает медленнее, что замедляет образование коррозионного слоя.

С течением времени можно наблюдать, что взаимодействие между частицами коррозии постепенно уменьшается, почти достигая нулевого значения, что делает рыхлые коррозионные отложения легко удаляемыми. Толщина слоя ржавчины при достижении определенного значения меняется незначительно вследствие саморегулирующегося баланса, возникающего благодаря массопереносу между слоями. Такой эффект типичен для сред с умеренной коррозионной активностью.

При воздействии среднеагрессивных и особенно сильноагрессивных атмосферных условий структура слоя ржавчины становится явно неоднородно. В условиях, когда масса ржавчины достигает значения в пределах 8-9 г/дм², очевидным становится резкое изменение в толщине среднего подслоя. Это обусловлено тем, что самые верхние слои коррозионных продуктов

отслаиваются, что ведет к изменениям в структуре и плотности накопленной ржавчины.

Акцентируя внимание на анализе подслоев слоя ржавчины, становится очевидной важность внутреннего подслоя, находящегося в прямом контакте с базовым металлом, имеющим схожие механические характеристики, но являющимся в первую очередь областью коррозионного поражения. В случаях, когда соответствующая поверхностная обработка металлоконструкций для удаления всех возможных следов коррозии невозможна, например, из-за ограниченного доступа, применение защитных лакокрасочных покрытий может не дать ожидаемого эффекта в плане существенного увеличения эксплуатационного срока. Скорее, такое покрытие лишь временно замедлит процесс коррозии, до тех пор, пока покрытие не начнет отслаиваться или разрушаться. Следовательно, вопрос прогнозирования состояния несущих металлоконструкций эскалаторов приобретает первостепенное значение для обеспечения их надежности и безопасности.

2.6 Кинетика и динамика атмосферной коррозии

С целью определения кинетики коррозионного процесса был проведен анализ данных, представленных на рисунках 2.8 и 2.9.

При вычислении скорости коррозии применялась следующая формула [74]:

$$v_{pi} = \frac{m_i \cdot 100}{\tau_i \cdot 360}, \quad (26)$$

где v_{pi} – фактически установленная скорость коррозии, г/(м²·сут);

m_i – i -ый массовый индикатор коррозии, г/дм²;

τ_i – i -ый периодом экспозиции, сут.

Для конвертации значения v_{pi} в единицы глубинного показателя коррозии (δ_i) в мм/год, использовались специальные коэффициенты

преобразования. Значения этих коэффициентов указаны ниже, так как они обеспечивают точность перевода и позволяют адаптировать результаты [79, 93]:

$$\begin{cases} 1 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} = 0,0425 \text{ мм} \\ 23,529 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} = 1 \text{ мм} \end{cases}$$

При расчете величины ускорения коррозионного процесса a_i по отношению к определенному промежутку времени τ_i использовалась следующая формула:

$$a_i = \frac{v_{pi} - v_{pi-1}}{\tau_i}. \quad (27)$$

где v_{pi} и v_{pi-1} – соответственно реальные скорости коррозии на конец исследуемого периода и на его начало.

Для определения средних значений скорости коррозии v и ускорения процесса коррозии a использовались формулы:

$$v = \frac{\delta}{\tau}, \quad (28)$$

$$a = \frac{v}{\tau}. \quad (29)$$

где δ – глубинный показатель коррозии, мм; τ – весь срок экспозиции, год.

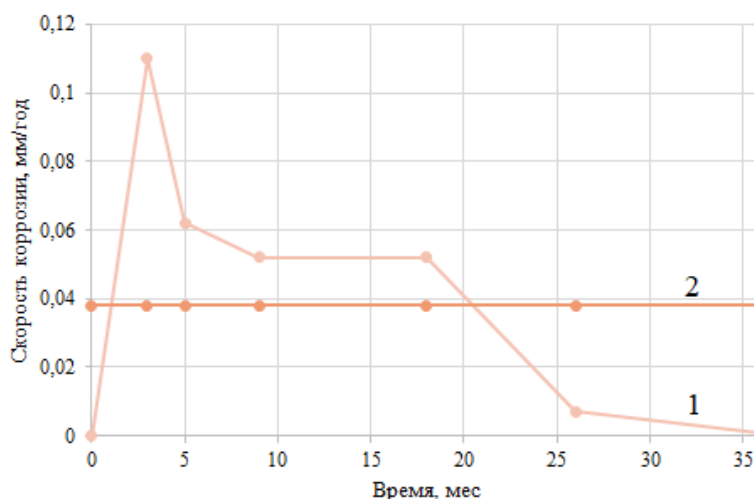


Рисунок 2.10 – Кинетика коррозии (городская среда):
1 – реальная скорость коррозии; 2 – средняя скорость коррозии

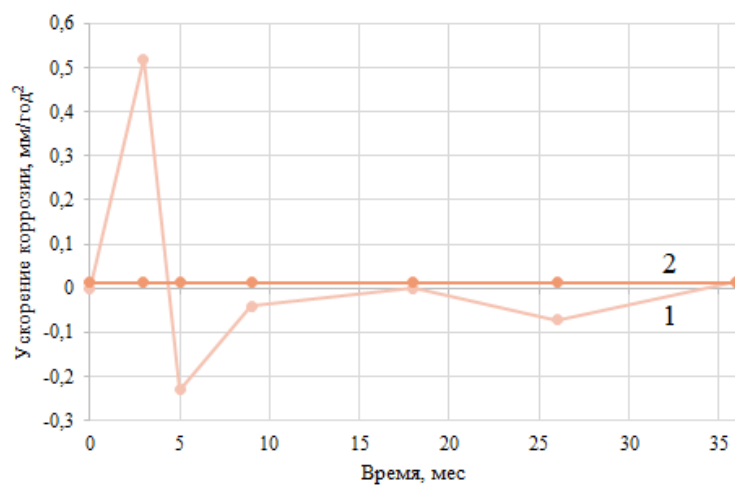


Рисунок 2.11 – Динамика коррозии (городская среда):
1 – ускорение коррозии; 2 – среднее ускорение коррозии

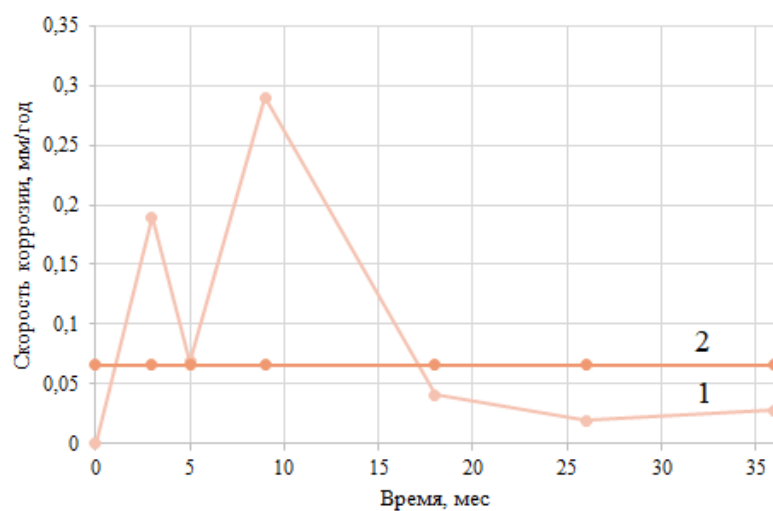


Рисунок 2.12 – Кинетика коррозии (промышленная зона):
1 – реальная скорость коррозии; 2 – средняя скорость коррозии

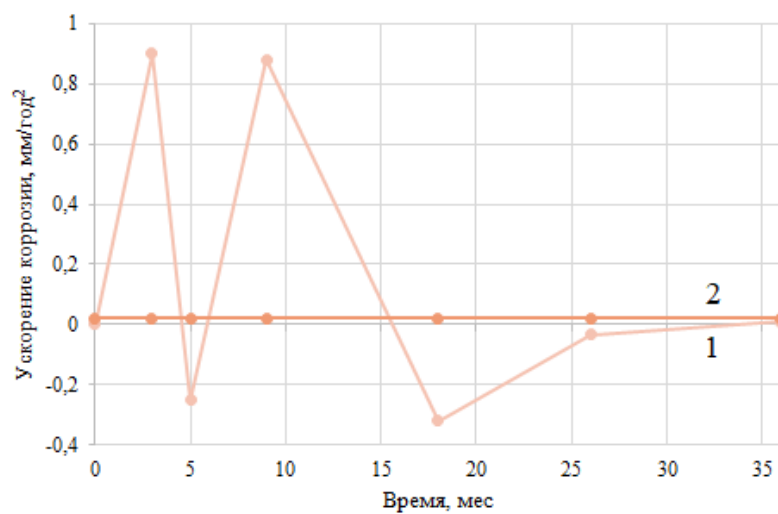


Рисунок 2.13 – Динамика коррозии (промышленная зона):
1 – ускорение коррозии; 2 – среднее ускорение коррозии

Проведенный анализ показал, что процесс коррозии металлоконструкций эскалаторов, расположенных в промышленных зонах, протекает несколько быстрее по сравнению с условиями городской среды. Так, если значение средней скорости коррозии в условиях городской атмосферы составляет 0,038 мм/год, то при нахождении в условиях усредненной атмосферы промышленной зоны (а именно в зоне установки несущих металлоконструкций эскалаторов) значение средней скорости увеличивается до 0,066 мм/год. Также различаются в значениях и средние ускорения, определяющие динамику процесса коррозии – 0,013 мм/год² в условиях городской среды и 0,022 мм/год² в промышленной зоне.

2.7 Питтинговая коррозия

Массовый показатель, отражающий интенсивность коррозионных процессов, зачастую не обеспечивает достоверной оценки устойчивости сталей по отношению к коррозии, особо заметным это становится в средне- и сильноагрессивных средах. При таких условиях более эффективным показателем является измерение глубины проникновения локальных видов коррозии, которую фиксируют в мкм/год или мм/год.

В рамках исследований [48, 82], направленных на определение стойкости низкоуглеродистых и низколегированных сталей против питтинговой коррозии, производилась оценка отношения глубины проникновения локальных видов коррозии (питтингов) к общей глубине равномерной коррозии, что в дальнейшем будет именоваться коэффициентом питтингообразования.

Для проведения экспериментов использовались образцы толщиной 3 мм, которые были представлены в форме пластин. Образцы размещались на Тихоокеанском побережье (Т) и Панамском перешейке (П) для сравнительного анализа. Их располагали на открытых участках коррозионно-климатических станций и подвергали воздействию соответствующей зоне атмосферы. Обработка и подготовка этих образцов, а также мониторинг и фиксация

различных коррозионных показателей осуществлялись в строгом соответствии с [40].

Для определения глубины проникновения локальных видов коррозии (питтингов), процедура начиналась с очистки образцов от продуктов коррозии. Замеры проводились с использованием механического индикатора, оснащенного передвижным игольчатым зондом, который позволял точно отмерять расстояние от поверхности до самой глубокой точки питтинга. При обнаружении питтингов с размерами, которые делали невозможным применение механического индикатора, применялся метод двойной фокусировки. Этот метод базируется на микроскопическом оптическом измерении и может определять с высокой точностью величину промежутка от плоскости входа коррозионного углубления до его дна.

Для учета в исследовании брали только те питтинги, у которых диаметр устья составлял 10 мкм и больше. Кроме того, общая площадь исследуемой рабочей поверхности образцов должна была превышать 0,005 м², что обеспечивало достаточную выборку для получения репрезентативных данных о питтинговой коррозии [40].

Результаты испытаний сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Средняя глубина питтинговой коррозии сталей, экспонируемых в атмосферных тропических условиях

Сталь	Условия экспозиции	Средняя скорость коррозии, мм/год			Средняя глубина питтинга, мм			Коэффициент питтингообразования ($k_{пт}$)		
		1 год	8 лет	16 лет	1 год	8 лет	16 лет	1 год	8 лет	16 лет
Ст3	Т	0,063	0,032	0,025	0,279	0,861	1,3	4,4	3,4	3,3
	П	0,035	0,021	0,018	0,125	0,435	0,558	3,6	2,6	1,9
10ХСНД	Т	0,043	0,016	0,013	0,254	0,435	0,665	5,9	3,4	3,2
	П	0,025	0,009	0,007	0,125	0,254	0,435	5	3,5	3,9

Из анализа информации, представленной в таблице 2.2, вытекает важный вывод: коэффициент питтингообразования $k_{пт}$ связан как с общей устойчивостью сплава к коррозии, так и с предрасположенностью к формированию питтингов. Этот коэффициент позволяет оценить, насколько равномерно происходит коррозия – прямая корреляция между ним и тенденцией материалов к

образованию локализованных коррозионных повреждений позволяет определить риски возможного неравномерного износа. Менее равномерная коррозия указывает на большую вероятность формирования питтингов, что и отражает высокий коэффициент, в то время как более низкие значения свидетельствуют о более однородной коррозии по поверхности сплава.

Питтинги, формирующиеся на поверхности материала, также следует рассматривать как локальные переменные во времени концентрации напряжений, которые могут стать отправной точкой для образования макротрещин, приводящих впоследствии к серьёзным дефектам материала и его разрушению.

В рамках исследований [52] было установлено, что конфигурация питтингов варьируется в зависимости от таких факторов, как температура, значение кислотности и химический состав воздействующей среды. Среди возможных форм наиболее часто встречается полусферическая. В связи с тем, что питтинги являются локальными концентраторами напряжений, основной целью было определено связь между величиной этих напряжений и глубиной дефекта. Для сквозных отверстий механизмы распределения напряжений и деформаций изучены достаточно детально, однако прежде чем превратиться в сквозные дефекты, питтинги проходят последовательный процесс.

С использованием программного обеспечения для автоматизированного проектирования APM WinMachine были изучены модели питтингов с прогрессированием по глубине с интервалом в один миллиметр для испытываемых образцов толщиной в десять миллиметров. Несквозное отверстие круглой формы использовалось в качестве основы для имитации питтинга. По результатам были построены модели, описывающие накопление усталостной поврежденности с учётом влияния питтингов, а также математические модели и уравнения для определения момента возникновения усталостной макротрещины

2.8 Зависимость химического состава сплавов и скорости атмосферной коррозии

Исследования поведения низкоуглеродистых и низколегированных сталей на фоне воздействия атмосфер разной коррозионной активности представлены в работах [1, 82, 107, 108]. Образцы из рассматриваемых марок сталей в испытательных камерах подвергались влиянию окружающей среды в естественных условиях, в условиях с часто меняющейся влажностью и в условиях аэрированной электролитом атмосфере. Результаты подтвердили положительный эффект от введения легирующих добавок в металл: коррозионная стойкость увеличивается в 2–3 раза по сравнению с образцами без добавления легирующих элементов. Преимущественно проявили себя низколегированные стальные сплавы, которые, благодаря наличию на поверхности защитных лакокрасочных покрытий, оказались более стойкими к коррозии в сравнении с обычными низкоуглеродистыми сталями при тех же условиях.

Особенное внимание в исследовании [82] было уделено сталям марки Ст3кп и Ст3пс, широко используемых в производстве элементов металлоконструкций, в том числе для эскалаторов. Экспериментальные образцы данных сталей подвергались испытаниям в усредненных условиях, максимально приближенных к тем, в которых функционируют металлоизделия эскалаторов. Результаты испытаний сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Глубинный показатель коррозии малоуглеродистых сталей

Марка стали	Глубинный показатель коррозии, мм/год		
	1-ый год	2-ой год	3-ий год
Ст3пс	0,057	0,039	0,032
Ст3кп	0,049	0,036	0,030

Анализ данных, представленных в таблице 2.3 позволяет сделать вывод, что интенсивность коррозионных повреждений у сталей Ст3кп и Ст3пс практически одинакова, причем общее отклонение в их значениях не превышает 10%. То есть химический состав данных сталей, определяемый ГОСТ 380-2005, вносит незначительный вклад в скорость развития коррозии в атмосферных

условиях. Если регламентируемые составы сталей СтЗсп и СтЗпс практически не отличаются, то состав СтЗкп имеет ряд отличий по содержанию марганца, кремния и меди, что и объясняет разницу в результатах. То есть, основные факторы, влияющие на скорость атмосферной коррозии, – температурно-влажностные и аэрохимические характеристики окружающей атмосферы.

2.9 Выводы по главе

1. Осмысление текущих подходов к созданию и, собственно, самих математических моделей атмосферной коррозии металлов позволяет сделать следующие выводы:

- внесение метеорологических данных и аэрохимических показателей в модели, аппроксимирующие процесс коррозии, значительно повышает их прикладную значимость, позволяя предвидеть ход коррозионных изменений в материале в зависимости от разнообразия состояния окружающих условий.

- глубокое понимание соотношения между физико-химическими характеристиками коррозии и множественными факторами, воздействующими на нее, открывает путь для разработки универсальных моделей, способных стать надежным инструментом для анализа в широком диапазоне условий и при различных режимах использования отдельных изделий.

2. Исходя из необходимости оценки состояния металлоконструкций эскалаторов существует потребность в создании специализированной математической модели. Подход к ее созданию должен базироваться на анализе основополагающих факторов, включающих как минимум следующие важные характеристики.

- влияние относительной влажности и температуры воздуха;
- защитную роль продуктов коррозии;
- присутствие в окружающей атмосфере коррозионно-активных веществ;
- сочетание этих параметров с нагрузками, испытываемыми металлом в течение реализации циклов его нагружения.

Такой подход позволит достичь универсальности модели и адаптировать ее к специфике эксплуатационных условий конкретных металлоконструкций.

3. При обследовании эскалаторов следует выделить три вида контроля: визуальный, толщинометрия, магнитный контроль.

4. Определены элементы вспомогательного оборудования, расположенного в машинных залах эскалаторов, на которых проведение ряда видов контроля невозможно.

5. Сравнение фактических показателей несущей способности и расчетных с критериями, определяющими предельные состояния, позволяет объективно оценить величину остаточного ресурса.

ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ

3.1 Постановка целевой задачи и выбор объекта эксперимента

Эксплуатационные характеристики эскалаторов во многом определяются интенсивностью их использования, которая в целом зависит от сложившихся режимов труда и отдыха. Временные рамки рабочего графика и периодов отдыха часто нивелируют возможности для остановки эскалаторного оборудования для проведения ремонтных работ или обслуживания при возникновении каких-либо чрезвычайных ситуаций. Ремонт и обновление эскалаторов зачастую связаны с заменой элементов, которые вышли из строя или исчерпали свой предельно допустимый ресурс работы. Это касается как деталей, запчастей, так и больших узлов, ответственных за функциональность и безопасную работу системы, обеспечивающей перемещение пассажиров между соответствующими уровнями. Несмотря на это, несущие металлоконструкции эскалаторов обычно остаются на своих местах и продолжают функционировать в прежних условиях.

Точная прогнозная оценка остаточного ресурса несущих металлоконструкций эскалаторов, период эксплуатации которых достиг или превысил регламентированный срок, представляет собой сложный процесс. Он требует целостного подхода, включающего как неразрушающие методы контроля для оценки напряженно-деформированного состояния в металле, так и проверочные вычисления на прочность. Тщательный и всесторонний осмотр действительно необходим для достоверного определения зон с микроскопическими повреждениями в структуре металла, ширина и глубина которых в стадии зарождения не превышают нескольких микрометров и которые могут оставаться необнаруженными под неповрежденным лакокрасочным покрытием. Следовательно, проведение такой процедуры подразумевает затрату

существенного количества времени и инвестиций в финансовую и материальную составляющие.

Когда невозможно точно определить области концентрации напряжений или взять образцы металла для анализа, проведение проверочных расчетов на прочность становится нецелесообразным. В то же время, когда на элементах металлоконструкции выявлены коррозионные повреждения значительных размеров, проявляющиеся в виде уменьшения толщины металла или размеров поперечного сечения на поврежденных участках, расчет на прочность с учетом этих изменений, а также скорости коррозии и их взаимного влияния на усталость материала становится весьма актуальным.

3.2 Модель описания основных параметров коррозионной поврежденности

Изменение величины коррозионного износа может оцениваться через параметр, характеризующий агрессивное воздействие среды – глубину деградации [88, 122]:

$$s = v \cdot \tau, \quad (30)$$

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

τ – продолжительность коррозии, лет.

Усредненная скорость коррозии является конечной величиной деградации, отнесенной к периоду времени с момента начала воздействия коррозионного процесса на металлоконструкцию. Анализ кинетики атмосферной коррозии показал, что процесс развития коррозии имеет нелинейный характер.

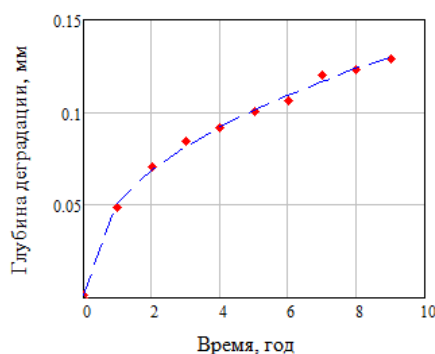
Для получения качественных показателей использовался инструментальный способ прямого определения параметров поражения ржавчиной доступной поверхности металла с одновременным исключением изъятия образцов или шлифов. На контролируемую поверхность конструкции для закрепления коррелированного слоя наносился аэрозольный слой закрепляющего состава, например, быстросохнущей эмали, затем с помощью

сверла диаметром 4 мм с углом заточки α от 90° до 120° делался микроконус глубиной, превышающей толщину слоя ржавчины. Глубина микроконуса определялась исходя из степени поражения металла коррозией экспериментально в каждом конкретном случае: она должна быть такой, чтобы вершина конуса была расположена в чистом металле, лишенном каверн ржавчины.

Глубина деградации определялась с помощью отсчетного микроскопа МПБ-2 со шкалой по величине ширины кольца коррозии η , являющейся проекцией границ усеченного конуса на плоскость, перпендикулярную оси конуса, с последующим пересчетом по формуле

$$\delta = \eta \frac{\operatorname{tg} \alpha}{2}. \quad (31)$$

Сбор данных осуществлялся на эскалаторах, находящихся в практически однотипных условиях, но имеющих разные годы запуска в эксплуатацию. Фактические результаты представлены на рисунке 3.1, где иллюстрируется динамика изменения глубины коррозионной деградации с течением временем, которую можно условно подразделить на две характерные фазы по обе стороны от точки инфлексии: вначале происходит резкое ускорение коррозионного процесса, а затем постепенное снижение темпов коррозии. Это замедление в деградации связывается с формированием коррозионных продуктов на поверхности материала, которые со временем накапливаются и начинают выполнять уже защитные функции. Появившийся слой препятствует дальнейшему контакту корродирующей поверхности с окружающей ее агрессивной средой, тем самым замедляя процесс разрушения [30].

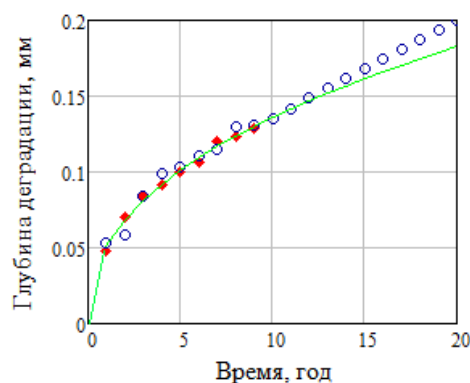


♦♦♦ - экспериментальные точки; — - установленная зависимость

Рисунок 3.1 – Динамика атмосферной коррозии сталей СтЗпс и СтЗкп

Анализ представленных на рисунке 3.1 данных показывает, что средняя скорость коррозии оказывается значительно ниже, чем скорость на начальном этапе. Это наблюдение подтверждает, что кинетика атмосферной коррозии не подчиняется линейному закону, а имеет нелинейный характер [30].

Учитывая сроки эксплуатации эскалаторов, возникает необходимость в долгосрочном прогнозировании процесса коррозии.



♦♦♦ - экспериментальные точки; ○○○ - предсказанные данные;
 — - истинный вид функции

Рисунок 3.2 – Экстраполяция опытных данных

На рисунке 3.2. представлена экстраполяция опытных данных, осуществленная с помощью программного обеспечения для статистического анализа (MathCad 14 и SigmaPlot v12) с целью предсказания глубины деградации в последующие годы и подобран истинный вид функции, наиболее точно описывающей изменение опытных данных с учётом долгосрочного воздействия.

3.3 Модель аэрохимического воздействия среды

Связь между скоростью коррозии и уровнем коррозионно-активных примесей в окружающей среде наглядно продемонстрирована на рисунках 2.5 и 2.6. 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

$$v = 0,362 \cdot \ln(C + 68,066) - 1,526, \quad (32)$$

где v – скорость коррозии, мм/год;

$C = C_{Cl} + 1,211C_{SO_2}$ – эквивалентная концентрация коррозионно-активных загрязнений [82], мг/м³;

C_{Cl} – концентрация хлорид-ионов, мг/м³;

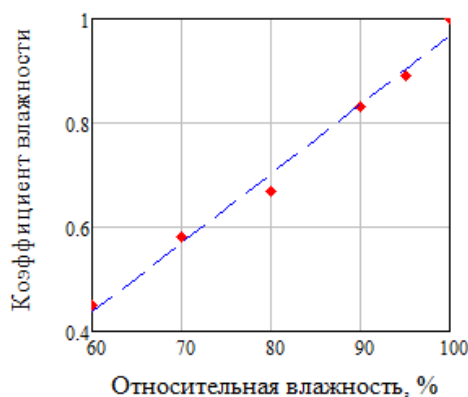
C_{SO_2} – концентрация сернистого ангидрида, мг/м³.

Скорость коррозии в неагрессивных атмосферах рассчитывается исходя из минимальных фоновых значений концентраций коррозионно-агрессивных загрязнений: 0,01–0,03 мг/м³ для сернистого ангидрида и 0,05–0,1 мг/м³ для хлорид-ионов. Источником выброса сернистого ангидрида в атмосферу является как вулканическая деятельность, так и антропогенное воздействие. Хлорид натрия, в основном содержащийся в морской соли, является источником молекулярного хлора с последующим образованием хлор-ионов под действием солнечного света. Эти соединения обладают высокой реакционной способностью и могут окислять многие компоненты атмосферы и не только.

Как показали исследования [81], количественное содержание влаги в атмосфере также оказывает существенное влияние на изменение скорости коррозии. Анализируя зависимость, представленную на рисунке 2.4а можно сделать вывод, что критическое значение относительной влажности ϕ составляет 70–75%, до этого значения скорость коррозии изменяется практически линейно, при его превышении наблюдается достаточно резкое (нелинейное) возрастание скорости коррозии. При увеличении количества влаги эффект несколько меняется (рисунок 2.4б), что связано с возможным образованием устойчивой пленки влаги на поверхности металла, интенсификацией процесса коррозии и, как следствие, уменьшением контакта с агрессивной средой посредством образования продуктов коррозии.

Интенсивность коррозионных процессов при уменьшении относительной влажности воздуха ниже отметки в 60% достигает своего минимума, но при этом она остается сопоставимой со значениями, полученными при относительной влажности равной 60% (рисунки 2.4а, 2.4б).

Для количественной оценки влияния влажности на скорость коррозии вводится показатель – коэффициент влажности среды k_φ . Он отражает степень замедления коррозионных процессов при различных уровнях влажности относительно скорости коррозии в условиях насыщенного влажного воздуха (при относительной влажности $\varphi = 100\%$), что наглядно изображено на рисунке 3.3.



♦♦♦ - экспериментальные точки; — - установленная зависимость

Рисунок 3.3 – Влажностный аспект атмосферной коррозии

Коэффициент влажности среды k_φ определяется уравнением, которое устанавливает его зависимость от относительной влажности φ в пределах от 60% до 100%. Эта зависимость представляется как:

$$k_\varphi = -0,3610 + 0,0133 \cdot \varphi, \quad (33)$$

где φ – относительная влажность воздуха.

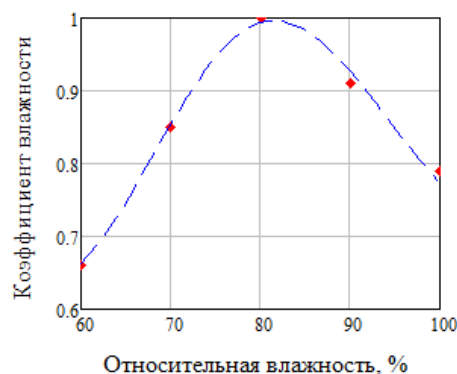
Значение k_φ не будет уменьшаться для атмосфер со значением φ менее 60%, а предполагается фиксированным, то есть равным его нижнему порогу. Это означает, что при значениях φ ниже 60%, скорость коррозии не уменьшается, а остается постоянной.

Принимая во внимание коэффициент влажности среды k_φ , можно рассчитать скорость коррозии v , используя следующее выражение:

$$v = (0,362 \cdot \ln(C + 68,066) - 1,526) \cdot k_\varphi, \quad (34)$$

Для случаев с более высоким количественным содержанием влаги (рисунок 2.4б) и ее конденсацией на поверхности металла или скоплением в каких-либо полостях, ситуация меняется существенно (рисунок 3.4) [28]. В таких

случаях вода может действовать как электролит, ускоряя коррозионные процессы.



♦♦♦ - экспериментальные точки; — - установленная зависимость

Рисунок 3.4 – Влажностный аспект атмосферной коррозии (высокая конденсация влаги)

Для случаев с высокой концентрацией влаги коэффициент влажности среды k_φ может быть рассчитан при использовании следующего выражения

$$k_\varphi = 0,5994 + 0,3997 \cdot e^{\left[-0,5 \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{\varphi}{81,4660}\right)}{0,1597} \right)^2 \right]}, \quad (35)$$

Значение k_φ для атмосфер с относительной влажностью $\varphi < 60\%$ берется на уровне, вычисленном для относительной влажности в 60%, по аналогии с предыдущим случаем.

Таким образом, при относительной влажности ниже 60%, несмотря на возможное увлажнение поверхностей и скопление влаги в полостях, коэффициент k_φ будет полагаться равным нижнему порогу, установленному для $\varphi = 60\%$. Это предполагает, что для расчетов будет использоваться консервативное предположение о скорости коррозии, отражающее возможность поддержания коррозионных процессов даже в условиях пониженной влажности.

3.4 Моделирование параметра адсорбционного понижения прочности материала

Адсорбирующиеся поверхностно-активные компоненты среды являются причиной изменения пластичности и усталостной прочности материала, что

объясняется эффектом Ребиндера [19, 28]. Эти вещества адсорбируются на поверхности материалов, проникают по сетке поверхностных дефектов внутрь и стабилизируют эти дефекты, препятствуя их смыканию во время разгрузки. В результате такое взаимодействие снижает способность материалов выдерживать циклические нагрузки, что негативно влияет на их долговечность.

Что касается проектирования подъемно-транспортных устройств, включая эскалаторы, предполагается, что их металлические конструкции будут работать в зоне упругих деформаций. В этой зоне наблюдается прямая зависимость между возникающими напряжениями и деформациями. В связи с этим пределом текучести становится ключевым при оценке механических свойств используемых материалов.

Для оценки изменения механических свойств материалов при условии воздействия агрессивных сред и меняющегося температурного напора используется следующая установленная зависимость [30, 60, 61, 84]:

$$\sigma_{(T)C} = \sigma_{T_0} \cdot e^{[0,00341 \cdot \beta \cdot (\frac{T_0}{T} - 1)]} \cdot \gamma_d \cdot k_t, \quad (36)$$

где $\sigma_{(T)C}$ – предел текучести материала с учетом воздействия агрессивной среды;

σ_{T_0} – предел текучести материала при температуре $T_0 = 293,15$ К (20°C);

β – коэффициент устойчивости сечения против коррозии;

γ_d – коэффициент, учитывающий снижение прочности материала из-за адсорбции;

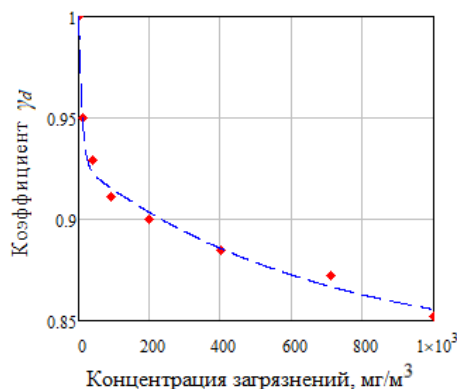
$k_t = 1 - 0,0016 \cdot \tau$ – временная составляющая.

Эта формула помогает адаптировать конструкционные материалы к условиям среды и температуры, в которых они будут эксплуатироваться, принимая во внимание возможные изменения их механических свойств под воздействием коррозии и других агрессивных факторов.

Разница в значениях температур по отношению к T_0 для несущих металлоконструкций эскалаторов присутствует как в летние и зимние периоды, так и специфике места установки.

Зависимость коэффициента, учитывающего снижение прочности материала из-за адсорбции, γ_d в условиях нормальной влажности от концентрации агрессивных газов в атмосфере определяем методом регрессионного анализа экспериментальных данных [28] (рисунок 3.5).

$$\gamma_d = 0,8350 + 0,0726 \cdot e^{-0,1055 \cdot C} + 0,0922 \cdot e^{-0,0015 \cdot C}. \quad (37)$$



♦♦♦ - экспериментальные точки; — - установленная зависимость
Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента изменения прочности материала от концентрации загрязнений

При объединении выражений (36) и (37) и дополнительном включении временной компоненты $k_t = 1 - 0,006 \cdot \tau$, которая отражает как изменяется коэффициент адсорбционного понижения прочности со временем, получено уточненное выражение для описания динамики устойчивости материала:

$$\sigma_{(T)C} = \sigma_{T_0} \cdot e^{\left[0,00341 \cdot \beta \cdot \left(\frac{T_0}{T} - 1\right)\right]} \cdot (0,8350 + 0,0726 \cdot e^{-0,1055 \cdot C} + 0,0922 \cdot e^{-0,0015 \cdot C}) \cdot k_t. \quad (38)$$

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

$$\sigma_{(B)C} = \sigma_{B_0} \cdot e^{\left[0,00341 \cdot \beta \cdot \left(\frac{T_0}{T} - 1\right)\right]} \cdot (0,8350 + 0,0726 \cdot e^{-0,1055 \cdot C} + 0,0922 \cdot e^{-0,0015 \cdot C}) \cdot k_t. \quad (39)$$

где σ_{B_0} – предел выносливости материала при температуре $T_0 = 293,15$ К (20°C).

3.5 Моделирование процесса коррозии

Исследования поведения металлических образцов из сталей СтЗкп и СтЗпс (см. п. 2.8) показали относительно слабую корреляцию между их составом и скоростью атмосферной коррозии. Основное влияние на кинетику

коррозийных процессов оказывают факторы, связанные с климатическими условиями, включая температуру и влажность, а также аэрохимическими параметрами окружающей атмосферы.

Следует отметить, что устойчивость к коррозии зависит и от формы объектов. Аэродинамические свойства, то есть обтекаемость элементов конструкции, играют важную роль в скорости отвода влаги с их поверхностей и испарении. Этот фактор напрямую влияет на продолжительность и активность коррозионных процессов.

В проектировании металлоконструкций применяется также понятие «слитность сечения», подразумевающее соотношение периметра сечения к его площади. При изготовлении несущих конструкций эскалаторов часто используют более простые и экономичные материалы, например, листовой прокат для коробчатых конструкций, уголки, швеллеры, двутавры и прочий сортамент. Однако такой подход может существенно снижать устойчивость конструкции к коррозии, так как эти материалы изначально имеют конструктивные недостатки, которые могут усиливать коррозионные процессы.

В ходе моделирования процесса коррозии важное значение приобретает следующий параметр – коэффициент слитности сечения β . Этот параметр служит для оценки устойчивости сечения к коррозии и вычисляется по формуле [41]:

$$\beta = \frac{F}{0,383 \cdot P}, \quad (40)$$

где F – площадь поперечного сечения элемента конструкции;

P – наружный периметр этого сечения;

0,383 – коэффициент устойчивости к коррозии сечения из уголка 75x75x8 ГОСТ 8509-93, принятого за базовую единицу измерения.

Предварительная оценка скорости коррозионных изменений в металлоконструкциях эскалаторов имеет решающее значение для принятия своевременных решений по предотвращению их выхода из строя и управлению ресурсом оборудования [2, 102].

Выбор метода математического моделирования как инструмента для прогноза коррозионного процесса требует внимательного изучения нескольких ключевых критериев. В процессе построения модели необходимо идентифицировать первостепенные характеристики и параметры, определяющие поведение системы, осознать влияющие на них явления и факторы, и дать им подробное описание. Важно также учесть, что объект исследования является плохо организованной системой в условиях стохастической неопределённости [4, 40, 46, 65].

Представим первоначально в общем виде уравнение накопления усталостной поврежденности [85]

$$\frac{d\mu}{d\tau} = F(\sigma, \mu, \tau), \quad (41)$$

где μ – мера аккумулируемой усталостной повреждаемости;

τ – время эксплуатации металлоконструкции;

σ – значение уровня повреждающих напряжений.

В контексте исследования процессов усталостного разрушения материалов под воздействием внешних условий, модифицируем выражение (40), интегрируя в него параметр K_a . Этот параметр позволит учесть такие факторы, как коррозионный износ материала, влияние адсорбционных свойств на его механические характеристики, а также питтинговую коррозию [72, 85].

Иными словами, изменение микроструктуры металла под воздействием этих факторов можно выразить как:

$$\frac{d\mu}{d\tau} = F(p, \mu, \tau) \cdot f(K_a), \quad (42)$$

Следуя поставленной цели для точной количественной оценки влияния агрессивной среды на усталостное разрушение материала, опишем математически параметр K_a , отражающий множественное воздействие коррозионных процессов.

Согласно [42] коррозия, имеющая начало на внешнем слое конструктивного элемента, со временем распространяется вглубь. Эту особенность будем учитывать через показатель s , который служит

количественной мерой уменьшения металла в поперечном сечении элемента по контуру.

Величину глубинного показателя коррозии можно определить, воспользовавшись формулой (30). Эта простейшая математическая модель позволяет установить среднюю скорость коррозионного процесса, базируясь на измерениях толщины компонентов конструкции при проведении диагностического анализа. Так, зная значение глубинного показателя коррозии s на определенный момент времени τ , становится возможным вычислить общее воздействие коррозии на конструкцию за интересующий период.

Для дальнейшего прогнозирования развития коррозии выражение (30) примет вид

$$s_i = s + v \cdot (\tau_i - \tau), \quad (43)$$

где $\tau_i > \tau$

Результатом наблюдений и анализа статистики по эксплуатации металлических конструкций в средах с разной степенью коррозионной активности [47], был сделан вывод, свидетельствующий о том, что процесс коррозионного изнашивания с достаточной степенью адекватности описывается формулой (23). Однако внимание акцентируем на глубинном показателе коррозии, который и будет определять коррозионные потери по глубине в сечении элемента конструкции, тогда:

$$s = K \cdot \tau^n, \quad (44)$$

Коэффициенты K и n определяются экспериментально для данного материала, при этом коэффициент K , соответствующий средней скорости коррозии за первый год, также определяет и агрессивность среды, коэффициент n , учитывающий замедление процесса коррозии – коррозионную стойкость материала. Однако на данном этапе представленные модели (43) и (44) не дают возможности проследить влияние аэрохимического воздействия среды.

Установление зависимости параметров K и n от аэрохимических показателей агрессивной среды, дает возможность устранить данный недостаток, для чего приравняем выражения (43) и (44), тогда

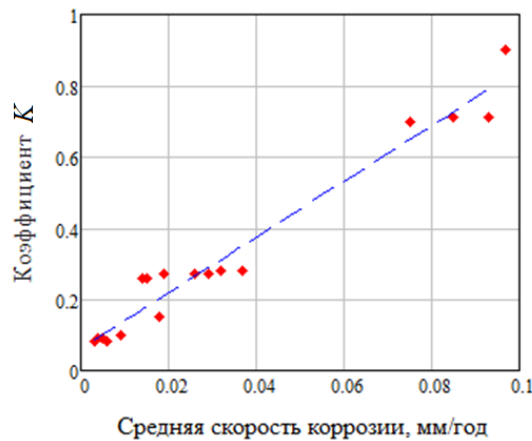
$$v \cdot \tau = K \cdot \tau^n, \quad (45)$$

Тогда в результате преобразований получим

$$n = \log_{\tau} \left(\frac{v}{K} \right) + 1, \quad (46)$$

Из анализа уравнения (46) 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 3.6) [28] с учетом того, что коэффициент K ограничивается пределом от 0,05 до 0,9:

$$K = 0,063 + 7,831 \cdot v \quad (47)$$



♦♦♦ - экспериментальные точки; — - установленная зависимость

Рисунок 3.6 – Определение коэффициента K

В результате получаем математическую модель, учитывающую большее число факторов моделируемого процесса, что позволяет более точно прогнозировать диагностируемые параметры коррозии.

$$\begin{cases} s = K\tau^n \\ n = \log_{\tau} \left(\frac{v}{K} \right) + 1 \\ K = 0,063 + 7,831 \cdot v \\ v = (0,362 \cdot \ln(C + 68,066) - 1,526) \cdot k_{\varphi} \end{cases} \quad (48)$$

В сравнении с моделью (44), модель (48) отличается большей универсальностью. Она позволяет уже на раннем этапе оценить воздействие

отдельных компонентов среды на процесс. Это значительно расширяет спектр возможностей применения данной модели.

3.6 Уточнение модели развития коррозионных дефектов с учетом локальных дефектов (питтингов)

Как было указано ранее, геометрические характеристики металлических конструкций, такие как как слитность сечения и аэродинамические качества в виде обтекаемости элементов конструкции, играют существенную роль в прогрессировании коррозионных процессов [31].

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 (рисунок 3.7).

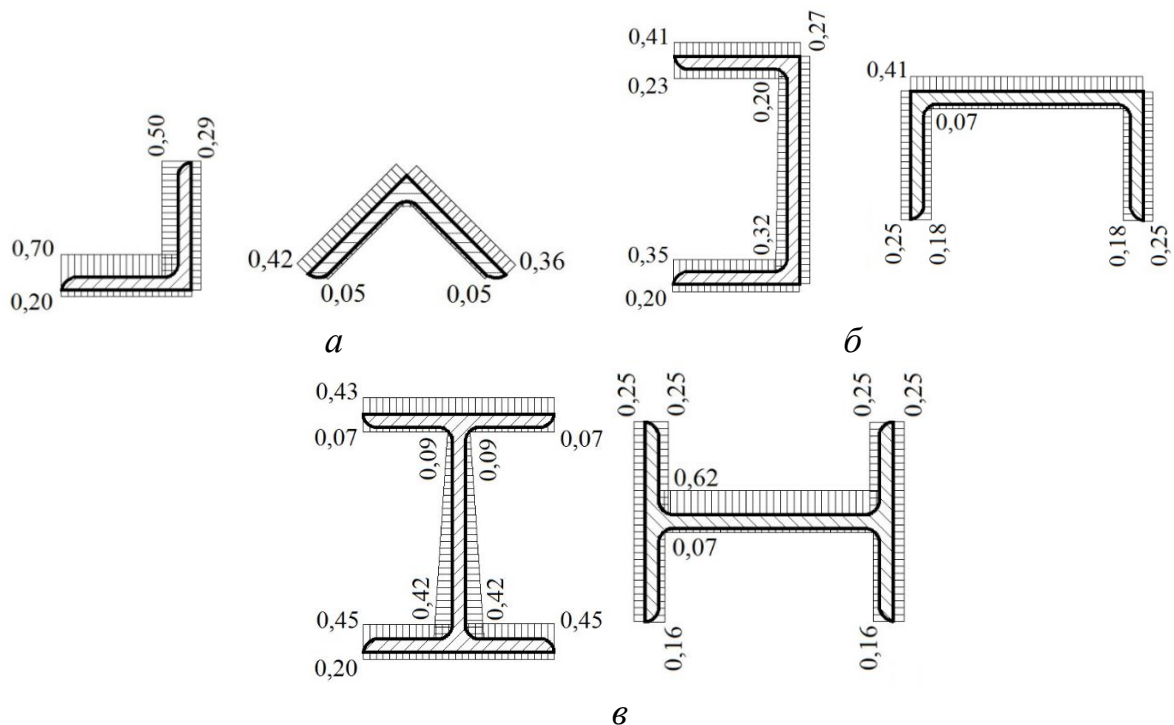


Рисунок 3.7 – Значения скоростей коррозии по периметру сечения стальных профилей при изменении их положения в пространстве [81], мм/год:
a – равнополочного уголка, *б* – швеллера, *в* – двутавра

Очевидно, что непредусмотренные ориентации профилей в пространстве могут влиять на их функциональность, но в данном контексте исключительно рассматриваются темпы прогрессирования коррозионных процессов.

Распределения скоростей коррозии (рисунок 3.7) на профилях при изменении их пространственной ориентации позволяет сделать вывод, что серьезное внимание следует уделять горизонтальным поверхностям, обращенным вверх, а также вертикальным поверхностям, особенно в местах, где они соединяются или примыкают друг к другу. В таких локациях наблюдается тенденция к увеличению скорости коррозии вследствие скопления и задержки влаги.

В процессе адаптации модели для отражения влияния конструктивных особенностей профилей и их размещения в пространстве на скорость и характер коррозии, введем дополнительный параметр. Этим параметром является коэффициент конструктивного исполнения $k_{ки}$, который представляет собой показатель предрасположенности конструктивного элемента к коррозии с учетом его расположения в пространстве.

Примем значение коэффициента $k_{ки}$ равным 1,0 для наиболее уязвимой к коррозии поверхности, что будет являться сравнительным эталоном для оценки других поверхностей конструкции. В соответствии с этим, коэффициенты для прочих поверхностей будут вычислены пропорционально исходя из их коррозионной стойкости по сравнению с наиболее уязвимой зоной.

Для случаев, когда вертикальные поверхности подвергаются коррозии с обеих сторон, или в местах соединения их с горизонтальными плоскостями, коэффициенты $k_{ки}$ для каждой поверхности будут суммироваться. Это гарантирует, что модель будет учитывать более широкий диапазон скоростей коррозионного разрушения в зависимости от зоны профиля.

Этот способ по определению $k_{ки}$ подходит и для сварных профилей, изготовленных из листового материала [27, 31].

С целью усовершенствования математической модели (48), интегрируем новый параметр, отличный от показателя глубины коррозии s – глубину

деградации материала δ , отображающий динамику величины коррозионного износа.

Исходя из ранее указанной тенденции замедления коррозии со временем, модель также дополняется коэффициентом пассивности $k_{\text{п}}$, учитывающим этот эффект. Допустим, δ в первый год использования считается равным δ_1 . Тогда изменения в глубине деградации со временем можно определить как:

$$\delta_{\tau} = \delta_1 \cdot (\tau - 1) \cdot k_{\text{ки}} \cdot k_{\text{п}}. \quad (49)$$

Коэффициент пассивности $k_{\text{п}}$ в первый год будем считать равным 1,0. При $\tau > 1$, $k_{\text{п}}$ может быть вычислен с использованием эмпирической формулы [31]:

$$k_{\text{п}} = \frac{0,051 \cdot \tau^{0,426} - 0,05025}{0,05 \cdot (\tau - 1)}. \quad (50)$$

Следует учесть, что коррозионный слой в местах концентрации напряжений может быть разрушен под влиянием вибраций или циклических нагрузок, что может ускорять протекание коррозионных процессов [5, 16, 17]. Это означает, что с течением времени значение коэффициента пассивности $k_{\text{п}}$ может снова приближаться к 1,0, особенно в упомянутых условиях эксплуатации.

Добавив в выражение (49) глубину деградации материала в первый год эксплуатации, получим:

$$\delta = \delta_1 + \delta_{\tau} = \delta_1 \cdot (1 + (\tau - 1) \cdot k_{\text{ки}} \cdot k_{\text{п}}). \quad (51)$$

Учитывая анизотропию ржавчины по ее толщине [79], особое внимание необходимо уделить внутреннему подслою. Поскольку физические свойства этого подслоя наиболее схожи с свойствами исходного металла и его удаление представляет сложность из-за ряда характерных технических и производственных ограничений, в процессе определения глубины деградации материала принимается в расчет только эрозия, вызванная отслаиванием или устранением внешних слоев коррозии.

В целом на внутренний подслоя в ржавчине может приходиться от 45% до 54% от ее общей толщины. С увеличением времени протекания коррозионного процесса (или срока эксплуатации), процентное содержание

различных подслоев может изменяться, однако внутренний подслоя остается относительно стабильным [81].

Для учета данного явления в разрабатываемую модель вводится коэффициент $k_{вп}$. Этот коэффициент будет отражать долю внутреннего подслоя в общей глубине коррозионного воздействия, внося коррективы в модель, чтобы обеспечить более точное представление о состоянии металла в процессе длительной эксплуатации.

Используя уточненную информацию, усовершенствуем уравнение (51), включив в него соответствующие коэффициенты. Формула принимает вид:

$$\delta = \delta_1 \cdot (1 + (\tau - 1) \cdot k_{ки} \cdot k_{п}) \cdot k_{вп}, \quad (52)$$

где $k_{вп} = 0,45-0,54$ (меньшие значения следует брать при более высокой степени агрессивности атмосферы).

Согласно выражению (52), коррозия представляется как процесс, который равномерно распределен по времени с тенденцией развития вглубь материала. В контексте металлоконструкций эскалаторов, такая коррозия рассматривается как относительно безопасная для остаточного ресурса, так как обеспечивает предсказуемый и равномерный износ материала.

Однако, локальная коррозия, включая питтинговую, являет собой более значительную угрозу. Это обусловлено тем, что она порождает множество участков с высокой концентрацией механических напряжений, увеличивая риск внезапных разрушений. Питтинги возникают спонтанно и в количестве, которое трудно предугадать. Практика показывает, что, если не воздействовать на уже существующие питтинги, новые обычно не образуются. Агрессивность окружающей среды играет решающую роль в инициации питтинговой коррозии.

При изучении процессов коррозии было установлено, что скорость развития питтинговой коррозии обычно опережает скорость сплошной равномерно развивающейся поверхностной коррозии усредненно в 2–2,5 раза [31, 81, 82]. Это предполагает, что глубина питтинга δ_n может быть определена при использовании следующего уравнения:

$$\delta_{\Pi} = \delta \cdot \frac{k_{\text{по}} \cdot k_{\text{ки}}}{k_{\text{м}}}, \quad (53)$$

где $k_{\text{по}} = 2-2,5$ – коэффициент питтингообразования (большие значения следует брать при более высокой степени агрессивности атмосферы);

$k_{\text{м}}$ – коэффициент материала (для низкоуглеродистых сталей $k_{\text{м}} = 1$).

Дальнейшее уточнение коэффициента питтингообразования может быть осуществлено по эмпирическому выражению [31]:

$$k_{\text{по}} = \frac{1}{(0,239+0,011 \cdot \tau)}. \quad (54)$$

Уравнение (53) наиболее релевантно при скоростях коррозии, превосходящих отметку 0,15 мм/год, поскольку при данных обстоятельствах коррозионный процесс смещается в сторону более локализованных форм разрушения [82].

Математическая модель (48), дополненная выражениями (52) и (53), примет следующий вид

$$\left\{ \begin{array}{l} s = K \tau^n \\ n = \log_{\tau} \left(\frac{v}{K} \right) + 1 \\ K = 0,063 + 7,831 \cdot v \\ v = (0,362 \cdot \ln(C + 68,066) - 1,526) \cdot k_{\varphi} \\ \sigma_{(T)C} = \sigma_{T_0} \cdot e^{[0,00341 \cdot \beta \cdot \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right)]} \cdot \gamma_d \cdot k_t \\ \delta = \delta_1 \cdot (1 + (\tau - 1) \cdot k_{\text{ки}} \cdot k_{\Pi}) \cdot k_{\text{вп}} \\ \delta_{\Pi} = \delta \cdot \frac{k_{\text{по}} \cdot k_{\text{ки}}}{k_{\text{м}}}. \end{array} \right. \quad (55)$$

3.7 Определение особенностей влияния циклических нагрузок и коррозии

Металлоконструкции эскалаторов эксплуатируются в условиях, которые могут значительно отличаться в зависимости от географического расположения и климатических факторов. Изменение сезонов и местные особенности определяют степень агрессивности среды, влияющей на конструкции. Дополнительно, в металлоконструкциях нередко формируются деформации, обусловленные различными факторами, включая нагрузку от пассажиропотока,

вибрацию от движения колесного транспорта, поездов и температурные колебания. Нагрузки, возникающие при этом, в сочетании с процессами коррозионного растрескивания и коррозионной усталости классифицируются на две группы: статические и циклические [123].

Наличие коррозионной среды вносит значительные коррективы в процесс усталостного разрушения элементов металлоконструкций, изготовленных из низкоуглеродистых сталей, в сравнении с сухим воздухом или химически малоактивными средами. Коррозионная усталость в таких случаях может проявляться в виде следующих особенностей [34]:

– отсутствие истинного предела выносливости. На рисунке 3.8 в координатных осях напряжение-число циклов нагружения изображены кривые выносливости сталей: линии 1 соответствует чистая усталость, линии 2 – адсорбционная усталость и линии 3 – коррозионная усталость.

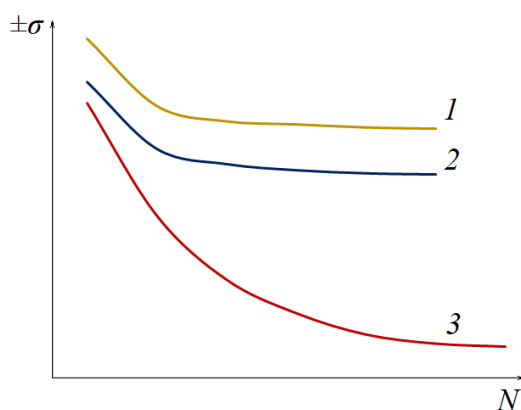


Рисунок 3.8 – Типовые кривые выносливости сталей

На всех линиях отсутствуют ярко выраженные горизонтальные участки. Долговечность металлических конструкций, в том числе металлоконструкций эскалаторов, под воздействием переменных нагрузок, может быть оценена через уровень их усталостной прочности. Усталостная прочность, или предел выносливости, является показателем, который отражает способность материала выдерживать определенное количество циклов нагружения до появления усталостных трещин.

В то время как циклические нагрузки и количество циклов нагружения имеют прямое влияние на усталостную прочность, важно отметить, что

агрессивная коррозионная среда также играет существенную роль. Коррозия может снижать усталостную прочность материала путем инициирования и ускорения процесса трещинообразования. Это обусловлено тем, что коррозионные процессы приводят к нарушению целостности поверхностного слоя, способствуя концентрации напряжений и облегчению начала роста трещин.

Учитывая влияние коррозии на усталостную прочность, введение понятия «условного предела выносливости» становится ключевым для оценки коррозионной усталости. Этот параметр представляет предел выносливости, адаптированный к условиям эксплуатации в коррозионной среде. Иными словами, это модифицированный предел выносливости, учитывающий потенциальное ухудшение характеристик материала в результате его взаимодействия с коррозионной средой.

– отсутствие возможности установления взаимосвязи между условным пределом коррозионной выносливости и механическими свойствами металла, полученными при приложении статических и циклических нагрузок, при нахождении его в воздушной среде.

– многоплоскостной характер разрушения, четко выраженный у низкоуглеродистых сталей в нейтральных коррозионных средах.

Практические испытания образцов из СтЗсп проводились с использованием сервогидравлической испытательной установки BISS Nano UT-01-0025 и металлографического цифрового микроскопа Альтами MET 3T. Многоцикловые испытания на усталость осуществлялись с изменением деформации 0,4–0,6% с амплитудами напряжений цикла 250–280 МПа. Образцы перед началом испытаний проходили предварительное металлографическое исследование, для чего их поверхность была механически отшлифована и протравлена 5%-ным раствором азотной кислоты с целью выявления межзеренных границ. Далее делались снимки одной и той же области после каждого этапа нагружений.

Микроструктура стали Ст3сп, как видно на рисунке 3.9, однородна и включает в себя ферритные и перлитные зерна. На ранних стадиях испытаний на усталость, у ферритных зерен наблюдается образование полос скольжения. С увеличением количества циклов нагружения эти полосы начинают объединяться, одновременно с формированием новых, что приводит к росту их общего количества. Полосы скольжения обычно ориентируются в направлении, перпендикулярном оси приложенной нагрузки.



Рисунок 3.9 – Металлическая поверхность образца:
а – до испытаний; *б* – после 10^3 циклов нагружения;
в – после 2×10^3 циклов. нагружения

Межзеренное разрушение представляет собой предпочтительную среду для инициации коррозионных процессов. Коррозионная активность среды, действуя на микроструктуру материала, меняет его поверхностный рельеф там, где происходит разрушение. Это изменение поверхности материала может привести к увеличению элементов, характеризующихся хрупким разрушением, сколов и возникновению иных структурных дефектов [67, 83].

– увеличение сечения у испытуемых образцов приводит к снижению предела выносливости при усталости низкоуглеродистых сталей. Это явление называют масштабным эффектом. Однако в коррозионной среде у гладких образцов может наблюдаться инверсия масштабного эффекта [27].

– снижение чувствительности изделий из низкоуглеродистой стали, находящихся в коррозионной среде, к микрогеометрии поверхности и концентрации механических напряжений вследствие их анодного растворения.

Металлоконструкции эскалаторов подвержены влиянию коррозионных сред разной степени агрессивности, что приводит к явлению, известному как коррозионная усталость. Это означает, что со временем материалы могут терять

свои свойства под воздействием химического разложения, а также из-за постоянной нагрузки из-за движения элементов эскалатора. Тем не менее, на практике, примеры именно коррозионно-механического разрушения встречаются нечасто или не наблюдаются вовсе. Таким образом, необходимы дополнительные исследования и уточнения вышеизложенных теоретических положений [34].

3.8 Учет временного фактора при оценке состояния металлоконструкций эскалаторов

Точное определение влияния времени на физическое состояние металлоконструкций эскалаторов является сложной задачей. Стандартные усталостные кривые, которые используются для оценки долговечности материалов, получают путем лабораторных испытаний, заключающихся в приложении к образцам повышенных циклических нагрузок на протяжении значительно укороченного временного промежутка, чем действительное время эксплуатации конструкции, что можно выразить как $N > \tau_3$, где τ_3 – время эксплуатации. Очевидно, что эксплуатация металлоконструкций в реальных условиях осуществляется при $\tau_3 \gg N$, например, нормативный срок эксплуатации эскалаторов составляет как минимум 20 лет [20]. То есть результаты, полученные лабораторным путем, для случаев, когда $\tau_3 \gg N$, не могут полноценно отображать исследуемый физико-химический процесс.

Степень влияния временного фактора на состояние реальной металлоконструкции эскалатора не может быть доподлинно определена при помощи диаграмм с типовыми усталостными кривыми, так как их получение осуществляется в лабораторных условиях во время испытания стандартных образцов при высокой интенсивности циклических нагрузок

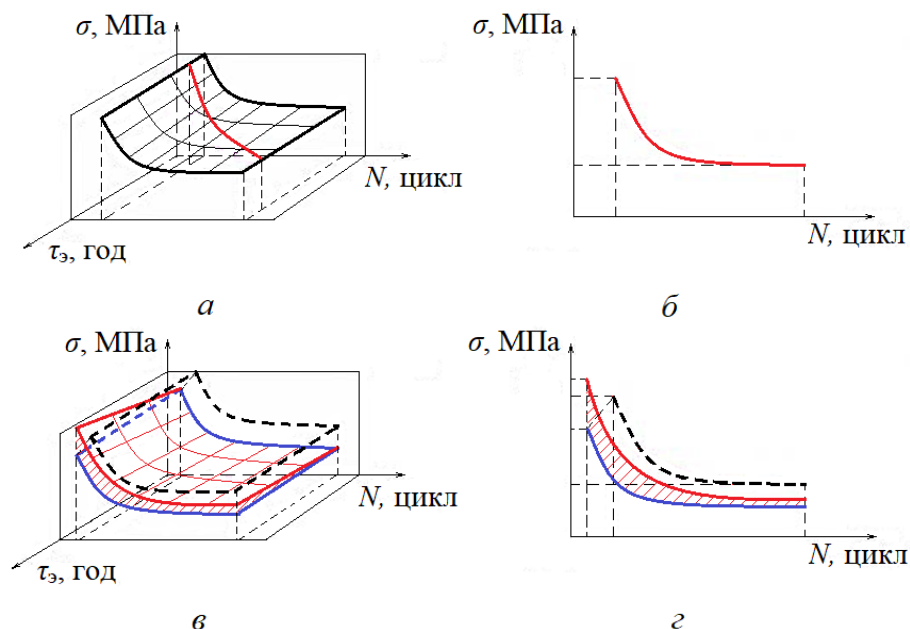
Для обеспечения наглядности представления взаимосвязанности влияния основных факторов коррозии и степени накопления коррозионной усталости в металлоконструкциях эскалаторов возникает необходимость изображать все

коррозионно-усталостные кривые в трехмерных координатах напряжение (нагрузка)-число циклов нагружения-время [41, 42].

На рисунке 3.10 видно, что представленные схемы имеют существенные различия. Примечательно то, что, несмотря на совпадение по количеству циклов нагружения N , основное различие между схемами заключается во временном аспекте их представления.

На протяжении всего своего жизненного цикла конструктивные элементы металлоконструкций эскалаторов, как и любых других подъемно-транспортных машин, подвергаются коррозионному износу, что с течением времени приводит к снижению несущей способности металлоконструкций и возрастанию напряжений в материале при воздействии постоянных эксплуатационных нагрузок (рисунок 3.10) [60].

В результате возникает необходимость в фактическом определении величины остаточного ресурса и организации постоянного контроля уровня приложенных нагрузок с целью сохранения работоспособности конструкции в течение определенного количества циклов нагружения [6, 69].



--- чистая усталость;

— с учетом влияния коррозионного износа;

— с учетом влияния адсорбционной усталости

Рисунок 3.10 – Типовые усталостные кривые:

а, б – чистая усталость, полученная в нейтральных средах;

в, г – усталость с учётом влияния первичных факторов коррозионного воздействия среды

На усталостную прочность материалов оказывает влияние адсорбция поверхностно-активных веществ. Это явление, объясняемое эффектом Ребиндера, становится особенно очевидным при приложении циклических напряжений. На рисунке 3.8 представлены кривые адсорбционной и чистой усталости, полученной в условиях нейтральной среды, которые демонстрируют визуальное сходство. Характерно также то, что в этих кривых нет выраженной горизонтальной части, которая указала бы на ясно определенный предел усталости. Также важно отметить, что значение предела адсорбционной усталости является константным для того или иного материала в отличие от показателей, связанных с коррозионной усталостью. Очевидная подобность между этими кривыми указывает на то, что адсорбционные процессы просто приводят к уменьшению предела выносливости материала, что следует учитывать при его эксплуатации.

При этом результат воздействия адсорбционных процессов можно обратить, восстановив свойства материала до уровня чистой усталости. Для этого нужно предотвратить взаимодействие материала с агрессивными средами, эффективным способом чего является, например, применение лакокрасочных покрытий [43, 50, 57].

Феномен питтингообразования, происходящий в материале, характеризуется образованием микроскопических углублений или ямок на поверхности, которые выступают в качестве концентраторов напряжений. Они становятся начальными точками для возможного формирования и прогрессирования усталостных трещин [122].

Рассмотрим модель Л.А. Сосновского, являющуюся инструментом для анализа начального этапа усталостного разрушения материалов [41, 42]:

$$N_T = -\frac{1}{C_N} \int_{\mu_0}^1 \frac{(1-\mu_{nT})^{m_c}}{\Delta\sigma_n^{m_c}} d(1-\mu_{nT}), \quad (56)$$

где N_T – число циклов на стадии рассеянной повреждаемости;

C_N и m_c – коэффициенты, характеризующие свойства материала и определяемые через его физико-механические параметры;

μ_0 – количественная доля структурных повреждений до нагружения;

μ_{nT} – количественная доля накапливаемых при нагружении усталостных повреждений;

$\Delta\sigma_n$ – значение повреждающих напряжений.

Значение повреждающих напряжений можно определить, воспользовавшись формулой [34, 60, 82]

$$\Delta\sigma_n = \sigma_{\max n} - \sigma_{RK}, \quad (57)$$

где σ_{RK} – предел выносливости.

Предварительный анализ выражения (57) дает возможность сформировать определенные предположения относительно факторов, способствующих увеличению уровня повреждающих напряжений в материале. В их числе можно выделить следующие:

1. Влияние агрессивной среды: если материал находится в контакте с агрессивной средой, то результатом этого может стать ускорение коррозионного износа и, соответственно, увеличение максимальных напряжений $\sigma_{\max n}$, что, следовательно, способствует ускорению процесса накопления повреждений.

2. Адсорбционное воздействие среды: действительно адсорбционное воздействие является значимым аспектом и приводит к уменьшению предела выносливости σ_{RK} .

Особое внимание следует уделить ситуации, когда происходит одновременное изменение обоих этих параметров. Такая комбинация может привести к существенному повышению общего уровня повреждающих напряжений, усиливая риски преждевременного усталостного разрушения материалов [28, 34, 64, 67].

Так как в процессе исследования возникает сложность в определении отдельных реальных характеристик, сделаем допущение, что при наличии микротрещины длиной 0,1 мм критический объем повреждений V_{ny} будет равен 0,001 мм³.

Значения максимально допустимых напряжений, определяемые приложенной внешней нагрузкой, согласно модели (57), могут достигать уровня

предела текучести σ_T . В то же время на механических характеристиках металла сказывается адсорбционное воздействие среды, что проявляется в виде снижения σ_{RK} и σ_T на максимальные 15 % (в условиях сильноагрессивной среды).

На рисунке 3.11 представлена диаграмма, демонстрирующая результаты испытаний образцов стали марки СтЗсп. Сталь подвергалась циклическим нагрузкам на растяжение с асимметричностью цикла $R = 0,3$ (в зависимости от конструкции эскалатора R может меняться от 0,10 до 0,35). Использование диаграммы позволяет делать заключения о долговечности материала, его сопротивляемости усталостному разрушению, а также прогнозировать поведение металлоконструкций, выполненных из стали СтЗсп, при нагружении в реальных условиях эксплуатации.

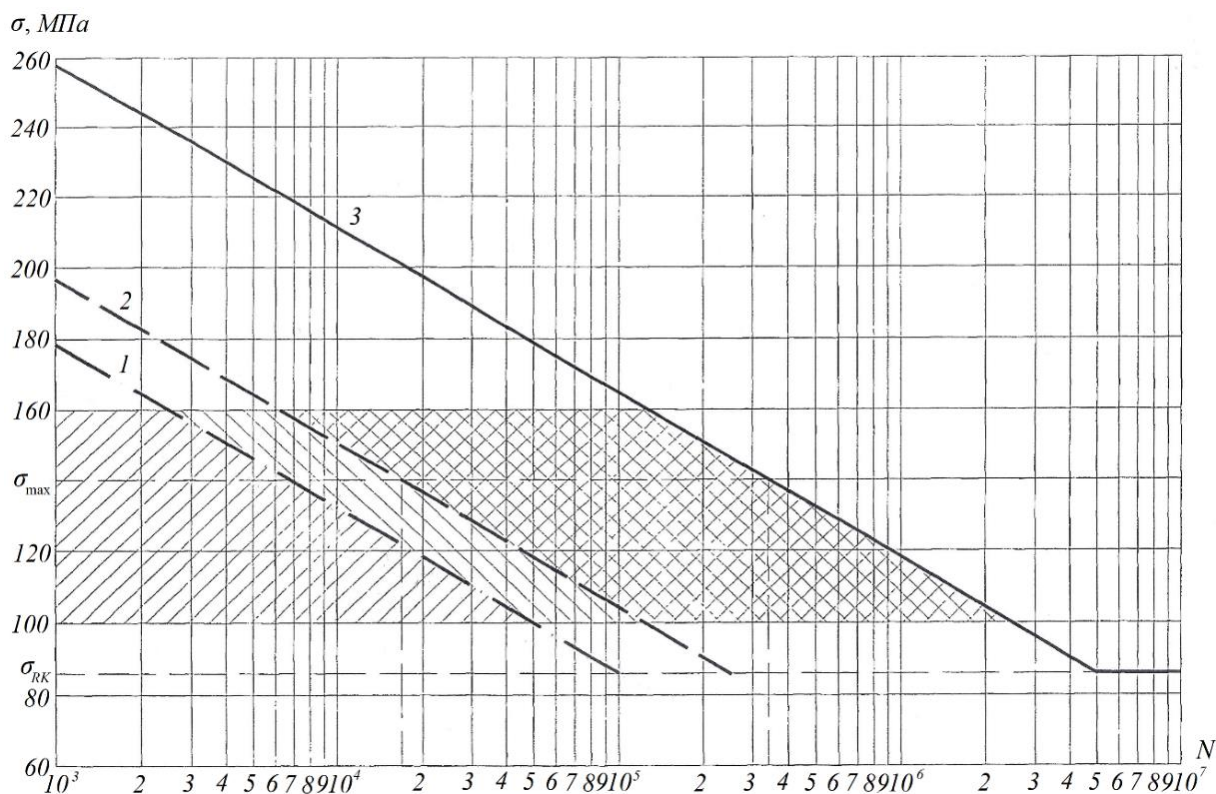


Рисунок 3.11 – Диаграмма усталостных повреждений [62]:

- 1 – линия окончания инкубационного периода усталости;
- 2 – линия окончания периода зарождения и развития субмикроскопических трещин до микроскопических размеров (линия Френча);
- 3 – кривая окончания периода развития микротрещин до макротрещин критического размера

Для анализа темпа накопления усталостной поврежденности воспользуемся выражением

$$v_{\text{уп}} = \frac{V_{\text{нл}}}{N_{\text{т}} \cdot \Delta \sigma_{\text{н}}}, \quad (58)$$

где v_{rp} – скорость накопления усталостной повреждаемости

Используя данные диаграммы усталостных повреждений и выражение (57), можно наблюдать, как эти данные соотносятся с реальным процессом накопления усталостных повреждений в образце во время испытаний в рассматриваемом случае чистой усталости. Для получения значений максимальных напряжений σ_{max} в таком контексте используется линия Френча.

Актуальные численные значения скорости накопления усталостной повреждаемости сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Скорость накопления усталостной повреждаемости при чистой усталости ($\sigma_{RK} = 85$ МПа)

σ_{max} , МПа	197	165	150	118	104
N , 10^3 цикл	1	5	10	50	100
$\Delta\sigma_n$, МПа	112	80	65	33	19
v_{rp} , 10^{-6} мм ³ /(МПа·цикл)	0,00893	0,00250	0,00154	0,00061	0,00053

Для случая, учитывающего адсорбционное воздействие среды на процесс усталости (в условиях сильноагрессивной среды), все показатели уменьшаются на 15 % (см. таблицу 3.3)

Таблица 3.3 – Скорость накопления усталостной повреждаемости с учетом адсорбционного воздействия среды ($\sigma_{RK} = 72,3$ МПа)

σ_{max} , МПа	167,5	140,3	127,5	100,3	88,4
N , 10^3 цикл	1	5	10	50	100
$\Delta\sigma_n$, МПа	95,2	68	55,2	28	16,1
v_{rp} , 10^{-6} мм ³ /(МПа·цикл)	0,01050	0,00294	0,00181	0,00071	0,00062

Анализируя полученные данные в таблицах 3.2 и 3.3 можно сделать следующие выводы: общий уровень повреждающих напряжений для СтЗсп в условиях сильноагрессивной среды (при равенстве ресурсов конструкций для двух рассматриваемых случаев) уменьшается; скорость накопления усталостной повреждаемости различна и при эксплуатации в условиях сильноагрессивной среды увеличивается в среднем на 17,2 %.

3.9 Особенности моделирования при проведении оценки состояния отдельных узлов вспомогательного оборудования машинных залов эскалаторов

Использование традиционных диагностических приборов и методов при проведении контроля технического состояния отдельных узлов, в частности замоноличенных закладных элементов крановых путей в машинных залах эскалаторов, не всегда является возможным из-за отсутствия непосредственного доступа к ним, что и определяет актуальность данного исследования.

Проведение диагностики таких узлов подразумевает наличие комплекса критериев, обозначающих предельные состояния элементов конструкций, в качестве которых могут выступать: уменьшение сверх размеров сечений элементов ниже нормативных по причине протекания коррозионных процессов; формирование и развитие до недопустимых пределов усталостных трещин; наличие сверхдопустимых остаточных пластических деформаций; общая деградация физико-механических свойств материалов и т.д. Сравнение этих критериев с фактически определенными показателями несущей способности дает возможность произвести объективную оценку величины остаточного ресурса [2, 3, 7].

В процессе реального функционирования металлоконструкций эксплуатационное состояние их элементов может испытывать множество непредсказуемых изменений. Эти изменения связаны с развитием люфтов, появлением зазоров в соединениях и сочленениях, прогибами несущих конструкций, приводящими к остаточным деформациям, а также образованием и ростом трещин и других дефектов. Кроме того, проведение модернизации может существенно изменить механические свойства конструкции, вызывающие изменение жесткости отдельных элементов. Это, в свою очередь, вызывает новое распределение нагрузок в системе и меняет общий режим нагружения конструкции

Вследствие этого, любой элемент металлической конструкции может оказаться наиболее восприимчивым и лимитирующим элементом, определяющим эксплуатационный ресурс всей конструкции или машины, и не обязательно это будет тот элемент, который предполагался как таковой в исходной проектной документации.

То есть прямое сопоставление проектных данных для оценки ресурса отдельных элементов без учета изменений, происходящих в процессе эксплуатации, может дать неточные или даже ошибочные результаты. Очевидно, необходим комплексный подход, включающий периодический осмотр, контроль за состоянием конструкции и, при необходимости, корректировка расчетных моделей в соответствии с текущим состоянием конструкции.

В связи с тем, что условия эксплуатации и режимы нагрузок могут существенно варьироваться, необходимо выявлять лимитирующий элемент в каждой металлической конструкции, который играет важнейшую роль в поддержании ее структурной целостности. Для достижения точности в оценке ресурса таких конструкций предпочтительно использовать смешанный подход, включающий как экспериментальные, так и расчетные методы.

Суть этого подхода заключается в измерении фактических напряжений и их отклонений в опасных сечениях элементов, что делается как через теоретические расчеты в соответствии с нормативными документами [110], так и через экспериментальные измерения, в частности через натурную тензометрию [117]. Затем проводится анализ по определению степени воздействия полученных напряжений на величину ресурса элементов конструкции и на их способность выдерживать нагрузки на протяжении долгосрочного периода. Такой подход позволяет не только выявить наиболее слабые места в конструкции, но и более точно предсказать срок ее службы, исходя из реального состояния и износа.

Однако экспериментально-расчетный метод наталкивается на ограничение, связанное с тем, что натурная тензометрия не может быть

применена на замоноличенных закладных элементах крановых путей в машинных залах тоннельных эскалаторов по причине их недоступности.

Альтернативным методом оценки состояния металлоконструкций является вибрационная диагностика, позволяющая на основании анализа колебательных мод определять параметры надежности стержневых элементов конструкции. Этот метод тестовой диагностики [114] предусматривает возбуждение свободных колебаний элемента путем кратковременного ударного воздействия сложной формы. Процесс вызывает отклонение системы от состояния покоя, позволяя исследовать динамические характеристики конструкции.

Изучаемая структура колебаний объекта характеризуется вибропортретом, который формируется на основании трехмерных измерений и представляет собой комплексную картину векторов колебаний в определенной контрольной точке. Для регистрации данных применяются виброизмерительные комплексы, например, Изумруд 8 или Изумруд 16 российской научно-производственной компании ДиаМех [7, 114, 127].

Посредством центрального удара, который реализуется с помощью механического ударника, объекту исследования передается динамический импульс. 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. Максимальную амплитуду ударный импульс имеет при единичном импульсе, при дальнейшем увеличении частоты ее значение начинает уменьшаться (рисунок 3.12).



Рисунок 3.12 – Сообщение механической энергии исследуемому объекту с помощью генератора ударных импульсов.

Чтобы эффективно возбудить собственные колебания в структуре, точки введения импульса и направление его распространения были определены с применением численного моделирования. Для этого использовался специализированный модуль Simulation в рамках системы CAD (компьютерное проектирование) SolidWorks.

Важно также учесть то, что точная оценка состояния объекта не ограничивается лишь моделированием его геометрии. Необходимо также учитывать взаимодействия объекта с его монтажными сопрягаемыми соединениями и окружающей средой [125]. В случае элементов узла подвеса это предполагает учет их непрерывного нахождения под нагрузкой. Шпилечные узлы постоянно поддерживают вес ездового двутавра и при этом испытывают воздействие предварительного натяга резьбовых соединений и нагрузок, приложенных к грузоподъемным устройствам. 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, которым будет подвергаться конструкция в процессе эксплуатации [7, 116].

Для того чтобы сделать условия моделирования затяжки резьбовых соединений более приближенными к реальности, в модель был введен параметр отрицательной температурной нагрузки (рисунок 3.13).

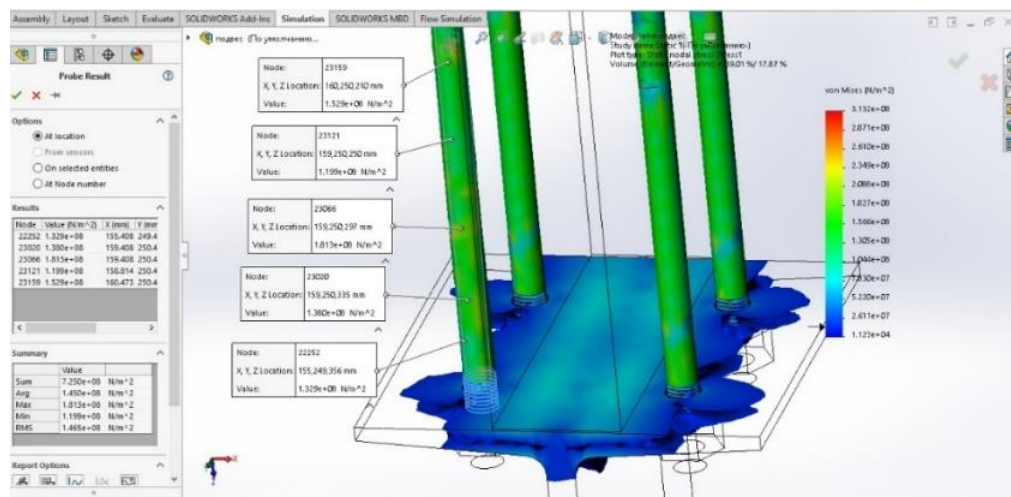


Рисунок 3.13 – Эпюра напряжений шпилечных соединений узла подвеса при предварительном натяжении резьбовыми соединениями

Это имитирует условия, которые приводят к сокращению объема материала шпилек и, как следствие, создает сжимающую нагрузку в шпильках. Также результатом подобного температурного воздействия становится изгибание верхней полки ездового двутавра.

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 3.14).

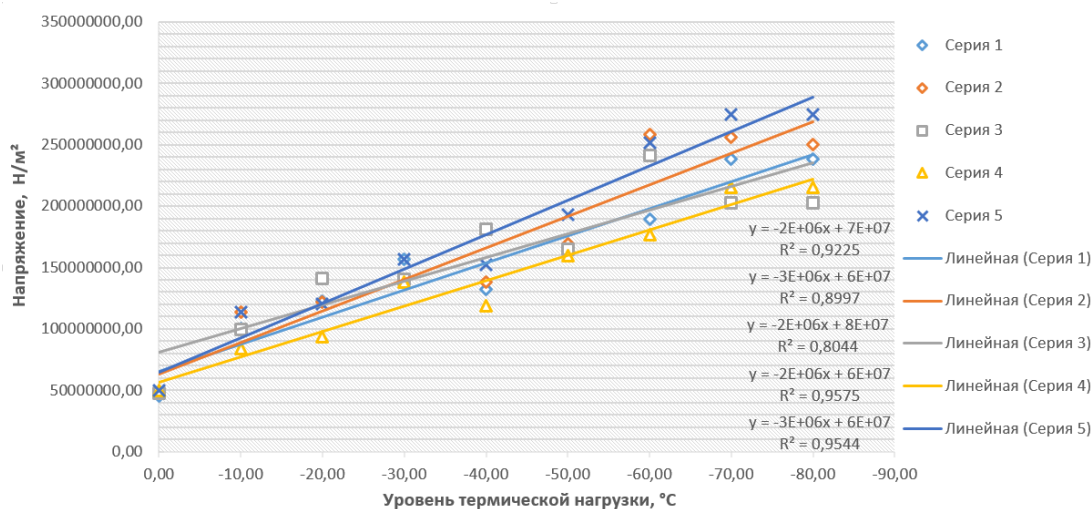


Рисунок 3.14 – Зависимость напряженно-деформированного состояния шпилечного соединения от прикладываемой термической нагрузки.

Анализ резьбовых соединений выявил тенденцию увеличения напряжений, которая может быть объяснена уменьшением площади поперечного сечения шпилек в резьбовой зоне [91]. Кроме того, на дне резьбовой канавки возникают дополнительные точки концентрации напряжений.

В результате приложения рабочей нагрузки к конструкции подвесного узла происходит дополнительное увеличение напряжений в уже подверженных этому зонах. Эти напряженные участки становятся критическими при анализе и диагностировании целостности и технического состояния всей конструкции.

Для повышения эффективности методов импульсного возбуждения конструкций с одновременным сокращением затрат энергии и получения подробных данных о вибрационных характеристиках проводится модальный

анализ, являющийся одним из видов анализа напряженно-деформированного состояния шпилечного узла.

В ходе такого анализа выявляются точки на элементах конструкции, которые при вибрации демонстрируют максимальные амплитуды отклика. Эти точки чередуются с зонами, где амплитуда отклика минимальна или равна нулю. Идентификация этих участков происходит через создание форм мод низших частот, что представляет собой образец первичных собственных колебаний системы.

Чтобы обеспечить точность частотного анализа при использовании метода конечных элементов, необходимо точное воспроизведение условий контакта между анализируемым элементом и сопрягаемыми деталями в самой конструкции. Это включает в себя размещение и соединение элементов в точности, как они будут смонтированы в реальности [15, 98, 126]. В таблице 3.4 приведены первые пять собственных частот элементов с моделями характерных дефектов.

Таблица 3.4 – Таблица собственных частот элемента, Гц

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

Обнаружение дефектов в шпилечных соединениях может определяться путем анализа полученных сканированных частот и позиций установленных датчиков. В случае коррозионного разрушения части шпильки, находящейся в замоноличенной зоне, наблюдается уменьшение амплитудных значений до нуля прямо на границе заделки (рисунок 3.15). В то же время остаточные деформации, такие как изгибы, проявляются в виде пиковых амплитудных значений, заметных в центральной части шпильки. Эти паттерны вибраций помогают точно локализовать различные виды повреждений.

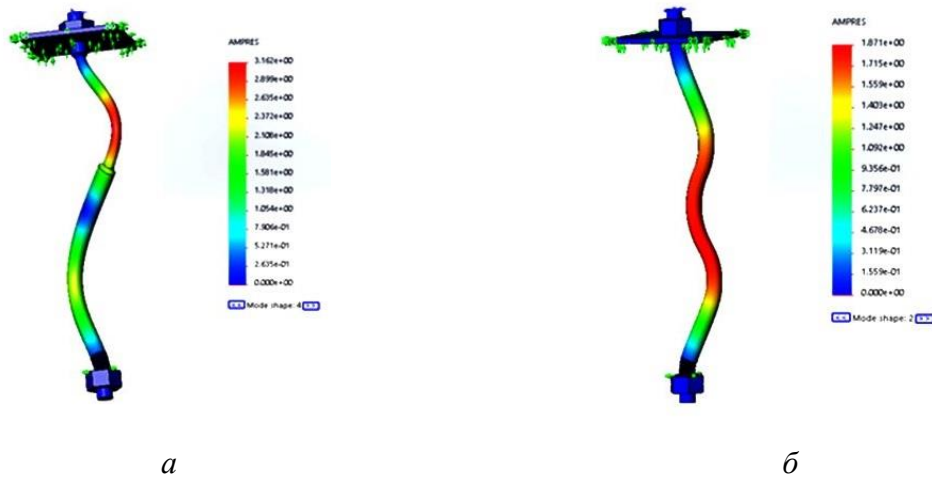


Рисунок 3.15 – Пример моды № 2 колебания элемента с характерными повреждениями:
а – коррозия 30% площади сечения, *б* – остаточная деформация (изгиб)

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 (рисунок 3.16) [107, 111].

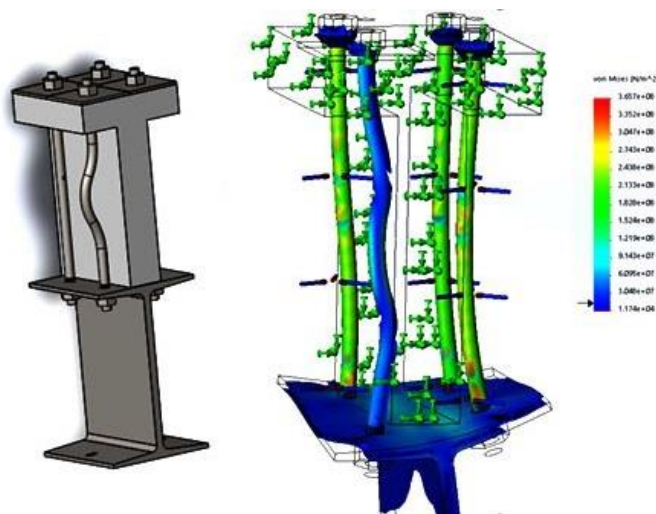


Рисунок 3.16 – Моделирование напряженно-деформированного состояния узла подвеса с поврежденной шпилькой при нагружении узла ударными импульсами

Исследование динамических характеристик узла подвеса при нагружении с использованием симуляции типовых повреждений (рисунок 3.17) позволило определить особенно информативные для диагностики моды. Полученные данные уточняют, что значимая диагностическая информация заключается в модах начиная с шестой и выше, которые находятся в частотном диапазоне от 100 до 500 Гц.

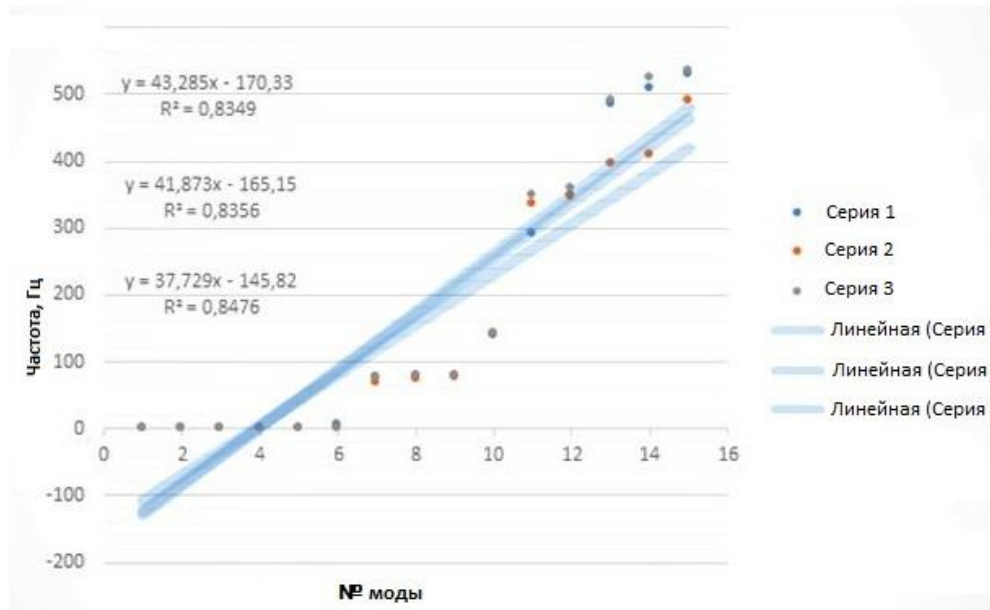


Рисунок 3.17 – Исследование динамики нагружения узла подвеса с моделированием повреждений:
 серия 1 – изгиб с радиусом 100 мм; серия 2 – коррозия 50% площади поперечного сечения;
 серия 3 – трещина 50% сечения

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

Для подробного представления волновых процессов при передаче ударной энергии к исследуемому объекту, применяется вейвлет-анализ [91, 100] с оценкой амплитудной модуляции, фигур Лиссажу, количества резонансных и антирезонансных контуров и модуляции фазы и частоты. Индивидуальность фигур Лиссажу для каждого конструктивного элемента служит инструментом для анализа его жесткости при взаимодействии с сопрягаемыми компонентами. Любое отклонение в этих фигурах может свидетельствовать об изменении геометрических параметров конструкции либо о снижении значения контролируемого параметра материала, из которого изготовлен исследуемый элемент.

На рисунке 3.18 данный анализ применен для иллюстрации бездефектного состояния шпилечного подвеса. Вейвлет-анализ отличается повышенной чувствительностью при обнаружении изменений, но процесс анализа обширного количества визуальной информации требует значительных усилий, и это может ограничивать его удобство и эффективность при использовании в рамках проводимых технических исследований.

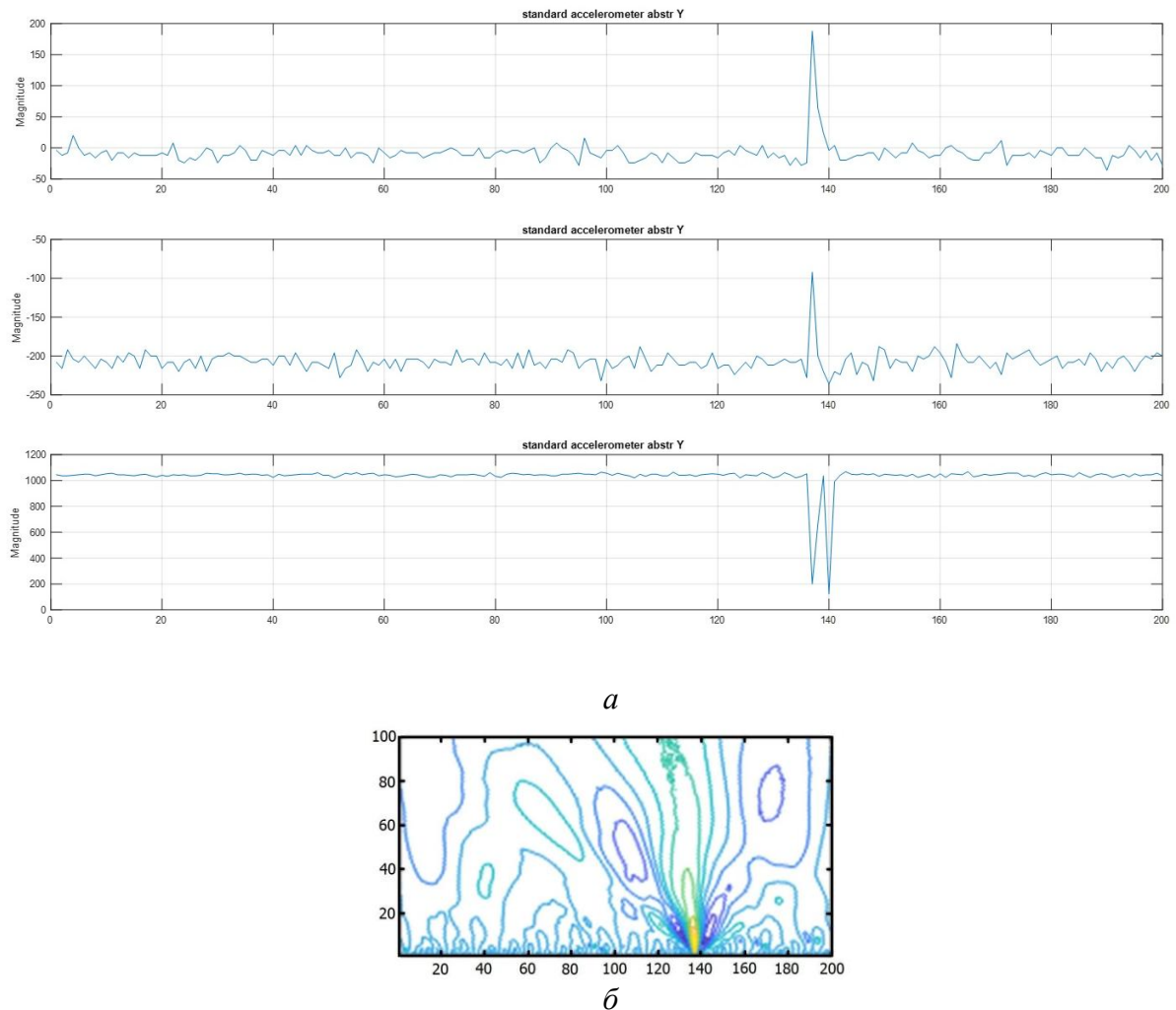


Рисунок 3.18 – Вейвлет-анализ исправного состояния шпилечного подвеса:

a – форма сигнала, соответствующая исправному состоянию,

b – вейвлет-представление вибропортрета сигнала

При проведении вибрационного анализа состояния шпилечного соединения, дополнительным диагностическим аспектом может являться исследование траектории движения контрольной точки в пространстве [99, 101]. Представление данной траектории графически выявляет ее форму в пространстве, которая может быть описана как кривая, соединяющая концы

последовательных положений векторов переменной величины. Когда перемещается контрольная точка качественного элемента подвеса, она создает форму, напоминающую эллипс в пространстве, где длины осей эллипса соответствуют величине максимальных амплитуд колебаний шпильки в перпендикулярных плоскостях. Иллюстративный пример такой орбиты, которая указывает на наличие остаточной деформации элемента в виде изгиба показан на рисунке 3.19.

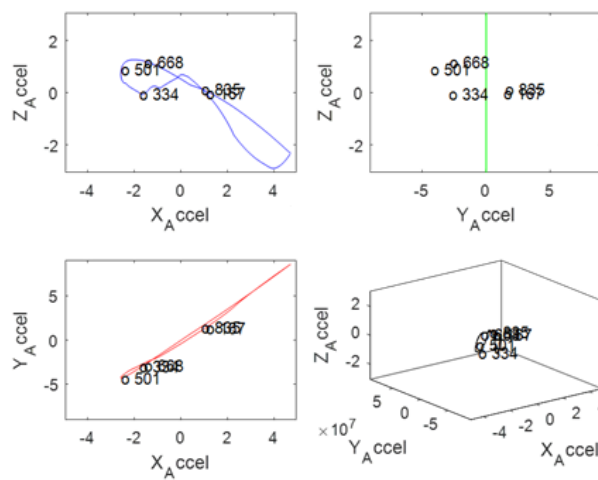


Рисунок 3.19 – Орбита движения исследуемой точки элемента подвеса, поврежденной остаточной деформацией

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.

3.10 Риск-ориентированное моделирование

Для любых технических устройств, в том числе и эскалаторов, анализ риска заключается в определении факторов риска, степени их влияния, вероятности появления и результатов их воздействия [21, 33, 74].

Ошибки, допущенные на любом из этапов – проектирования, производства, монтажа, а также методах оценки технического состояния – могут

значительно повлиять на безопасность эксплуатации эскалаторов. Кроме технических аспектов, необходимо также учитывать человеческий фактор. Он охватывает возможные промахи не только в эксплуатации и техническом обслуживании эскалаторов, но и на протяжении всего жизненного цикла. Поведение пассажиров также влияет на безопасность и может стать причиной непредвиденных ситуаций.

При проектировании эскалаторов особое внимание уделяется безопасности: установленный стандарт допускает вероятность отказа элемента конструкции, приводящего к аварии, не более чем 10^{-4} 1/год. Этот показатель соотносится с техническим состоянием элементов несущей структуры эскалатора. Учитывая, что в реальных условиях могут возникать отклонения в риск-профиле от установленного стандарта, первостепенным моментом является наличие достаточного коэффициента запаса прочности для каждого элемента несущей конструкции [14, 21, 33]. Если анализ показывает, что риск превышает уровень в 10^{-4} 1/год, необходимо произвести корректировку коэффициентов запаса прочности для возвращения к нормативному уровню безопасности.

Обозначим величину риска отказа одного любого конструктивного элемента металлоконструкции $P_0(\tau)$ при одновременном предположении, что наступление их отказов равновероятно.

Расчет $P_0(\tau)$ согласно [21] по следующей зависимости

$$P_0(\tau) = 1 - e^{-\gamma_{\varphi i} \cdot \tau} \quad (59)$$

где $\gamma_{\varphi i}$ – интенсивность отказа одного любого элемента металлоконструкции

Упрощенно $\gamma_{\varphi i}$ может быть определена через произведение интенсивности отказа конструктивного элемента по статистическим данным на относительную оценку значимости произошедшего отказа, которая в свою очередь может быть рассчитана по формуле

$$Z_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^k f_{i1} \cdot N}, \quad (60)$$

где f_i – средняя оценка значимости отказа i -го отказа;

f_{i1} – оценка значимости i -го отказа одним специалистом-экспертом;

N – число экспертов-членов экспертной комиссии;

i – порядковый номер оценки отказа ($i = 1 \dots k$);

k – число отказов.

Для уточнения значений коэффициентов запаса s для каждого элемента металлоконструкции эскалатора необходимо воспользоваться выражением

$$k_{\Pi} = \log_{(1-e^{-r_{\phi i} \tau})} P_0(\tau). \quad (61)$$

Естественно, что риск-ориентированное моделирование повлечет за собой в большинстве случаев увеличение расхода материала и, как следствие, массы металлоконструкции в целом, однако срок службы данных изделий гарантированно превышает указанные в нормативно-технической документации, и при проведении капитальных и иных ремонтов замену несущей металлоконструкции можно не производить.

3.11 Выводы по главе

Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования и математического моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1. Эскалаторы представляют собой одновременно и машину, и сооружение, эксплуатация которых имеет одну неоспоримую специфику – несущие металлоконструкции эксплуатируются в течение жизненного цикла эскалатора без существенных ремонтов и замен. Поэтому возможность определения фактического состояния, а также прогнозная оценка изменения этого состояния является достаточным обоснованием для проведения математического моделирования.

2. В результате сведения всех полученных уравнений воедино, получена совокупная многофакторная прогностическая математическая модель.

$$\left\{ \begin{array}{l} s = K\tau^n \\ n = \log_{\tau} \left(\frac{v}{K} \right) + 1 \\ K = 0,063 + 7,831 \cdot v \\ v = (0,362 \cdot \ln(C + 68,066) - 1,526) \cdot k_{\varphi} \\ \sigma_{(\tau)C} = \sigma_{T0} \cdot e^{[0,00341 \cdot \beta \cdot (\frac{T_0}{T} - 1)]} \cdot \gamma_d \cdot k_t \\ \delta = \delta_1 \cdot (1 + (\tau - 1) \cdot k_{\text{ки}} \cdot k_{\text{п}}) \cdot k_{\text{вп}} \\ \delta_{\text{п}} = \delta \cdot \frac{k_{\text{по}} \cdot k_{\text{ки}}}{k_{\text{м}}} \\ v_{\text{рп}} = \frac{V_{n\gamma}}{N_{\text{т}} \cdot \Delta \sigma_n} \\ s_{\text{п}} = \log_{(1-e^{-\gamma_{\varphi i} \cdot \tau})} P_0(\tau) \end{array} \right. \quad (62)$$

3. Входящие в совокупную математическую модель уравнения проверялись как экспериментально, так по критериям Фишера, Дурбин-Ватсона и Колмогорова-Смирнова, что подтверждает адекватность модели в целом.

4. Разработанная модель учитывает и описывает сплошную равномерную и неравномерную коррозии, локальные виды коррозии (в том числе питтинговую), адсорбционную усталость при одновременном влиянии конструктивного исполнения, сплошности сечений и ориентации тех или иных поверхностей отдельных конструктивных элементов в пространстве.

5. Комплекс уравнений также позволяет моделировать не только внешние, но и внутренние факторы повреждаемости с учетом количества циклов нагружения в период эксплуатации, а также может быть использован на начальном этапе проектирования с целью уточнения необходимых параметров с точки зрения риск-ориентированного моделирования.

6. Взаимосвязь между развитием коррозионных и усталостных повреждений металлоконструкций эскалаторов показывает, что скорость накопления усталостной повреждаемости различна и при эксплуатации в условиях сильноагрессивной среды увеличивается в среднем на 17,2 %.

7. Для шпилечных подвесов машинных залов эскалаторов определены контрольные точки для ввода ударных импульсов и возбуждения собственных колебаний, анализ которых позволяет сделать вывод о возможности их дальнейшей эксплуатации.

ГЛАВА 4 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ

Для обеспечения необходимой реакции при внедрении того или иного вновь разработанного метода или технологии необходимо правильно оценить ряд специфических особенностей, касающихся сфер возможного применения [55].

Вторая и третья главы посвящены анализу, разработке и обоснованию той совокупности математических моделей, которые в данной главе реализуются в виде метода для прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов.

4.1 Определение области практического применения

Интеграция методов безразборной или неразрушающей диагностики в процессы технического обслуживания на предприятиях позволяет преобразовать подходы к управлению состоянием оборудования, переориентировав их на обслуживание по фактическому техническому состоянию. Это предоставляет ряд важных преимуществ, таких как [12, 37, 104]:

1. Обеспечение быстрого доступа к актуальной информации о работоспособности механизмов и машин ведет к уменьшению незапланированных простоев и, как следствие, к повышению общей эффективности на 2-10%.

2. Улучшение качества планирования ремонтных работ благодаря более точному прогнозированию необходимого уровня вмешательства, что приводит к сокращению издержек на обслуживание и увеличению на 25–40% межремонтного периода.

3. Повышение эффективности использования и перераспределения планируемых трудовых и финансовых ресурсов предприятия;

4. Улучшение качества обслуживания, а также обеспечение соответствия стандартам по охране труда, достигаемое благодаря оперативному выявлению и исправлению недостатков, которые могут отрицательно сказаться на функциональности эскалаторов.

5. Экономия энергоресурсов и соблюдение требований экологической безопасности за счет своевременного устранения источников развития тех или иных дефектов, определяющих и влияющих на работу эскалаторов.

Эффективность системы обслуживания, базирующейся на анализе фактического технического состояния, подтверждена в исследованиях [6, 12, 23, 59], особенно в контексте сложности техобслуживания эскалаторов и вероятности возникновения экстренных ситуаций, типичных для крупных транспортных систем. При этом практическое проведение экспертизы состояния отдельных единиц и прогнозирования ресурса металлоконструкций эскалаторов в целом возможно с использованием проверенных методов, доказавших свою результативность в реальных условиях.

Важно отметить, что особый интерес представляет применение этих методов в специализированных организациях, чья задача – контроль соответствия эскалаторного оборудования требованиям стандартов и норм безопасности, регулируемым российским законодательством, в контексте промышленной безопасности. Это подразумевает, что организации, занимающиеся техническим освидетельствованием, могут успешно внедрить эти методики для повышения качества и точности своих экспертных оценок.

Проведение экспертизы промышленной безопасности эскалаторов подразумевает фактическое определение технического состояния металлоконструкций с последующей прогнозной оценкой остаточного ресурса с использованием соответствующих специализированных графических или математических зависимостей.

4.2 Оценка напряженно-деформированного состояния металлоконструкций эскалатора

Ключевым элементом комплексного обеспечения безопасной эксплуатации эскалаторов является своевременное и качественное техническое освидетельствование всех входящих в его состав компонентов, в том числе несущих металлоконструкций, что является критически важным для функционирования всей системы [100, 101].

Разработка единого унифицированного метода по прогнозированию остаточного ресурса несущих металлоконструкций эскалаторов представляется сложной задачей из-за уникальности конструктивных особенностей и разнообразия принятых конструкторских решений даже в рамках одного типа эскалаторов. Такое многообразие требует индивидуального подхода к каждому случаю с учетом инженерного опыта специалиста, осуществляющего обследование металлоконструкций [36, 84].

Необходимо признать, что такой подход к оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций в некотором роде может нести в себе элементы субъективности, так как выбор контрольных точек для анализа может быть выполнен без явной очевидности и максимальной точности. Тем не менее, чтобы повысить достоверность количественных измерений, можно использовать более обширную сеть контрольных точек, по сравнению с тем, что предлагают автоматизированные системы проектирования (САПР). Это дает возможность создавать и использовать упрощенные методики для контроля напряженно-деформационного состояния и определения остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов, особенно со сверхнормативным сроком службы.

Исследование состояния эскалатора обнаруживает множество взаимосвязанных факторов: от тех, что связаны с его конструктивными особенностями, до технологических и операционных аспектов эксплуатации. Результатом их взаимодействия является сложная схема распределения нагрузок

по несущей конструкции в целом. Итог такого распределения может быть абсолютно неожиданным: одни элементы могут работать в легком режиме, другие – в среднем или возможно даже в тяжелом режиме, что также определяется напряженно-деформированным состоянием и величиной скорости накопления повреждений. С течением времени при воздействии коррозии происходит уменьшение поперечных сечений элементов металлоконструкции. Этот процесс, наряду с возрастанием структурных дефектов и учетом числа циклов нагружения, способствует постепенному уменьшению их несущей способности. Соответственно, это увеличивает риск отказа отдельных элементов и в дальнейшем может привести к общему выходу из строя несущей металлоконструкции эскалатора.

Для понимания в количественном отношении степени накопления повреждений необходимо контролировать не только текущее состояние основного металла во время эксплуатации, но и иметь фактические данные по исходному состоянию для возможности их сравнения и последующего анализа [35].

Для анализа изменений, связанных с усталостью структуры основного металла, применяется метод, где ключевым показателем выступает коэрцитивная сила H_c [59]. Данный параметр позволяет достаточно корректно оценить уровень остаточных деформаций металла, которые возникают вследствие как статической, так и переменной (циклической) нагрузок на элементы металлоконструкции.

Коэрцитивная сила служит надежным индикатором и позволяет разделить эксплуатационный цикл металлических конструкций эскалатора на три временных периода: надежный, контролируемый и критический.

В течение надежного периода, конструкционный металл функционирует в пределах упругой зоны, где максимальные напряжения не превышают установленный для конкретного типа металла предел пропорциональности. Это значит, что в данных условиях металл сохраняет свои начальные качества и не подвергается остаточной деформации. Контролируемый период связан с

достижением значений напряжений в отдельных элементах конструкции предела текучести и локализацией пластических деформаций наряду с наличием упругих деформаций. Критический режим характеризуется тем, что значения максимальных напряжений в силу накопления повреждений могут превышать предел текучести и отдельные конструктивные элементы начинают работать в зоне упругопластических или пластических деформаций [59].

Для определения значений H_c используется коэрцитиметр КРЦ-М-2 (или любой иной аналог, обеспечивающий необходимую точность измерений). Это устройство обеспечивает возможность различать механические характеристики и структурное состояние различных марок конструкционных сталей по значению коэрцитивной силы на разных фазах диаграмм нагружения – упругой, упругопластической и пластической. Наличие надлежащей методики может позволить произвести оценку остаточного ресурса металлоконструкций.

В общей металлоконструкции эскалатора выделяются следующие части (зоны) [50, 73]: натяжная станция, наклонный ход, приводные станции и опоры главного вала. Каждая часть при этом состоит из одного или нескольких участков.

Ферма натяжной станции включает в себя опору натяжной каретки и нижний криволинейный участок, соединенные в единую металлоконструкцию.

Наклонная часть эскалатора собирается из отдельных стандартных секций, в случае если разность уровней не позволяет использовать целое число стандартных секций, добавляется дополнительная (нестандартная) секция. Фермы стандартных и нестандартной секций состоят из вертикальных стоек, жестко связанных между собой поперечными связями.

Металлоконструкция приводной станции состоит из одного или двух горизонтальных участков и переходных участков, несущих криволинейные направляющие.

Фермы приводной и натяжной станций крепятся фундаментными болтами, причем опоры главного вала располагаются на сплошном фундаменте. Отдельные секции наклонной части либо опираются на продольные балки

(прогоны), заделанные в бетонные фундаменты, либо на фермы приводной и натяжной станций, либо составляют с ними общую пространственную конструкцию. У эскалаторов Н-40 и ЭМ секции наклонной части после выверки привариваются к прогонам и одна к другой. К прогонам эскалаторов типа ЛТ привариваются только прокладки и упоры, которыми каждая секция фиксируется в требуемом положении с небольшим зазором между отдельными секциями. Сама же секция к балкам не приваривается. Этим достигается возможность некоторого взаимного смещения ферм при возникновении строительных осадок, а также разгружение их от дополнительных напряжений.

Отмеченные особенности определяют специфику напряженно-деформированного состояния отдельных частей (зон) эскалатора, поэтому в первую очередь магнитному контролю подвергаются металлоконструкции натяжной станции, наклонного хода и приводной станции. Магнитный контроль на остальных элементах может быть осуществлен по решению экспертной комиссии в зависимости от установившегося работы.

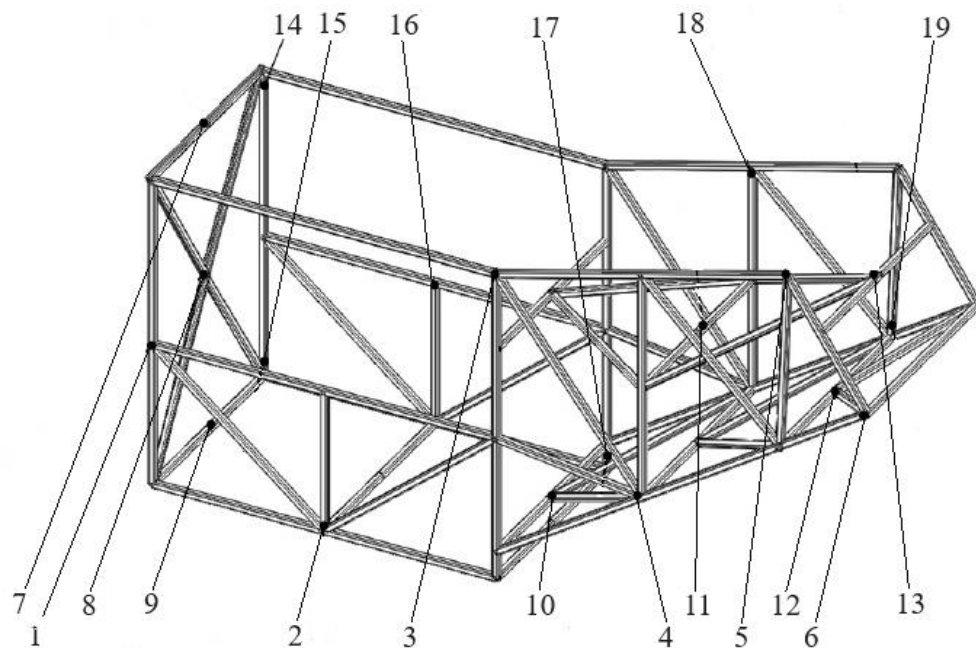


Рисунок 4.1 – Расположение контрольных точек для проведения магнитного контроля в зоне А эскалатора ЭТ-2

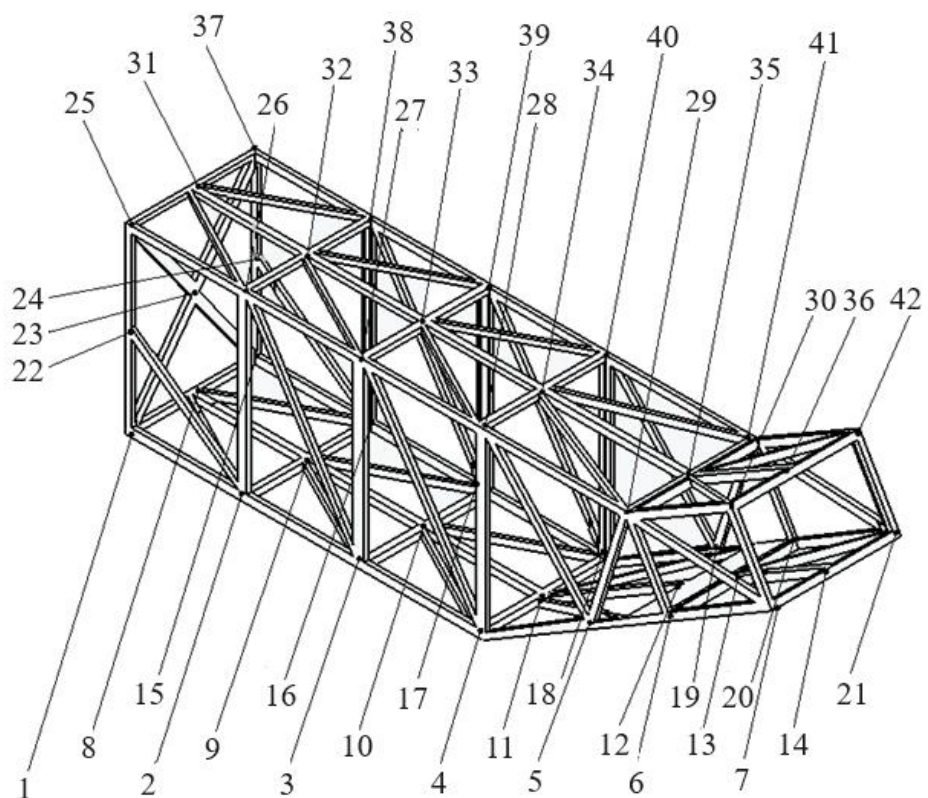


Рисунок 4.2 – Расположение контрольных точек для проведения магнитного контроля в зоне А эскалатора ЛТ-1

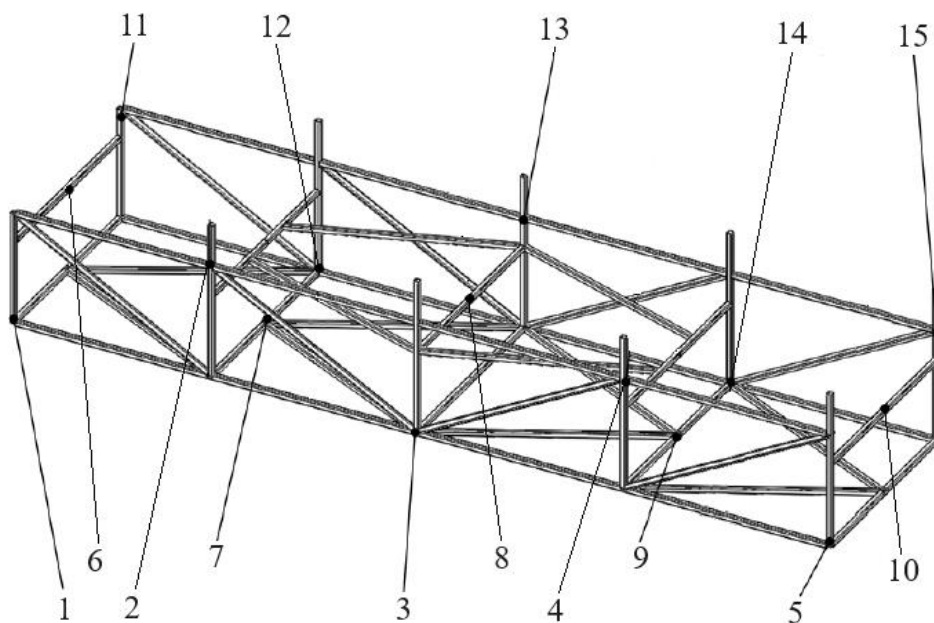


Рисунок 4.3 – Расположение контрольных точек для проведения магнитного контроля в зоне Б эскалатора ЭТ-2

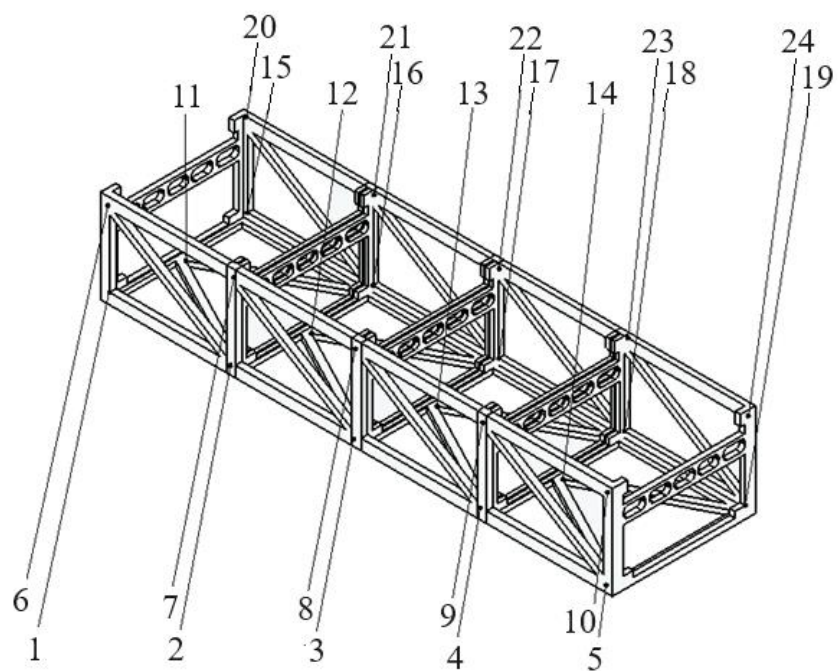


Рисунок 4.4 – Расположение контрольных точек для проведения магнитного контроля в зоне Б эскалятора ЛТ-1

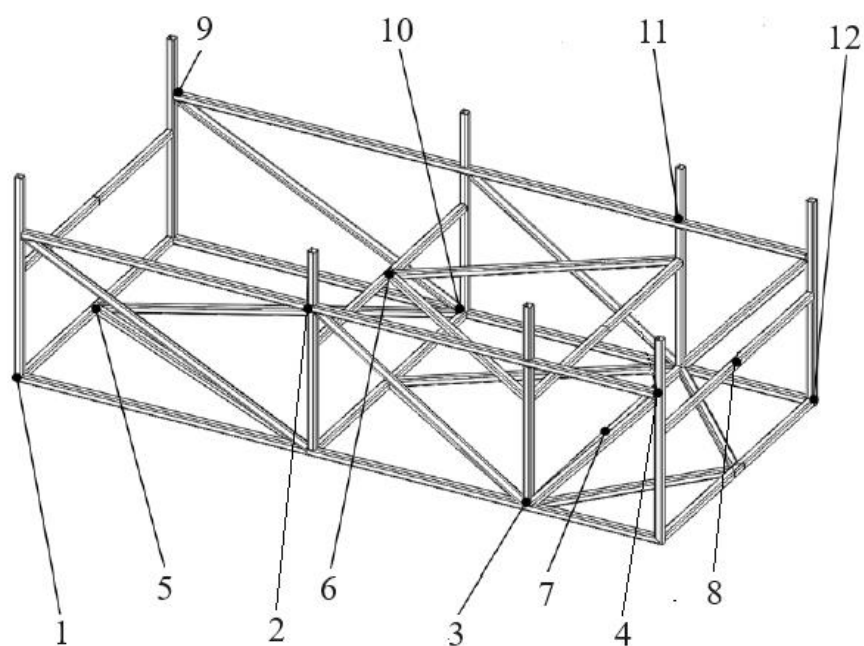


Рисунок 4.5 – Расположение контрольных точек для проведения магнитного контроля в зоне И эскалятора ЭТ-2

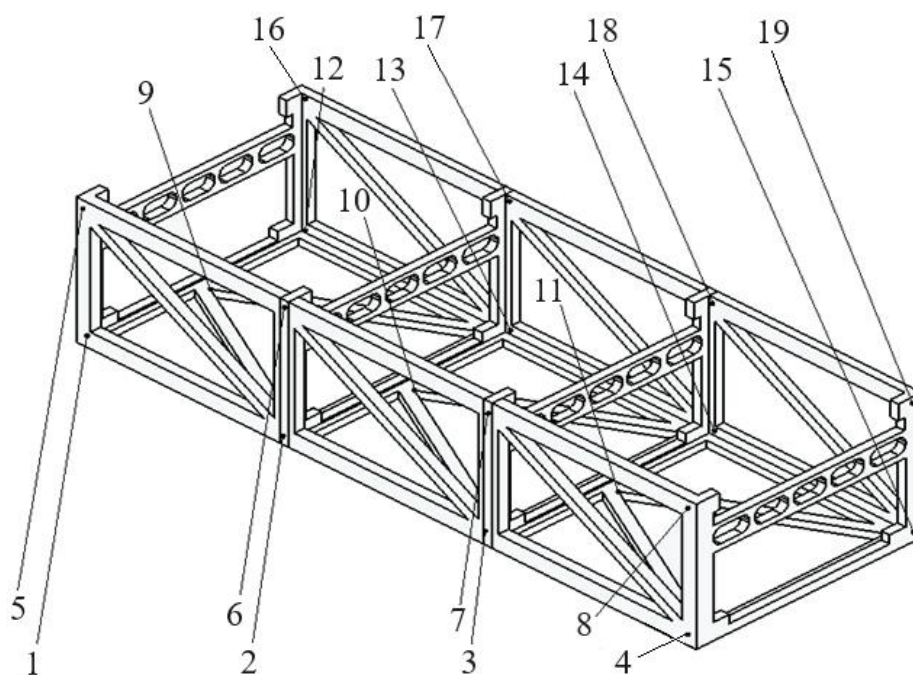


Рисунок 4.6 – Расположение контрольных точек для проведения магнитного контроля в зоне И эскалатора ЛТ-1

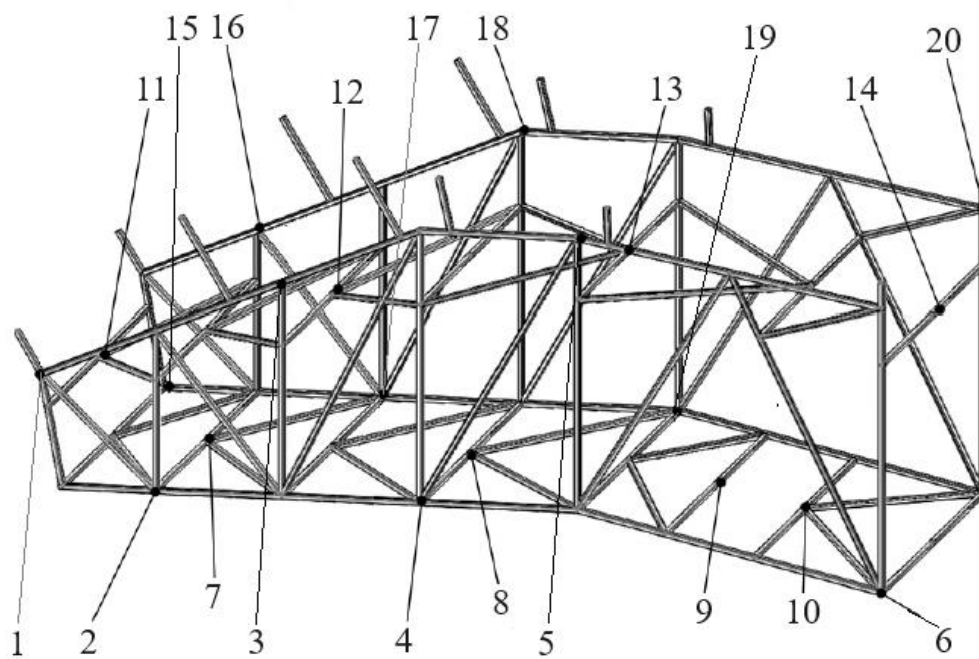


Рисунок 4.7 – Расположение контрольных точек для проведения магнитного контроля в зонах В эскалатора ЭТ-2

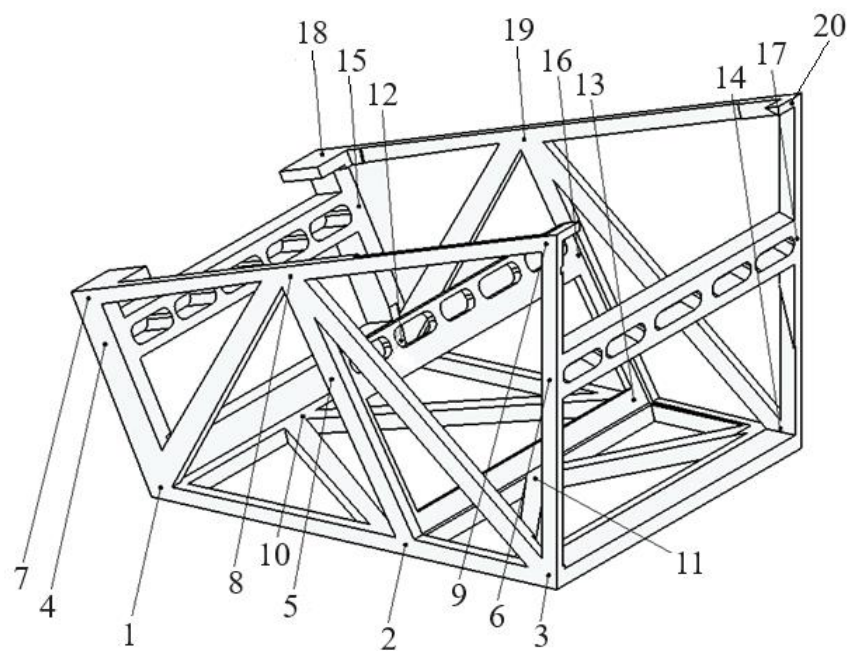


Рисунок 4.8 – Расположение контрольных точек для проведения магнитного контроля в зоне В эскалатора ЛТ-1

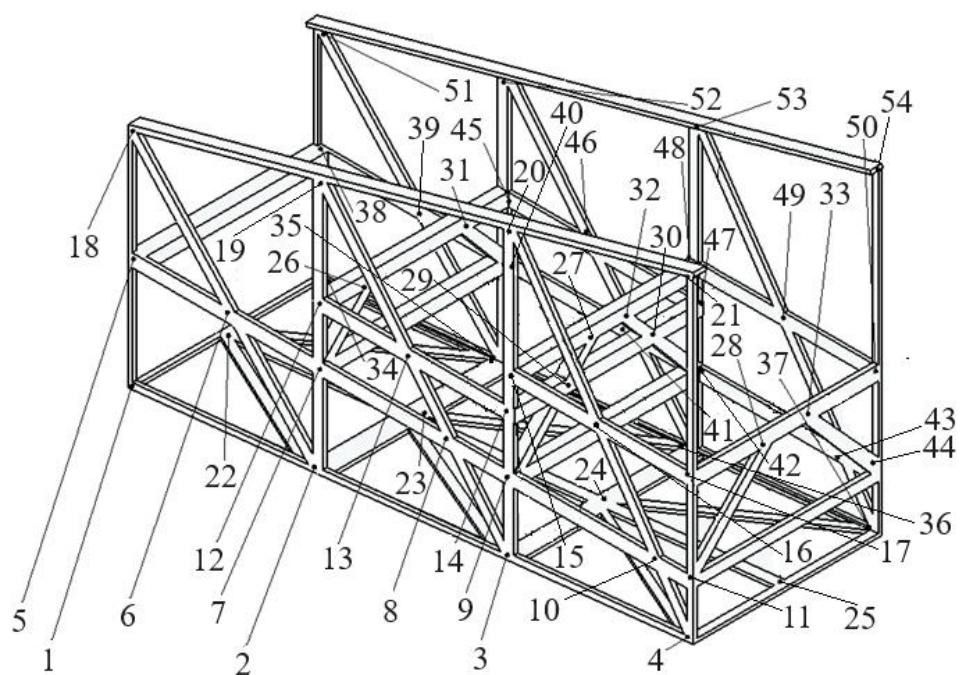


Рисунок 4.9 – Расположение контрольных точек для проведения магнитного контроля в зоне Г эскалатора ЛТ-1

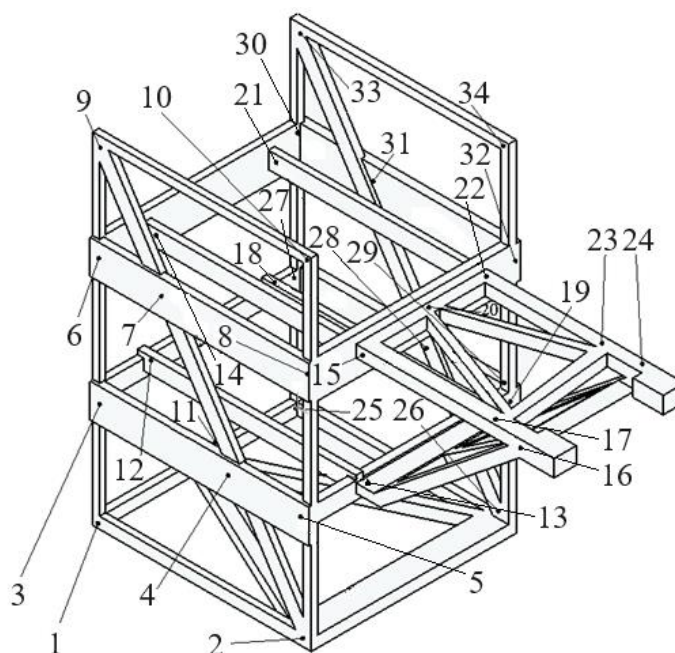


Рисунок 4.10 – Расположение контрольных точек для проведения магнитного контроля в зоне Е эскалатора ЛТ-1

Для уменьшения габаритов по ширине боковины металлоконструкций эскалаторов могут быть изготовлены из листовой конструкционной стали толщиной 16 мм (эскалаторы ЭС-02, ЭС-04К и др.) с местными усилениями для установки главного вала и упора аварийного тормоза (рисунок 4.10).

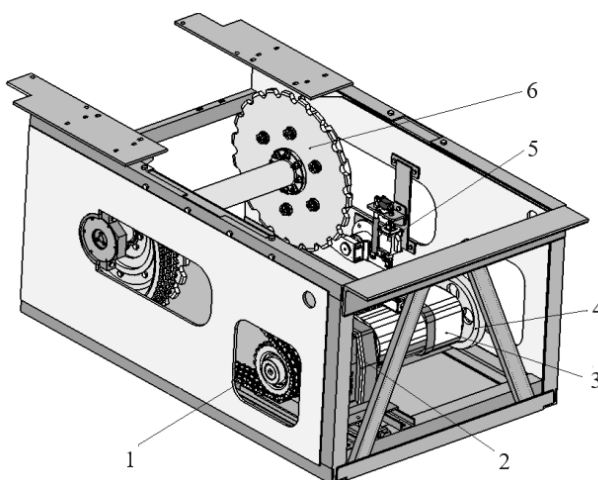


Рисунок 4.11 – Конструктивное исполнение привода эскалатора ЭС04К:
1 – цепная передача; 2 – редуктор; 3 – электродвигатель; 4 – маховик;
5 – упор аварийного тормоза; 6 – главный вал с аварийным тормозом

Для изготовления поперечин, раскосов и стоек используется тот же сортамент, что и в других конструкциях, поэтому определение контрольных точек для проведения магнитного контроля напряженно-деформированного состояния происходит аналогично – определяются наиболее нагруженные узлы, а также зоны, в которых производились сварочные работы.

По результатам проведения магнитного контроля в металлоконструкции определяются звенья с наибольшими значениями $H_c^{\max}$, так как очевидно, что данные элементы будут являться лимитирующими для металлоконструкции эскалатора в целом [59]. Однако, если значения коэрцитивной силы в значительной мере не достигают ее критического значения ($H_c^{\text{кр}} = 6,5 \text{ А/см}$) по зонам, возможно проведение статистического анализа по критерию Стьюдента для малых выборок, на основании чего с необходимым уровнем достоверности определяется величина остаточного ресурса. Своевременное выявление таких звеньев и их превентивный ремонт может существенно увеличить остаточный ресурс.

4.3 Использование коэрцитиметра КРЦ-М-2

Данное устройство предназначено для определения значения коэрцитивной силы посредством измерения силы тока, необходимого для компенсации остаточной магнитной индукции внутри контура. Контур формируется из магнитопровода преобразователя и исследуемого металлического объекта. В процессе подготовки к работе, участок поверхности, расположенный между полюсными наконечниками магнитной системы преобразователя, подвергается серии намагничиваний при помощи токовых импульсов с амплитудой более 2 А до достижения состояния насыщения. Ключевым моментом процесса является точное измерение силы тока, который компенсирует остаточное магнитное поле, что и позволяет рассчитать в дальнейшем в автоматическом режиме величину коэрцитивной силы.

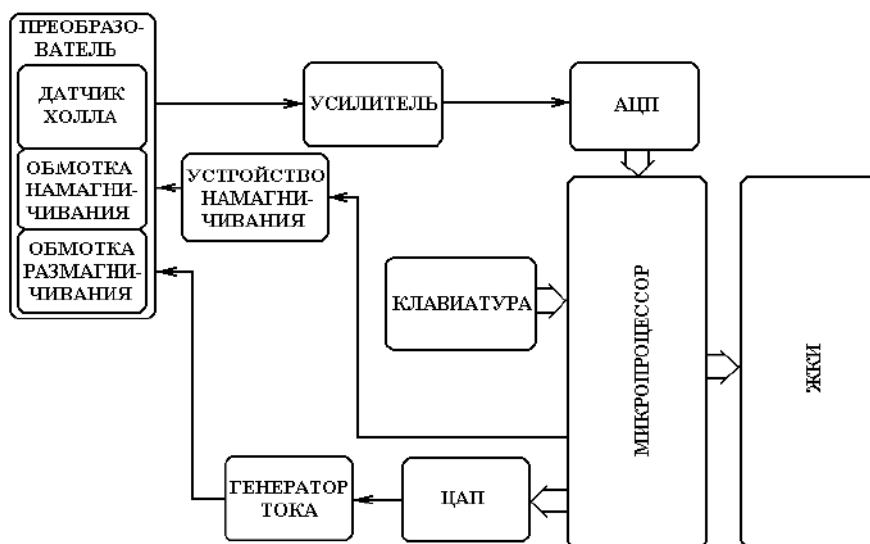


Рисунок 4.12 – Блок-схема коэрцитиметра КРЦ-М-2

Для получения точных результатов при измерении коэрцитивной силы H_c решающее значение имеют несколько параметров. Измерения могут быть искажены из-за различной толщины слоев покрытия, лакокрасочных или специализированных немагнитных покрывных материалов. Также могут повлиять на результат физические характеристики самой поверхности: ее шероховатость и кривизна. Помимо этого, важную роль играет анизотропия физико-механических свойств металла, которая может проявляться по-разному в зависимости от его предварительной обработки и состояния на момент измерений.

Зону контролируемой поверхности, размер которой должен быть не менее 50–70 мм, необходимо предварительно подготовить, удалив с нее влагу, загрязнения, смазку, окисную пленку, ржавчину и т.д. Шероховатость контролируемой поверхности не должна превышать $R_a = 100$ мкм. В случае невозможности обеспечения необходимого значения шероховатости контроль осуществляют на подходящей поверхности соседнего участка, который подвергался таким же силовым нагрузкам в условиях эксплуатации. Кривизна контролируемой поверхности должна позволять плотно установить полюсные наконечники на контролируемое изделие. Полюсные наконечники обеспечивают контроль поверхности с радиусом кривизны более 40 мм. При работе с окрашенными поверхностями рекомендуется делать необходимую отстройку от

зазора, предварительно определив толщину лакокрасочного покрытия.

Перед проведением измерений преобразователь структуроскоп-коэрцитиметр проверяется на работоспособность и калибруется по трем образцам материала с известным значением контролируемого параметра с количеством измерений не менее пяти по каждому образцу. В то же время в памяти прибора находится необходимая калибровка от производителя, которая может быть применена в случае неправильных настроек в будущем.

Мониторинг состояния элементов металлической конструкции эскалатора проводится по двум направлениям: вдоль оси элемента – H_c^x и перпендикулярно ей – H_c^y . Этот подход позволяет определить два важнейших момента, характеризующих состояние слабого звена металлоконструкции: это ориентация наибольших напряжений и их величина.

В процессе проведения измерений преобразователь должен непрерывно контактировать с проверяемой металлической поверхностью. Если во время замеров происходит смещение преобразователя, фиксируемое значение коэрцитивной силы может оказаться заниженным. Измерения, в ходе которых произошло смещение, не принимаются во внимание и классифицируются как недостоверные. Аналогично, любые результаты, не достигающие базового уровня коэрцитивной силы H_c^0 , оговоренного в документации (или паспорте), также не рассматриваются как приемлемые.

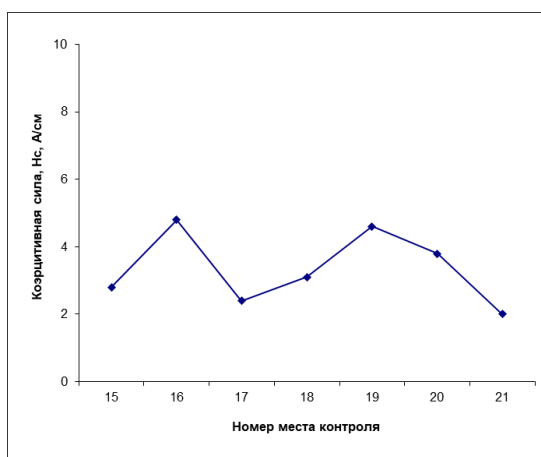


Рисунок 4.13 – Пример оформления результатов измерений

Полученные данные о значениях коэрцитивной силы заносят в специальные таблицы для последующего анализа. Для наглядной визуализации изменения коэрцитивной силы H_c (А/см) вдоль проверяемой металлической конструкции эскалатора строятся графики, позволяющие выявить участки, где значения H_c достигают максимума (рисунок 4.13).

Максимальные значения $H_c^{\max}$ сравниваются с критическими значениями $H_c^{\text{крит}}$ для данной марки стали. После завершения процедуры результаты контроля оформляются в виде Заключения. Подписи руководителя работ и специалиста, ответственного за проведение дефектоскопии, являются обязательными и подтверждают достоверность результатов.

4.4 Обработка результатов измерений

Анализ методов магнитного контроля для определения остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин, а также результатов комплексного обследования эскалаторов [24] позволил определить ряд ключевых точек и установить определенную зависимость между ресурсом металлоконструкции эскалатора и величиной коэрцитивной силы.

На рисунке 4.14 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 4.15 представлена графическая зависимость с учетом разработанной коррозионной математической модели (62), позволяющей также моделировать иные факторы повреждаемости с учетом количества циклов нагружения в период эксплуатации.

Зависимости, представленные на рисунках 4.14 и 4.15 могут быть описаны следующими математическими моделями соответственно, имеющими значения коэффициента корреляции свыше 0,996

$$N = \frac{11361,5444 - 15924,5849 \cdot H_c}{1 - 0,3893 \cdot H_c}, \quad (63)$$

$$N = \frac{-27303,5871}{1 - 0,3887 \cdot H_c}, \quad (64)$$

где N – величина остаточного ресурса в циклах;

H_c – максимальное значение коэрцитивной силы или значение коэрцитивной силы, определенное по критерию Стьюдента для малых выборок.

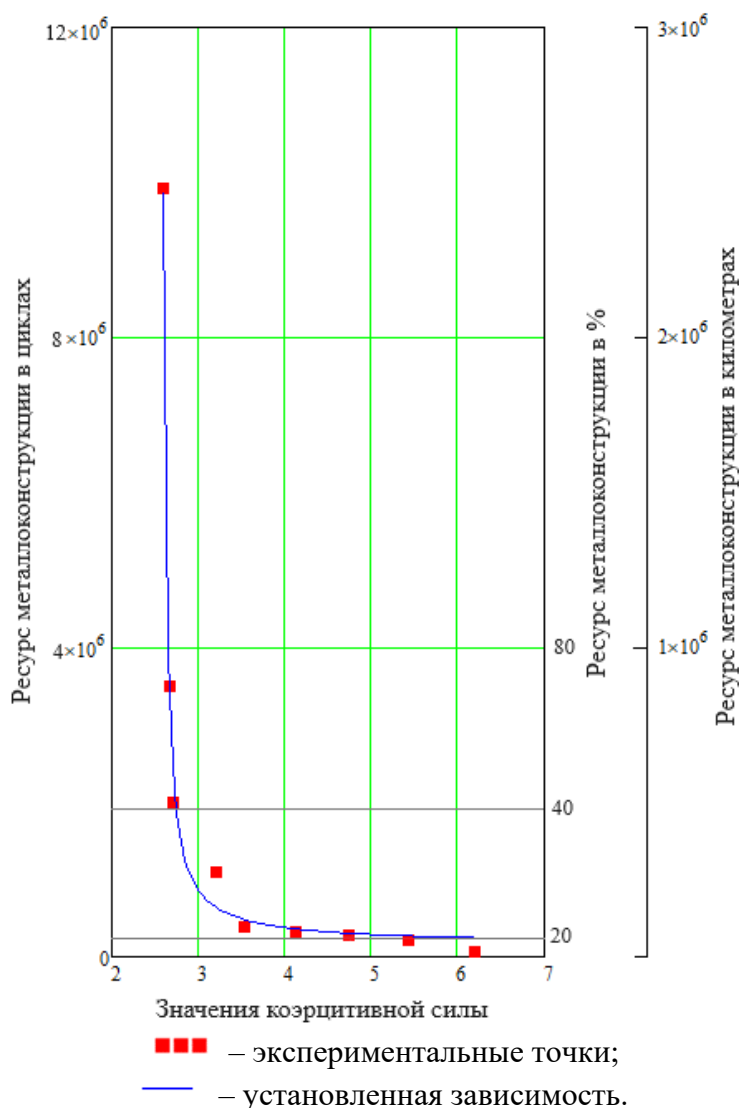


Рисунок 4.14 – График магнитного контроля остаточного ресурса

Однако более подробный анализ полученных графических зависимостей и описывающих их зависимостей показал, что при увеличении значений коэрцитивной силы расчетная величина остаточного ресурса перестает соответствовать данным, полученным экспериментальным путем, что затрудняет возможность применения выражений (63) и (64) для определения величины остаточного ресурса.

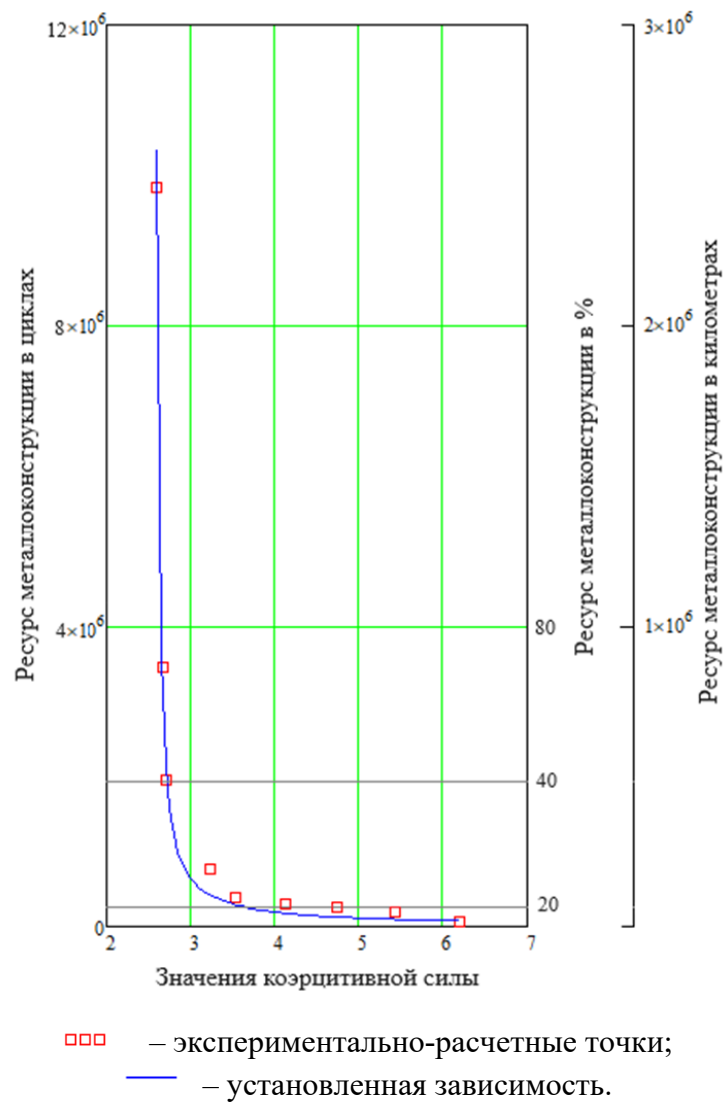


Рисунок 4.15 – График магнитного контроля остаточного ресурса с учетом коррозионной модели

Для устранения данного недостатка 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 рис. 4.12 в соответствии с принятыми диапазонами

$$\begin{cases} N_I = \frac{21163,0719 - 10975,4676 \cdot H_c}{1 - 0,6522 \cdot H_c + 0,1025 \cdot H_c^2} \\ N_{II} = \frac{1 + 3277135,3096 \cdot H_c}{-299,3813 + 108,6487 \cdot H_c} \\ N_{III} = \frac{-6,3543 + H_c}{-0,00006752 + 0,000008876 \cdot H_c} \end{cases}, \quad (65)$$

Модель, описывающая номограмму, представленную на рис. 4.13 с учетом коррозионной составляющей в соответствии с принятыми диапазонами

$$\begin{cases} N_I = \frac{22387,0758 - 11470,6133 \cdot H_c}{1 - 0,6486 \cdot H_c + 0,1011 \cdot H_c^2} \\ N_{II} = \frac{1 + 969707697,1745 \cdot H_c}{-92865,9187 + 33615,6134 \cdot H_c} \\ N_{III} = \frac{19546,8352 - 3041,0255 \cdot H_c}{1 - 0,3330 \cdot H_c + 0,0296 \cdot H_c^2} \end{cases}, \quad (66)$$

Наличие математических моделей, а также значительного объема начальных данных и их всевозможных комбинаций, предполагает создание алгоритма для решения представленных задач с использованием ресурса ЭВМ.

4.5 Программное обеспечение для прогнозной оценки остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов

Для того чтобы исследование объекта было всесторонним и оперативным, предпочтительно использовать комбинацию численного моделирования и аналитических методик. Такой подход позволяет учесть множество различных факторов, влияющих на объект, включая их происхождение и природу. Реализация этих методов в форме программного обеспечения для ЭВМ облегчает процесс формализации задачи и позволяет эффективно обрабатывать входные данные и получать результаты моделирования.

Решение задачи по оценке остаточного ресурса металлоконструкции эскалаторов осуществляется посредством представленной ниже блок-схемы. Непосредственно сама реализована на языке программирования нового

поколения PascalABC.Net (оболочка PascalABC.Net StandardPack версия 3.9.0, сборка 3408 от 31.12.2023)

Одним из преимуществ данного языка является его простота и читаемость, он подчиняется логическим правилам блоков, что делает программы легко воспринимаемыми. Наличие блока описания переменных, помогает обнаруживать ошибки на ранних стадиях, улучшая надежность и стабильность программ. Программа, написанная на представленном языке, может быть скомпилирована и запущена на различных платформах без необходимости ее модификации, что делает PascalABC.Net удобным выбором для проектов, которые могут быть развернуты на разных операционных системах.

Программа по оценке остаточного ресурса металлоконструкции эскалаторов предназначена для количественной оценки остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов при их сверхнормативном сроке эксплуатации, определяемого по результатам вычислений в количестве циклов, километров пробега, годах. Программа позволяет произвести анализ вводимых значений коэрцитивной силы, а также учитывает как степень агрессивности окружающей атмосферы (температура, влажность окружающей среды, концентрация сернистого ангидрида и хлорид-ионов в атмосфере), так и возможность выбора доверительных вероятностей. Кроме того, в случае если измерения состава окружающей среды не производились программа позволяет произвести расчет величины остаточного ресурса по усредненным параметрам.

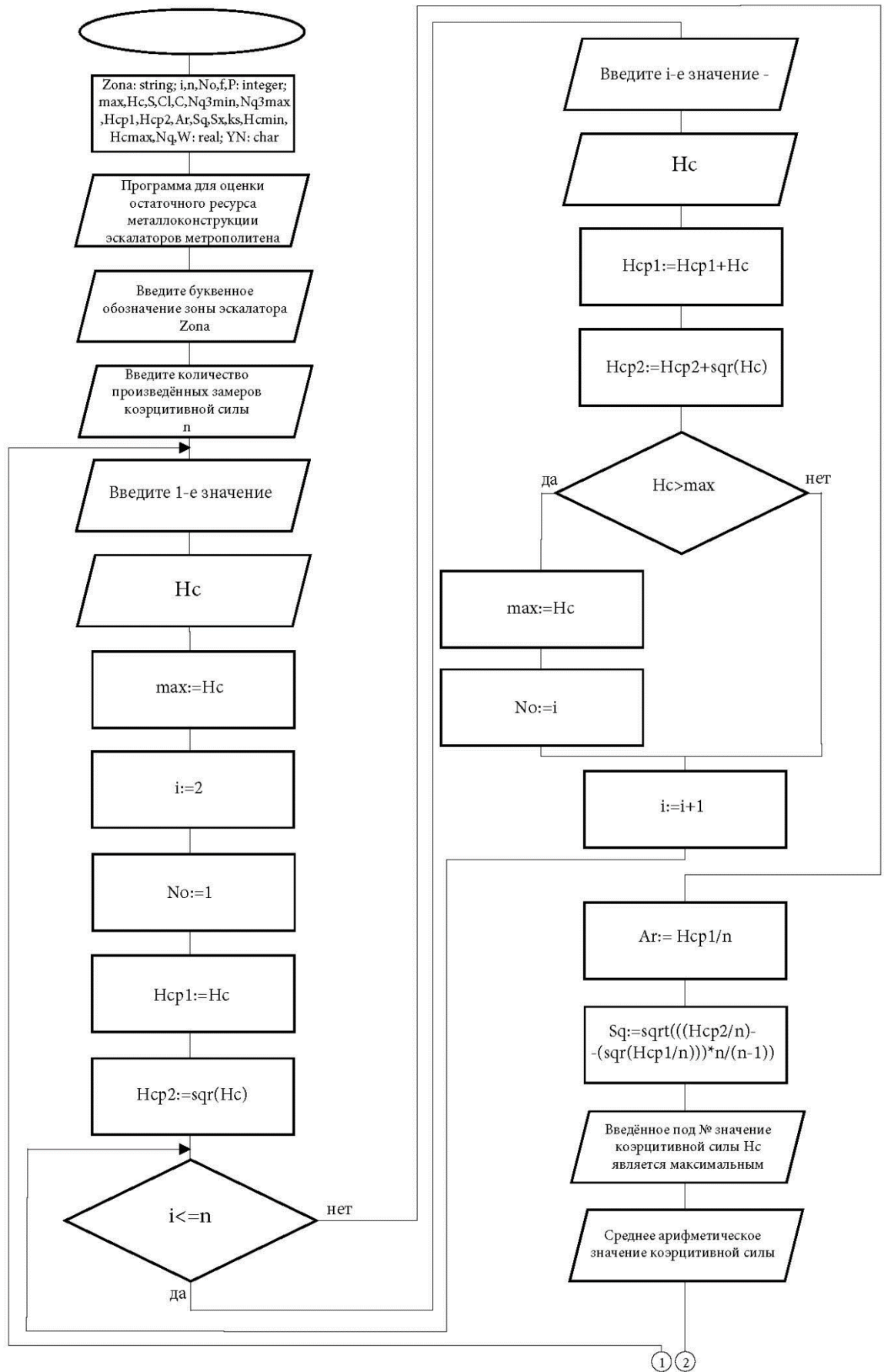


Рисунок 4.16 – Блок-схема алгоритма по оценке остаточного ресурса металлоконструкции эскалаторов (начало)

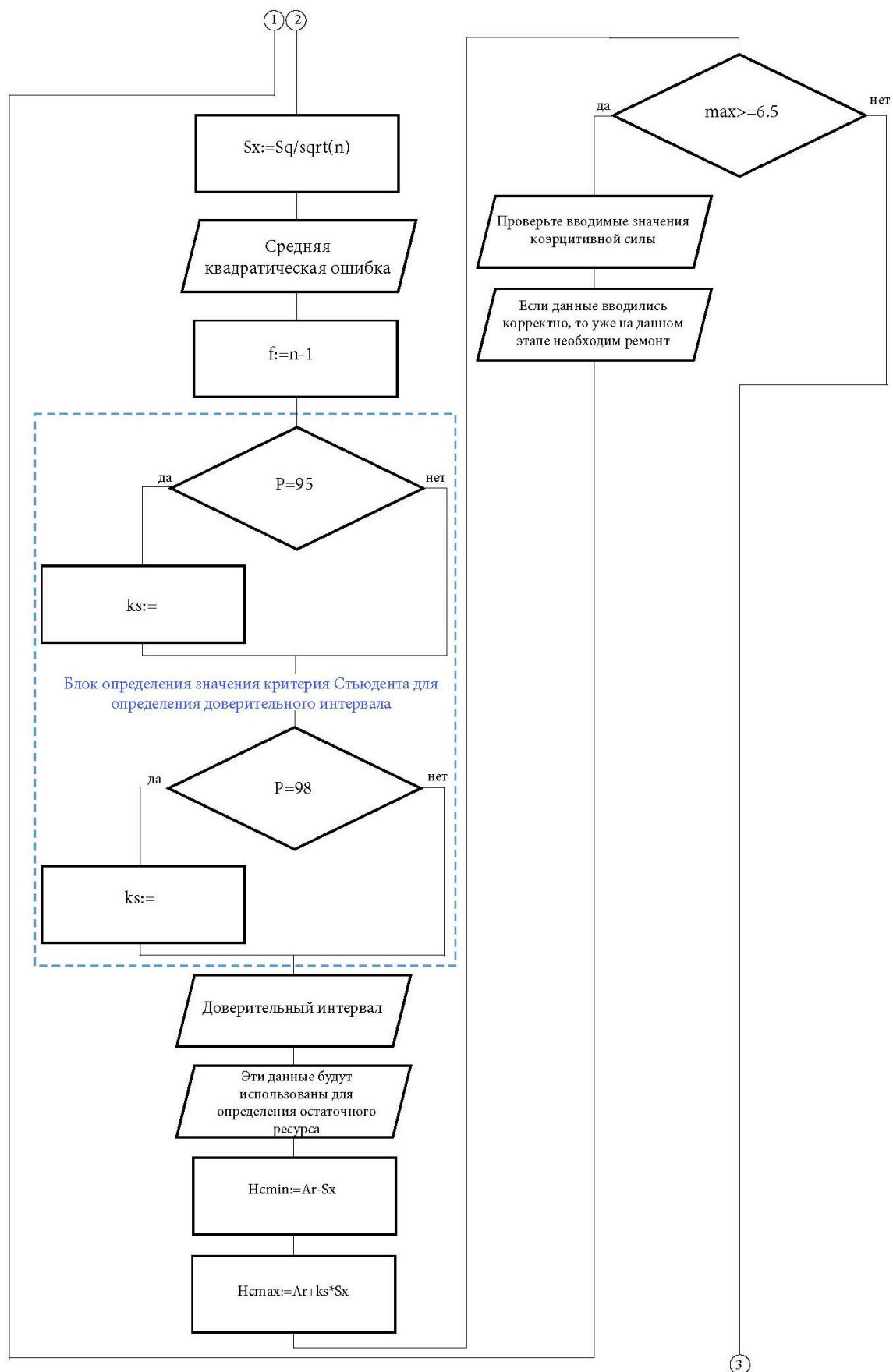


Рисунок 4.16 – Блок-схема алгоритма по оценке остаточного ресурса металлоконструкции эскалаторов (продолжение)

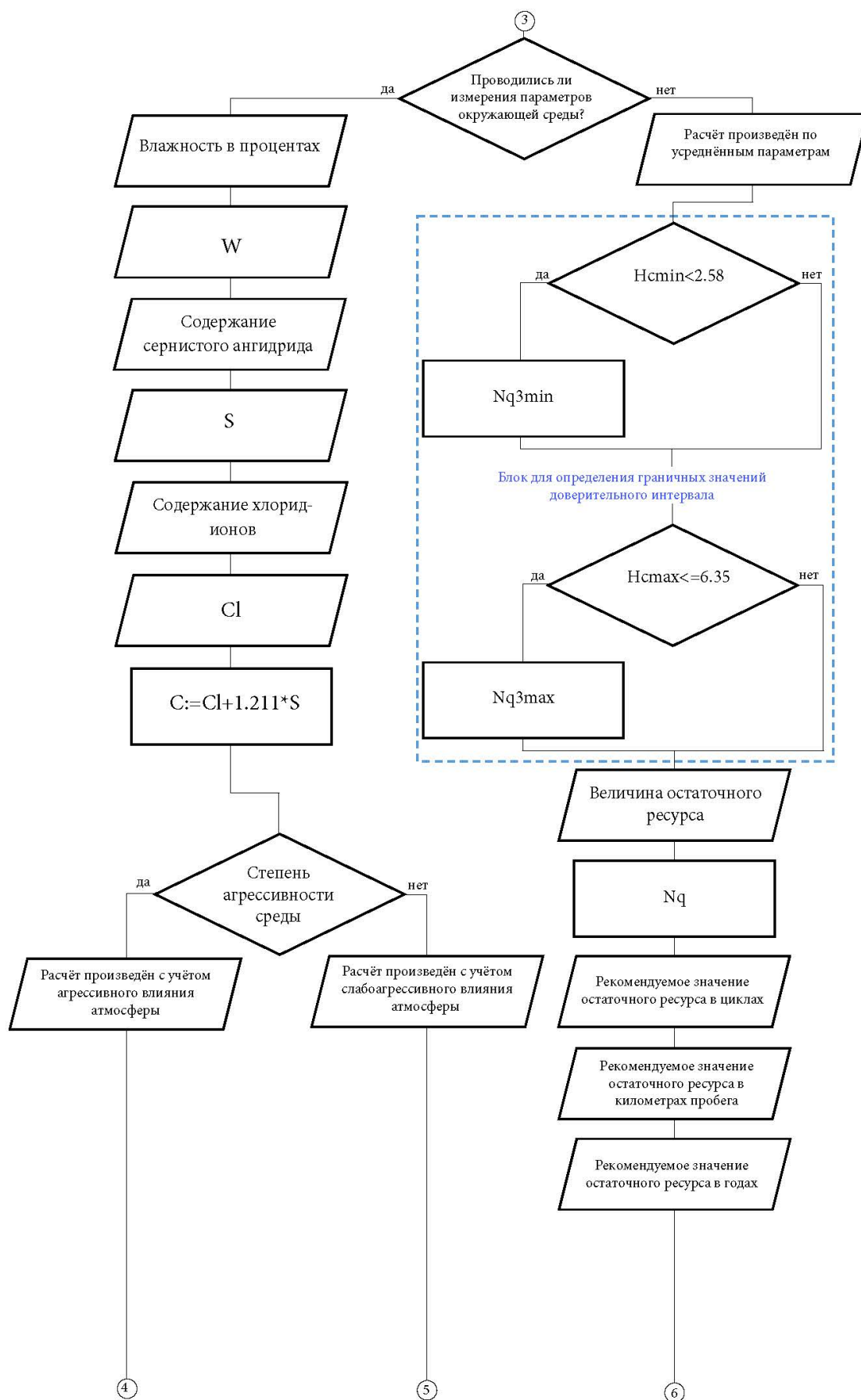


Рисунок 4.16 – Блок-схема алгоритма по оценке остаточного ресурса металлоконструкции эскалаторов (продолжение)

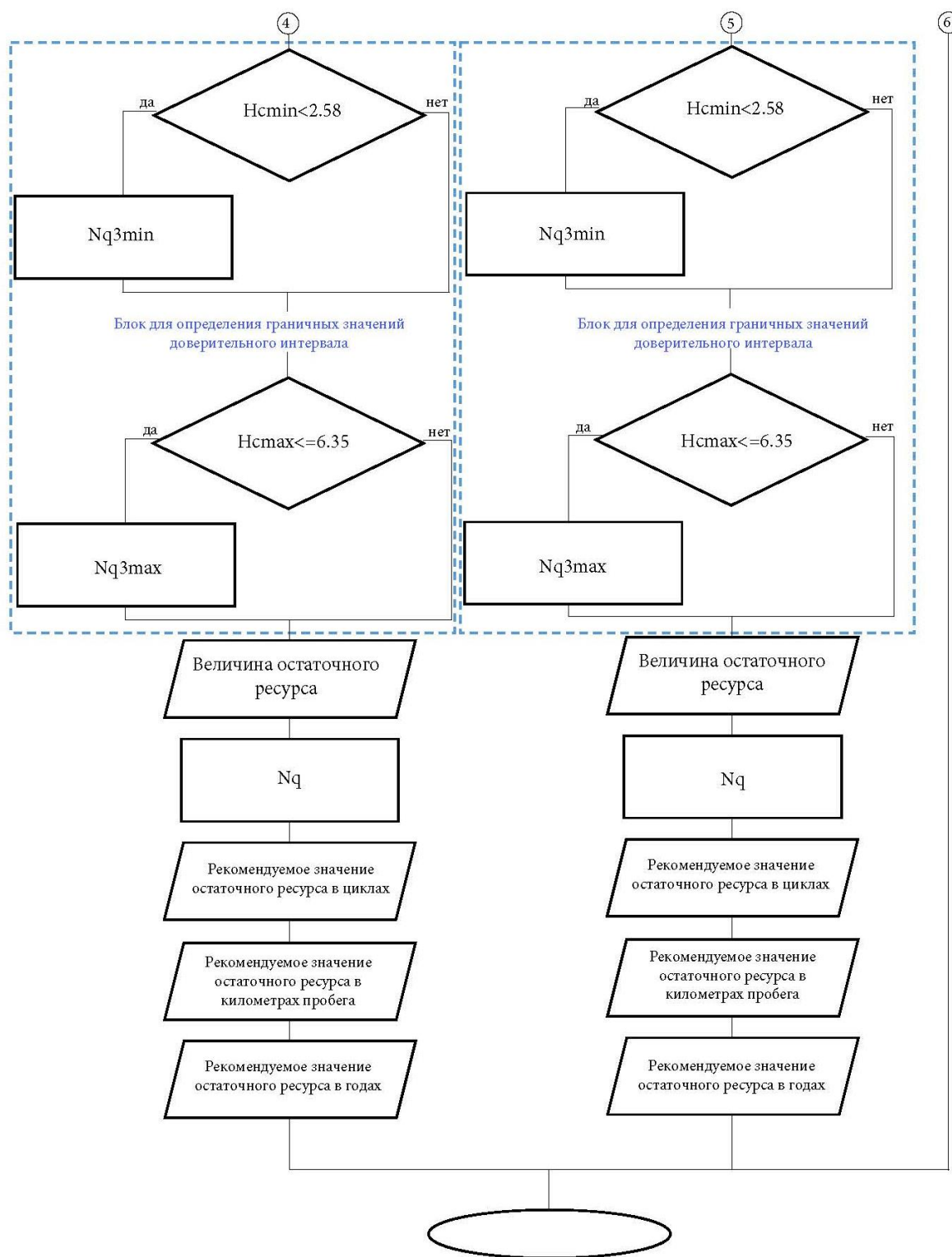
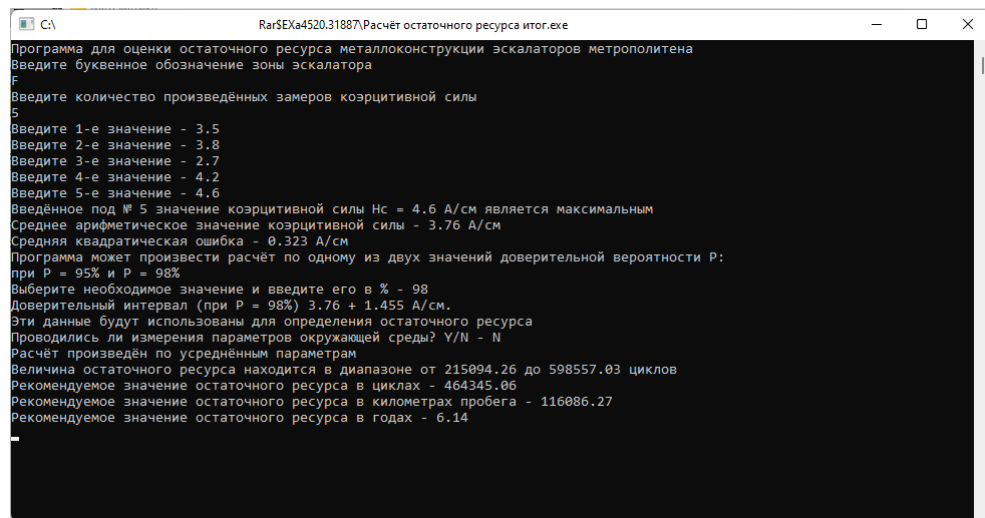


Рисунок 4.16 – Блок-схема алгоритма по оценке остаточного ресурса металлоконструкции эскалаторов (окончание)

Программа обеспечивает выполнение следующих функций: ввод исходных данных, их статистическую обработку с определением доверительных

интервалов, расчет величины остаточного ресурса в количестве циклов, километров пробега, годах (рисунок 4.17). Возможна распечатка отчета в виде заключения.



4.17 –Диалоговое окно программы

Исходный код (представлен в Приложении А) является открытым, что подразумевает возможность внесения изменений с целью усовершенствования и расширения выполняемых функций.

Отдельные элементы программы по оценке остаточного ресурса металлоконструкции эскалаторов были включены в параллельную программу для обработки телеметрической информации технического состояния эскалаторов.

4.6 Рационализация испытаний на коррозионную стойкость низкоуглеродистых сталей или обследований элементов металлоконструкций эскалаторов

Основопологающим принципом рационализации испытаний на устойчивость к коррозии, а также аналогичных обследований металлических конструкций эскалаторов, является деление общего периода экспозиции (эксплуатации) на равные по продолжительности периоды. Этот подход позволяет более точно смоделировать и сопоставить износ материала в разные моменты времени [32]. Анализ процессов коррозии стальных образцов и

элементов металлоконструкций в условиях воздействия атмосферы проводится на основе степенной зависимости (44). По итогам исследования была подтверждена достоверность данного заключения. Использование математической регрессии для обработки данных, представленных в таблице 2.3, помогает точно определить коэффициенты K и n для описанных сталей.

Применяя принцип золотого сечения при разделении общего периода экспозиции (эксплуатации) материала τ , на пропорциональные временные интервалы, примем $\varphi = 0,618$, в результате чего получаем $\tau_1 = 0,618\tau$, $\tau_2 = 0,618\tau_1$, ..., $\tau_i = 0,618\tau_{i-1}$. Иные значения φ сказываются в перспективе либо на изменении прогнозной величины s , либо на увеличении погрешности.

Определим приращение величины глубинного показателя коррозии s за эти промежутки времени. Считая, что $s_1 = K \cdot \tau_1^n$, $s_2 = K \cdot \tau_2^n$ и так далее [31], получаем следующее выражение

$$s - s_1 = s_1 - s_2. \quad (67)$$

Иначе

$$s = s_1 + (s_1 - s_2). \quad (68)$$

Предположим, что $\tau = 20$ лет, тогда $\tau_1 = 12,4$ года, $\tau_2 = 7,7$ года, $\tau_3 = 4,8$ года. Результаты дальнейших расчетов сведены в таблицу 4.1, при этом полученные по результатам расчета с использованием (44) результаты интерпретируются как экспериментальные данные (математическое моделирование результатов эксперимента).

Таблица 4.1 – Определение конечной величины времени экспозиции согласно принципу пропорциональности

τ , год	Величина s согласно (46), мм	Величина s согласно (67), мм	Погрешность, %
Ст3пс ($s = 0,0574\tau^{0,47}$)			
4,8	0,120	-	-
7,7	0,150	-	-
12,4	0,187	$0,150 + (0,150 - 0,120) = 0,180$	3,9
20	0,235	$0,187 + (0,187 - 0,150) = 0,224$	4,9
Ст3кп ($s = 0,0514\tau^{0,43}$)			
4,8	0,101	-	-
7,7	0,124	-	-
12,4	0,152	$0,124 + (0,124 - 0,101) = 0,147$	3,4
20	0,186	$0,152 + (0,152 - 0,124) = 0,180$	3,3

Погрешность, как видно из таблицы, не превышает 5%, что можно трактовать в пользу положенных в основу принципа пропорциональности рассуждений. Практическая польза выражения (68) в том, что не нужно проводить испытания или фактические обследования в течение всего периода экспозиции или эксплуатации (20 лет). Достаточно иметь значения глубинных показателей коррозии s на момент завершения определенного периода времени (в данном случае в 4,8, 7,7 и 12,4 лет).

То есть, применение принципа пропорциональности для определения величины s позволяет существенно ускорить процесс, в частности, на 4,8 года, что эквивалентно 28% от общего запланированного периода. Это подчеркивает эффективность метода в оптимизации исследовательских процедур и снижении ожидаемого времени до получения результатов. Кроме того, искомый результат будет известен заранее (по истечении 12,4 лет) экспозиции (эксплуатации), что также сказывается положительно на определении дальнейшей возможности эксплуатации металлоконструкций эскалаторов при сроках эксплуатации, превышающих указанные в нормативно-технической документации.

Использование описанного принципа открывает путь для инновационной технологии проведения ускоренных испытаний на коррозионную стойкость низкоуглеродистых сталей с возможностью применения при обследованиях металлоконструкций эскалаторов.

4.7 Выводы по главе

1. Разработан метод оценки напряженно-деформированного состояния металлоконструкции эскалатора на примере использования коэрцитиметра КРЦ-М-2.
2. Обозначены основные сферы использования разработанного метода, позволяющего оценить металлоконструкции эскалатора с точки зрения их напряженно-деформированного состояния.

3. Оценена и подтверждена эффективность применения нового метода в области промышленной безопасности, что особенно актуально для экспертных организаций.

4. Получены графические зависимости значений коэрцитивной силы от количества циклов нагружения – без учета коррозионной составляющей и с учетом разработанной математической модели.

5. Математическое описание номограмм 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

6. 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%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведения теоретических и практических исследований, в рамках данной диссертационной работы, были выявлены и систематизированы основные итоги, среди которых:

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 множественных 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ металлов: Справочник / А.И. Лазарев, И.П. Харламов. – М.: Металлургия, 1987. – 319 с.
2. Бардышев, О.А. О диагностировании технических устройств // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 7. – с. 44-48.
3. Бардышев, О.А. Мониторинг технических устройств на опасных производственных объектах / О.А. Бардышев, С.К. Коровин, В.А. Попов, А.Н. Филин // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – №1. – с. 52-56.
4. Безик, Д.А. Расчеты напряженного состояния элементов ГПМ с использованием современного программного обеспечения / Д.А. Безик, Н.А. Романеев // Подъемно-транспортное дело. – 2008. – №1. – с. 2-5.
5. Берукштис Г.К., Кларк Г.Б. Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях. АН СССР. Ин-т физ. химии. – М.: Наука, 1971. – 159 с.
6. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 623 с.
7. Бортяков, Д.Е. Учет динамических нагрузок при проектировании металлоконструкций порталных кранов / Д.Е. Бортяков, А.А. Грачев, С.В., Никитин, И.В. Лесковец, И.А. Васильев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2024. – №2. – с. 79-90.
8. Будынков В.И., Овчинников И.Г. Сопротивление материалов в агрессивной среде: Учебн. пособие. – Саратов: СГТУ, 1997. – 23 с.
9. Булатов М.И., Калинин И.П. Практическое руководство по фотоколориметрическим и спектрофотометрическим методам анализа. 4-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Химия. Ленингр. отд-ние, 1976. – 376 с.
10. Валитов А.М.-З., Шилов Г.И. Приборы и методы контроля толщины покрытий. – Ленинград: Машиностроение, 1970. – 120 с.

11. Ватулин, Я.С. Техническое диагностирование закладных элементов крановых путей грузоподъёмного 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.
12. Вершинский А.В. Технологичность и несущая способность крановых металлоконструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 167 с.
13. Вольберг В.В. Устройство и эксплуатация окрасочно-сушильных агрегатов в машиностроении. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.
14. Герасименко, П.В. Теория оценивания риска: учеб. пособие. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2015. – 51 с.
15. Герасименко, П.В. Численный алгоритм исследования напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек железнодорожных цистерн / П.В. Герасименко, В.А. Ходаковский // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2019. – Том 6. № 2. – с. 308-314.
16. Герасимов В.В. Прогнозирование коррозии металлов. – М.: Metallurgy, 1984. – 151 с.
17. Герасимов В.В. Коррозия сталей в нейтральных средах. – М.: Metallurgy, 1981. – 192 с.
18. Гольдберг М.М. Лакокрасочные покрытия в машиностроении: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1974. – 576 с.
19. Горюнов Ю.В., Перцов Н.В., Сумм Б.Д. Эффект Ребиндера. – М.: Наука, 1966. – 128 с.
20. ГОСТ 33966.1-2020 Эскалаторы и пассажирские конвейеры. Часть 1. Требования безопасности к устройству и установке. Дата введения: 01.06.2022.
21. ГОСТ Р 58771-2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска. Дата введения: 01.03.2020.

22. ГОСТ 9.040-2021. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Расчетно-экспериментальный метод ускоренного определения коррозионных потерь в атмосферных условиях. Дата введения: 06.01.2022.
23. Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. 3-е изд., допол. и переработ. – Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1976. – 456 с.
24. ГУП «Петербургский метрополитен». Технические характеристики метрополитена [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.metro.spb.ru/otchetmetro.html?v=1> (дата обращения: 26.11.2024).
25. Гуревич Э.А. Химическая стойкость строительных материалов: учебное пособие по курсу «Строительные материалы». – Саратов: СПИ, 1980. – 80 с.
26. Гуреев А.А., Шехтер Ю. Н., Тимохин И. А. Средства защиты автомобилей от коррозии. – М.: Транспорт, 1983. – 209 с.
27. Данилов, А.С. Моделирование процесса атмосферной коррозии металлоконструкций грузоподъемных машин / А.С. Данилов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2009. – Вып. 2-1. – с. 80-86.
28. Данилов, А.С. Диагностика повреждаемости металлических конструкций грузоподъемных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Данилов Александр Сергеевич. – Тула, 2010. – 160 с.: ил.
29. Дронов В.С., Дубенский Г.Г., Троицкий И.В. Механика разрушения. – Тула: Изд-во ТулГУ, 1999. – 276 с.
30. Дятлов, В.Н. Моделирование процесса коррозии несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена / В.Н. Дятлов // Вестник МАДИ. – 2022. – №1 (68). – с. 29-35.
31. Дятлов, В.Н. Уточнение модели развития коррозионных дефектов несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена / В.Н. Дятлов // Вестник МАДИ. – 2022. – №3 (70). – с. 46-50.
32. Дятлов, В.Н. Рационализация периодов проведения диагностических обследований элементов металлоконструкций эскалаторов метрополитена /

- В.Н. Дятлов, Д.П. Кононов // Вестник СибАДИ. – 2024. – Т. 21, No 5. – с. 662-671.
33. Дятлов, В.Н. Методика расчёта 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. Емелин М.И., Герасименко А.А. Защита машин от коррозии в условиях эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.
38. Жолондковский О.И., Лебедев Ю.А. Бой с пожирателями металла. – М.: Знание, 1984. – 144 с.
39. Жуков А.П., Малахов А.И. Основы металловедения и теории коррозии. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 166 с.
40. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов. 2-е изд. стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 496 с.

41. Защита от коррозии, старения и биоповреждения машин, оборудования и сооружений: Справочник: В 2 т. Т. 1. / А.А. Герасименко, Я.И. Александров, И.Н. Андреев и др.; Под общ. ред. А.А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1987. – 688 с.
42. Защита от коррозии, старения и биоповреждения машин, оборудования и сооружений: Справочник: В 2 т. Т. 2. / А.А. Герасименко, А.К. Баталов, Б.В. Бочаров и др.; Под общ. ред. А.А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1987. – 784 с.
43. Звездин О.А., Трегуб В.Д. Контроль качества при производстве противокоррозионных работ. – Киев: Будівельник, 1978. – 87 с.
44. Игнатъев Р.А., Михайлова А.А. Защита техники от коррозии, старения и биоповреждений: справочник. – М.: Россельхозиздат, 1987. – 348 с.
45. Исследование элементов подъемно-транспортных машин: учебное пособие / А.А. Грачев [и др.]. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022. – 102 с. – ISBN 978-5-7422-7906-8. – Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/128643.html> (дата обращения: 26.11.2024).
46. Калинина В.Н. Теория вероятностей и математическая статистика. - М. Дрофа, 2008. – 471 с.;
47. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов. – Киев: Наук. думка, 1976. – 127 с.
48. Кемхадзе В.С. Коррозия и защита металлов во влажных субтропиках. –М.: Наука, 1983. – 108 с.
49. Китаев Ю. П., Троепольская Т.В., Будников Г.К. Промежуточные продукты в электрохимических реакциях. – М.: Наука, 1982. – 216 с.
50. Козырин Н.А., Тимонин В.А. Защита от коррозии силикатами. – М: Металлургия, 1985. – 105 с.
51. Кожушко Г. Г. Эскалаторы. Пассажирские конвейеры: учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство АМБ, 2016. – 142 с.

52. Коломиец, К.С. Оценка ресурса несущих металлоконструкций грузоподъемных машин в условиях совместного воздействия усталости и коррозии: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Коломиец Константин Степанович. – Тула, 2021. – 124 с.: ил.
53. Колотыркин Я.М. Металл и коррозия. – М.: Metallurgy, 1985. – 88 с.
54. Косилова А.Г., Сухов М.Ф. Технология производства подъемно-транспортных машин. 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1982. – 301 с.
55. Котлер Ф. Основы маркетинга: пер. с англ. – М.: Прогресс, 1991. – 733 с.
56. Кох П.И. Климат и надежность машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 175 с.
57. Лайнер В.И. Защитные покрытия металлов. – М.: Metallurgy, 1974. – 558 с.
58. Логан Х.Л. Коррозия металлов под напряжением: пер. с англ. – М.: Metallurgy, 1970. – 340 с.
59. Магнитная диагностика и остаточный ресурс подъемных сооружений / Б.Е. Попов, В.С. Котельников, В.В. Зарудный и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 2 – с. 44-49.
60. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
61. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. – М.: Машиностроение, 1973. – 201 с.
62. Мачевская Р.А., Мочалова О.С. Подготовка поверхности под окраску. – М.: Химия, 1971. – 120 с.
63. Методы исследования и проектирования наземных транспортно-технологических комплексов: Учебное пособие для студентов / Л.А. Сладкова, П.А. Григорьев, В.В. Фокин, В.В. Крылов. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2023. – 104 с.
64. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие: В 4 т. Т. 4. Усталостная и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов /Под общ. ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 679 с.

65. Михайловский Ю.Н., Атмосферная коррозия металлов и методы их защиты. – М.: Металлургия, 1989. – 101 с.
66. Мудрук А.С., Гончаренко П.В. Коррозия и вопросы конструирования. – Киев: Техніка, 1984. – 135 с.
67. Мыльников В. В. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов: монография. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. – 177 с.
68. Неверов. А.С., Родченко Д.А., Цырлин М.И. Коррозия и защита материалов. – М.: Форум, 2013. – 221 с.
69. Обеспечение безопасности тоннельных эскалаторов / О.А. Бардышев, В.А. Попов., А.Н. Филин, М.В. Харлов. – СПб.: Безопасность, 2020. – 128 с.
70. Олейник А.М., Поминов И.Н. Эскалаторы. – М.: Машиностроение, 1973. – 253 с.
71. Партыка Т. Л., Попов И. И. Математические методы: учебник. 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. – 464 с.
72. Петербургское метро: проведение экспертизы тоннельных эскалаторов / Бардышев О. А., Уралов В. Л., Попов В. А. // Ж-л Берг-Коллегия. – 2007. – №3. – с. 26-27.
73. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1987. – 288 с.
74. Плудек В.Р. Защита от коррозии на стадии проектирования: пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 438 с.
75. Поминов И.Н. Эскалаторы метрополитена. Устройство, обслуживание и ремонт. М.: Транспорт. 1994. – 320 с.
76. Попов Ю.А. Теория взаимодействия металлов и сплавов с коррозионно-активной средой. – М.: Наука, 1995. – 199 с.
77. Постановление Правительства Российской Федерации от 20.10.2023 № 1744 «Об организации безопасного использования и содержания лифтов, подъемных платформ для инвалидов, пассажирских конвейеров

(движущихся пешеходных дорожек), эскалаторов, за исключением эскалаторов в метрополитенах».

78. Похмурский В.И. Коррозионная усталость металлов. – М.: Metallurgy, 1985. – 206 с.
79. Продукты атмосферной коррозии железа и окраска по ржавчине / О. Кукурс, А. Упите, И. Хонзак и др. – Рига: Зинатне, 1980. – 163 с.
80. Рачев Х., Стефанова С. Справочник по коррозии: пер. с болг. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
81. Розенфельд И.Л. Атмосферная коррозия металлов. – М.: Издательство АН СССР, 1960. – 372 с.
82. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. – М.: Metallurgy, 1969. – 448 с.
83. Романов В.В. Влияние коррозионной среды на циклическую прочность металлов. – М.: Наука, 1969. – 219 с.
84. Руководство по ремонту эскалаторов. РР-ЭС 992-17. Петербургский метрополитен. – СПб.: 2017. – 96 с.
85. Селиверстов Г.В., Данилов А.С. Влияние атмосферной коррозии на металлоконструкции машин. Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 3. 2007. с. 81-88.
86. Селиверстов Г.В., Данилов А.С. Исследование коррозионной усталости металлоконструкций грузоподъемных машин // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – №2-1 – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – с. 248-253.
87. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.
88. Скорчелетти В.В. Теоретические основы коррозии металлов. – Ленинград: Химия. Ленингр. отд-ние, 1973. – 263 с.
89. Сладкова Л. А. Изменение напряженно-деформированного состояния элементов опорно-поворотного устройства кранов при эксплуатации / Л. А. Сладкова, В. В. Фокин // Омский научный вестник. – 2024. – № 4 (192). – с. 22–28.

90. Сладкова Л.А. Трехкомпонентный силоизмеритель для точного измерения колебания нагрузок / Л.А. Сладкова, В.В. Жавыркин // Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики». Москва, 7-10 декабря 2021 г.: материалы конференции: в 2 частях. Том Часть 2. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. – с. 143-145.
91. Сокол И.Я., Ульянин Е.А., Фельдгандлер Э.Г. и др. Структура и коррозия металлов и сплавов: атлас. – М.: Металлургия, 1989. – 400 с.
92. Стеклов О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах. – М.: Машиностроение, 1976. – 199 с.
93. Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
94. Сухотин А.М. Физическая химия пассивирующих пленок на железе. – Ленинград: Химия. Ленингр. отд-ние, 1989. – 318 с.
95. Тихомирова Л.А. Возможность и пределы выполнения работ на опасных производственных объектах по договору о предоставлении труда работников (персонала) и осуществления деятельности в области промышленной безопасности по гражданско-правовому договору [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/57239684/> (дата обращения: 26.11.2024).
96. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы. – М.: Металлургия, 1993. – 413 с.
97. Труфанова А.И., Хлебникова С.Ф. Защита металлов от разрушений. – Тула: Приок. кн. изд-во, 1981. – 88 с.
98. Тулин Д.Е. Влияние остаточных сварочных напряжений на сопротивление конструкций хрупкому разрушению / Д.Е. Тулин, С.А. Соколов, А.А. Грачев // Вестник машиностроения. – 2022. – №3.
99. Федеральный закон «Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте» от 27.07.2010 № 225-ФЗ с изменениями согласно Федерального закона от 09.03.2016 № 56-ФЗ.

100. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 29.12.2022) с изменениями согласно Федерального закона от 04.03.2013 № 22-ФЗ.
101. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности эскалаторов в метрополитенах». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 3 декабря 2020 года N 488, Зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 23 декабря 2020 года, регистрационный N 61728;
102. Харлов М.В., Попов В.А. Методика оценки технического состояния эскалатора // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №4 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf> (дата обращения: 26.11.2024).
103. Шафорост, А.Н. Анализ вариантов повышения несущей способности пролетного строения козлового крана / П.В. Витчук, Н.А. Витчук, Е.В. Славкина, К.А. Баранов, А.Н. Шафорост // Известия тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №1. – с. 440-450.
104. Шафорост, А.Н. Организация и управление потоками грузопассажирских перевозок в транспортной компании / Н.А. Владимиров, А.Н. Шафорост, П.В. Витчук, А.С. Толоконников, А.Д. Горынин // Известия тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №4. – с. 323-329.
105. Шлугер М.А., Ажогин Ф.Ф., Ефимов Е.А. Коррозия и защита металлов. – М.: Металлургия, 1981. – 216 с.
106. Шрайер Л. Л. Коррозия: справочник. П ер. с англ. – М.: Металлургия, 1981. – 631 с.
107. Ahmad Z. Principles of corrosion engineering and corrosion control. – New York: Elsevier science & technology books, 2006. – 660 p.
108. Barausov, V.A., Bubnov, V.P., Sultonov, S.Kh. Simulation modeling in methods and designs for detecting ice or snow buildup on control surface in

- MATLAB/SIMULINK dynamic modeling environment (2020) CEUR Workshop Proceedings, 2803, pp. 136-141. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85100887794&partnerID=40&md5=4e9b00b34eb2c969a281bf02dc260e92> (дата обращения: 26.11.2024).
109. Bardyshev O., Gordienko V. Some Aspects of Maintaining Inclined Tunnel Escalators in St. Petersburg // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725-726. pp. 202-207.
 110. Bardishev, O. A., Druginin, P. V., Repin, S., Filin, A. N., Popov, V. A., Method of safety control of transport and technological machines in the initial period of operation (on the example of tunnel escalators) // Bulletin of Civil Engineers. 6 (71). 2018. pp. 129-134.
 111. Benin, A., Guzijan-Dilber, M., Diachenko, L., Semenov, A. Finite element simulation of a motorway bridge collapse using the concrete damage plasticity model (2020) E3S Web of Conferences, 157, статья № 06018, . Цитирован(ы) 1 раз. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084115157&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015706018&partnerID=40&md5=e34482fbecbdba53214728090b63aae7> (дата обращения: 26.11.2024).
 112. Benin, A., Semenov, S., Bogdanova, E. The Experimental Study of Concrete Beams Reinforced with Different Types of Bars Carrying Capacity (2016) MATEC Web of Conferences, 53, статья № 01047, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84969822714&doi=10.1051%2fmatecconf%2f20165301047&partnerID=40&md5=c11539a32c1926e9031669090086c89e> (дата обращения: 26.11.2024).
 113. Cramer S., Corvino B. Jr. Corrosion: fundamentals, testing and protection. – New York: ASM Handbook, 2003. – 1135 p.
 114. Efanov, D., Osadchy, G., Sedykh, D., Pristensky, D., Barch, D. Monitoring system of vibration impacts on the structure of overhead catenary of high-speed railway lines (2016) Proceedings of 2016 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2016, статья №7807691, URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85015185328&doi=10.1109%2fEWDTS.2016.780>

- 7691&origin=inward&txGid=3b32e9d4b3577a96b5e1f955b5b84523&featureTo
ggles=FEATURE_NEW_DOC_DETAILS_EXPORT:1. (дата обращения:
26.11.2024).
115. Kazarinov, N., Smirnov, A., Petrov, Y., Gruzdkov, A. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete mechanical system (2020) E3S Web of Conferences, 157, статья № 01020, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111141&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015701020&partnerID=40&md5=ff349ae2159696f6435772713fca13e8> (дата обращения: 26.11.2024).
 116. Kudryavtsev, S., Valtseva, T., Bugunov, S., Kotenko, Z., Paramonov, V., Saharov, I., Sokolova, N. Numerical simulation of the work of a low-settlement embankment on a pile foundation in the process of permafrost soil thawing (2020) Lecture Notes in Civil Engineering, 50, pp. 73-82. Цитирован(ы) 1 раз. URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078258732&doi=10.1007%2f978-981-15-0454-9_9&partnerID=40&md5=11f76fc612522260859401014c634964 (дата обращения: 26.11.2024).
 117. Lavrov, K., Semenov, A., Benin, A. Modeling of nonlinear multiaxial deformation of concrete on the base of hyperelastic orthotropic model (2016) MATEC Web of Conferences, 53, статья № 01043, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84969821652&doi=10.1051%2fmatecconf%2f20165301043&partnerID=40&md5=1ce977dbfdac12ea7351100a995542cc> (дата обращения: 26.11.2024).
 118. McEvily A.J. Metal failures: mechanisms, analysis, prevention. – Ottawa: A Wiley-Interscience publication, 2002. – 324 p.
 119. Petrov, Y., Kazarinov, N. Instabilities encountered in the dynamic crack propagation process under impact loading as a natural consequence of the dynamic fracture discreteness (2020) Procedia Structural Integrity, 28, pp. 1975-1980. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85099843748&doi=10.1016%2fj.prostr.2020.11.021&partnerID=40&md5=383e4ee0fc4d5990740d0e01956201d5> (дата обращения: 26.11.2024).

120. Revie R.W. Uhlig's corrosion handbook. – Ottawa: A Wiley-Interscience publication, 2000. – 1296 p.
121. Sastri V., Ghali E., Elboudjaini M. Corrosion prevention and protection: practical solutions. – Ottawa: A Wiley-Interscience publication, 2007. – 579 p.
122. Schweitzer P. A. Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and Media Corrosion of Metals. – Boca Raton: CRC Press, 2006. – 752 p.
123. Tawancy H. M., Ul-Hamid A., Abbas N. M. Practical engineering failure analysis. – New York: Marcel Dekker Ink., 2004. – 616 p.
124. Talbot D., Talbot J., Corrosion science and technology. – Boca Raton: CRC Press, 1998. – 390 p.
125. Ulitskiy, V., Alekseev, S., Kondrat'ev, S. Experimental evaluation of the deformational calculation method of foundations for overpasses of high-speed railways (2020) Lecture Notes in Civil Engineering, 50, pp. 83-91. URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078273589&doi=10.1007%2f978-981-15-0454-9_10&partnerID=40&md5=732c9b94e9bb334ec970e744033fe096 (дата обращения: 26.11.2024).
126. Uzdin, A.M., Freze, M.V., Fedorova, M.Y., Guan, Y. On the Reliability of Finite-Element Evaluation of the Dynamic Interaction of a Structure with the Base (2018) Soil Mechanics and Foundation Engineering, 55 (3), pp. 201-208. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85052323932&doi=10.1007%2fs11204-018-9526-0&partnerID=40&md5=ab9d0940acfd8b8e578d21a1d9b82cbf> (дата обращения: 26.11.2024).
127. Uzdin, A., Prokopovich, S. Some principles of generating seismic input for calculating structures (2020) E3S Web of Conferences, 157, статья № 06021, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111517&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015706021&partnerID=40&md5=2c52657ac32615f175abb033915b52dc> (дата обращения: 26.11.2024).

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Текст программы для оценки остаточного ресурса металлоконструкции эскалаторов на языке программирования PascalABC.Net

```

program resurs;
label goback1, goback2;
var Zona: string; i,n,No,f,P: integer;
max,Hc,S,Cl,C,Nq3min,Nq3max,Hcp1,Hcp2,Ar,Sq,Sx,ks,Hcmin,Hcmax,Nq,W: real; YN:
char;
begin
  writeln ('Программа для оценки остаточного ресурса металлоконструкции
  эскалаторов метрополитена');
  writeln ('Введите буквенное обозначение зоны эскалатора');
  readln (Zona);
  writeln ('Введите количество произведенных замеров коэрцитивной силы');
  readln (n);
  goback1:
  write ('Введите 1-е значение - ');
  readln (Hc);
  max:=Hc;
  i:=2;
  No:=1;
  Hcp1:=Hc;
  Hcp2:=sqr(Hc);
  while i<=n do
    begin
      write ('Введите ',i,'-е значение - ');
      readln (Hc);
      Hcp1:=Hcp1+Hc;
      Hcp2:=Hcp2+sqr(Hc);
      if Hc>max then
        begin
          max:=Hc;
          No:=i;
        end;
      i:=i+1;
    end;
  Ar:= Hcp1/n;
  Sq:=sqrt(((Hcp2/n)-(sqr(Hcp1/n)))*n/(n-1));
  writeln ('Введенное под № ',No,' значение коэрцитивной силы Hc = ',max,' А/см
  является максимальным');
  if max>=6.5 then
    begin
      writeln ('Проверьте вводимые значения коэрцитивной силы. Максимальное значение
      при определении остаточного ресурса для Ст3 не может превышать 6.5 А/см');
      writeln ('Если данные вводились корректно, то уже на данном этапе необходим
      ремонт, позволяющий восстановить механические свойства металла');
      goto goback1;
    end;
  writeln ('Среднее арифметическое значение коэрцитивной силы - ', Ar:3:2,'
  А/см');
  Sx:=Sq/sqrt(n);

```

```

writeln ('Средняя квадратическая ошибка - ', Sx:4:3, ' А/см');
goback2:
writeln ('Программа может произвести расчет по одному из двух значений
доверительной вероятности P: ');
writeln ('при P = 95% и P = 98% ');
write ('Выберите необходимое значение и введите его в % - ');
readln (P);
f:=n-1;
if P=95 then
begin
  if f=2 then ks:=12.7;
  if f=3 then ks:=4.3;
  if f=4 then ks:=3.2;
  if f=5 then ks:=2.8;
  if f=6 then ks:=2.6;
  if (f>=7) and (f<=8) then ks:=2.4;
  if (f>=9) and (f<=10) then ks:=2.3;
  if (f>=11) and (f<=14) then ks:=2.2;
  if (f>=15) and (f<=27) then ks:=2.1;
  if (f>=28) then ks:=2.0;
end;
if P=98 then
begin
  if f=2 then ks:=31.8;
  if f=3 then ks:=7.0;
  if f=4 then ks:=4.5;
  if f=5 then ks:=3.7;
  if f=6 then ks:=3.4;
  if f=7 then ks:=3.1;
  if f=8 then ks:=3.0;
  if f=9 then ks:=2.9;
  if (f>=10) and (f<=11) then ks:=2.8;
  if (f>=12) and (f<=14) then ks:=2.7;
  if (f>=15) and (f<=19) then ks:=2.6;
  if (f>=20) and (f<=30) then ks:=2.5;
  if (f>=31) and (f<=120) then ks:=2.4;
  if f>=121 then ks:=2.3;
end;
if (P<>95) and (P<>98) then
begin
  writeln ('Введено некорректное значение доверительной вероятности, попробуйте
еще раз!');
  goto goback2;
end;
writeln ('Доверительный интервал (при P = ', P, '%) ', Ar:3:2, ' ± ', ks*Sx:4:3, '
А/см. ');
writeln ('Эти данные будут использованы для определения остаточного ресурса');
Hcmin:=Ar-Sx;
Hcmax:=Ar+ks*Sx;
write ('Проводились ли измерения параметров окружающей среды? Y/N - ');
readln (YN);
repeat
until YN IN ['N', 'n', 'Y', 'y'];
if YN IN ['Y', 'y'] then
begin
  write ('Влажность в процентах - ');
  readln (W);
  write ('Содержание сернистого ангидрида в мг/куб. м - ');
  readln (S);
  write ('Содержание хлорид-ионов в мг/куб. м - ');
  readln (Cl);
  C:=Cl+1.211*S;
  if (W>=73) and (C>=0.065) then

```

```

begin
  writeln ('Расчет произведен с учетом агрессивного влияния атмосферы');
  if Hcmin<2.58 then Nq3min:=4999999.99;
  if (Hcmin>=2.58) and (Hcmin<=3.00) then Nq3min:=(22387.0758-
11470.6133*Hcmin)/(1-0.6486*Hcmin+0.1011*sqr(Hcmin));
  if (Hcmin>=3.01) and (Hcmin<=5.00) then Nq3min:=(1+969707697.1745*Hcmin)/(-
92865.9187+33615.6134*Hcmin);
  if (Hcmin>=5.01) and (Hcmin<=6.35) then Nq3min:=(19546.8352-
3041.0255*Hcmin)/(1-0.3330*Hcmin+0.0296*sqr(Hcmin));
  if Hcmax<2.58 then Nq3min:=4999999.99;
  if (Hcmax>=2.58) and (Hcmax<=3.00) then Nq3max:=(22387.0758-
11470.6133*Hcmax)/(1-0.6486*Hcmax+0.1011*sqr(Hcmax));
  if (Hcmax>=3.01) and (Hcmax<=5.00) then Nq3max:=(1+969707697.1745*Hcmax)/(-
92865.9187+33615.6134*Hcmax);
  if (Hcmax>=5.01) and (Hcmax<=6.35) then Nq3max:=(19546.8352-
3041.0255*Hcmax)/(1-0.3330*Hcmax+0.0296*sqr(Hcmax));
  writeln ('Величина остаточного ресурса находится в диапазоне от
',Nq3max*4:8:2,' до ',Nq3min*4:8:2,' циклов');
  Nq:=Nq3max+(Nq3min-Nq3max)*0.65;
  writeln ('Рекомендуемое значение остаточного ресурса в циклах - ',Nq*4:8:2);
  writeln ('Рекомендуемое значение остаточного ресурса в километрах пробега -
',Nq:8:2);
  writeln ('Рекомендуемое значение остаточного ресурса в годах -
',Nq*1000/(0.75*20*60*60*350):4:2);
end
else
begin
  writeln ('Расчет произведен с учетом слабоагрессивного влияния атмосферы');
  if Hcmin<2.58 then Nq3min:=4999999.99;
  if (Hcmin>=2.58) and (Hcmin<=3.00) then Nq3min:=(21163.0719-
10975.4676*Hcmin)/(1-0.6522*Hcmin+0.1025*sqr(Hcmin));
  if (Hcmin>=3.01) and (Hcmin<=5.00) then Nq3min:=(1+3277135.3096*Hcmin)/(-
299.3813+108.6487*Hcmin);
  if (Hcmin>=5.01) and (Hcmin<=6.35) then Nq3min:=(-6.3543+Hcmin)/(-
0.00006752+0.0000088760*Hcmin);
  if Hcmax<2.58 then Nq3min:=4999999.99;
  if (Hcmax>=2.58) and (Hcmax<=3.00) then Nq3max:=(21163.0719-
10975.4676*Hcmax)/(1-0.6522*Hcmax+0.1025*sqr(Hcmax));
  if (Hcmax>=3.01) and (Hcmax<=5.00) then Nq3max:=(1+3277135.3096*Hcmax)/(-
299.3813+108.6487*Hcmax);
  if (Hcmax>=5.01) and (Hcmax<=6.35) then Nq3max:=(-6.3543+Hcmax)/(-
0.00006752+0.0000088760*Hcmax);
  writeln ('Величина остаточного ресурса находится в диапазоне от
',Nq3max*4:8:2,' до ',Nq3min*4:8:2,' циклов');
  Nq:=Nq3max+(Nq3min-Nq3max)*0.65;
  writeln ('Рекомендуемое значение остаточного ресурса в циклах - ',Nq*4:8:2);
  writeln ('Рекомендуемое значение остаточного ресурса в километрах пробега -
',Nq:8:2);
  writeln ('Рекомендуемое значение остаточного ресурса в годах -
',Nq*1000/(0.75*20*60*60*350):4:2);
end;
end
else
begin
  writeln ('Расчет произведен по усредненным параметрам');
  if Hcmin<2.58 then Nq3min:=4999999.99;
  if (Hcmin>=2.58) and (Hcmin<=3.00) then Nq3min:=(((21163.0719-
10975.4676*Hcmin)/(1-0.6522*Hcmin+0.1025*sqr(Hcmin)))+(22387.0758-
11470.6133*Hcmin)/(1-0.6486*Hcmin+0.1011*sqr(Hcmin))))/2;
  if (Hcmin>=3.01) and (Hcmin<=5.00) then Nq3min:=(((1+3277135.3096*Hcmin)/(-
299.3813+108.6487*Hcmin))+(1+969707697.1745*Hcmin)/(-
92865.9187+33615.6134*Hcmin)))/2;

```

```

    if (Hcmin>=5.01) and (Hcmin<=6.35) then Nq3min:=((( -6.3543+Hcmin)/(-
0.00006752+0.0000088760*Hcmin))+((19546.8352-3041.0255*Hcmin)/(1-
0.3330*Hcmin+0.0296*sqr(Hcmin))))/2;
    if Hcmax<2.58 then Nq3min:=4999999.99;
    if (Hcmax>=2.58) and (Hcmax<=3.00) then Nq3max:=(((21163.0719-
10975.4676*Hcmax)/(1-0.6522*Hcmax+0.1025*sqr(Hcmax)))+(22387.0758-
11470.6133*Hcmax)/(1-0.6486*Hcmax+0.1011*sqr(Hcmax))))/2;
    if (Hcmax>=3.01) and (Hcmax<=5.00) then Nq3max:=(((1+3277135.3096*Hcmax)/(-
299.3813+108.6487*Hcmax))+((1+969707697.1745*Hcmax)/(-
92865.9187+33615.6134*Hcmax)))/2;
    if (Hcmax>=5.01) and (Hcmax<=6.35) then Nq3max:=((( -6.3543+Hcmax)/(-
0.00006752+0.0000088760*Hcmax))+((19546.8352-3041.0255*Hcmax)/(1-
0.3330*Hcmax+0.0296*sqr(Hcmax))))/2;
    writeln ('Величина остаточного ресурса находится в диапазоне от
',Nq3max*4:8:2,' до ',Nq3min*4:8:2,' циклов');
    Nq:=Nq3max+(Nq3min-Nq3max)*0.65;
    writeln ('Рекомендуемое значение остаточного ресурса в циклах - ',Nq*4:8:2);
    writeln ('Рекомендуемое значение остаточного ресурса в километрах пробега -
',Nq:8:2);
    writeln ('Рекомендуемое значение остаточного ресурса в годах -
',Nq*1000/(0.75*20*60*60*350):4:2);
    end;
sleep(500000);
end.

```

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024613806

**Программа для оценки остаточного ресурса
металлоконструкции эскалаторов метрополитена**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I» (RU)**

Авторы: **Дятлов Вячеслав Николаевич (RU), Козлов Максим
Николаевич (RU), Попов Валерий Анатольевич (RU),
Воробьев Александр Алфеевич (RU)**

Заявка № 2024612398

Дата поступления **07 февраля 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **15 февраля 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024613803

**Программа обработки телеметрической информации
технического состояния эскалаторов**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС) (RU)*

Авторы: *Козлов Максим Николаевич (RU), Дятлов Вячеслав
Николаевич (RU), Метлякова Софья Александровна (RU),
Ватулин Ян Семенович (RU), Воробьев Александр Алфеевич (RU)*

Заявка № 2024612400

Дата поступления 07 февраля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 февраля 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты внедрения

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I»
(ФГБОУ ВО ПГУПС)
Московский пр., д.9, Санкт-Петербург, 190031
Телефон: (812) 457-86-28, факс: (812) 315-26-21
E-mail: dou@pgups.ru, http://www.pgups.ru
ОКПО 01115840, ОГРН 1027810241502,
ИНН 7812009592/ КПП 783801001

Утверждаю

Первый проректор-проректор
по учебной работе

Рыбин П.К.



2025 г.

20.02.2025 № 005.05.1-44/55

На № _____ от _____

Г Акт внедрения результатов
диссертационной работы В.Н. Дятлова

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационного исследования
на соискания ученой степени кандидата технических наук Дятлова Вячеслава Николаевича
на тему «Метод прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов»

Комиссия в составе:

Председатель:

Декан факультета «Транспортные и энергетические системы», к.т.н., доцент

Чуян С.Н.;

члены комиссии:

- председатель методической комиссии факультета «Транспортные и энергетические системы», д.т.н., профессор Кононов Д.П.;

- заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические комплексы», д.т.н., профессор Воробьев А.А.;

- доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы», к.т.н., доцент Попов В.А.

составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Дятлова В.Н., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.11 «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы», используются в учебном процессе при реализации основной образовательной программы высшего образования – программы специалитета по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», специализация «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование».

Материалы исследований использованы при подготовке лекционных курсов и при проведении практических занятий по следующим дисциплинам специализации:

- Б1.В.2 «Машины и оборудование непрерывного транспорта (252 ч./7 з. ед.);

- Б1.В.4 «Эксплуатация подъемно-транспортных строительных, дорожных средств и оборудования» (288 ч./8 з.ед.);
- Б1.В.5 «Ремонт и утилизация подъемно-транспортных строительных, дорожных средств и оборудования» (180 ч./5 з.ед.);
- Б1.В.10 «Технология производства подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования» (108 ч./3 з.ед.).

Разработанный автором метод прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов применяется обучающимися при выполнении курсовых работ и проектов, а также при выполнении выпускных квалификационных работ.

Председатель комиссии:

Декан факультета «Транспортные и энергетические системы»
к.т.н., доцент



С.Н. Чуян

члены комиссии:

председатель методической комиссии факультета «Транспортные и энергетические системы»,
д.т.н., профессор



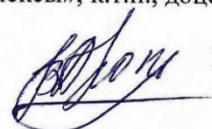
Д.П. Кононов

заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические комплексы»,
д.т.н., профессор



А.А. Воробьев

доцент кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы», к.т.н., доцент



В.А. Попов



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ МЕТРОПОЛИТЕН»
(ГУП «ПЕТЕРБУРГСКИЙ МЕТРОПОЛИТЕН»)
ЭСКАЛАТОРНАЯ СЛУЖБА

ПР. СТАЧЕК, Д. 100, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 198207
ТЕЛ./ФАКС 784-08-29
E-mail: escalatornaya@metro.spb.ru

ОКПО 03222055 ОГРН 1027810223407
ИНН 7830000970 КПП 783801001

02.12.2024 № 21706-27/84

На № _____ от _____

Справка о возможности внедрения результатов диссертационной работы

Поддержание приемлемого ресурсного уровня технического состояния объектов эскалаторного хозяйства метрополитена Санкт-Петербурга требует периодического проведения мероприятий по обслуживанию и ремонту эксплуатируемого оборудования. Рациональная организация данной деятельности предполагает информационную поддержку процесса – диагностику. Совокупность формализованных представлений цифровых образов дефектных состояний и их экспертное ранжирование образует базу знаний системы управления рисками состояния объекта наблюдения.

К результатам диссертационной работы Дятлова В.Н., значимым для применения и используемым на практике с точки зрения обеспечения надёжности элементов и безопасности производства работ по обслуживанию и ремонту эксплуатируемого оборудования, следует отнести предложенные цифровые модели отказов, структуру базы знаний критериев экспертной оценки, инженерную методику анализа данных динамического нагружения исследуемого объекта на предмет содержания поисковых информационных образов, что в действительности даёт возможность сократить количество и продолжительность проводимых диагностических мероприятий.

Разработанные номограммы, ставшие основой при создании программных продуктов для использования их на ЭВМ, были успешно применены при определении остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов метрополитена при проведении соответствующих экспертных оценок. Возможность учитывать изменение характеристик окружающей среды в зависимости от того, где расположен тот или иной эскалатор географически, позволил расширить сферу применения предложенной ФГБОУ ВО ПГУПС программ (свидетельства № 2024613806, дата государственной регистрации 15.02.2024, и № 2024613803, дата государственной регистрации 15.02.2024).

Настоящим актом подтверждается, что положения и результаты исследования Дятлова В.Н. обладают актуальностью, представляют практический интерес и применены в деятельности Эскалаторной службы ГУП «Петербургский метрополитен».

Заместитель начальника Эскалаторной
службы



А.М. Шейнин



Россия, 199048, Санкт-Петербург, 17-я линия В.О., д. 54, к. 4, лит. А
 Тел.: (812) 321-57-48, тел./факс: (812) 323-57-75
 E-mail: info@es-servis.com; www.es-servis.com

29.11.2024 № №-065КБ
 на № _____ от _____

АКТ о внедрении результатов диссертационной работы

Дятлова Вячеслава Николаевича

Настоящим сообщаем, что результаты диссертационной работы Дятлова В.Н., представленные в виде цифровых моделей отказов оборудования, структурированной базы знаний для экспертной оценки таких сложных технических систем как эскалаторы и метода анализа динамических нагрузок для выявления информационных шаблонов, предсказывающих потенциальные проблемы, показали свою эффективность с точки зрения обеспечения надёжности элементов эксплуатируемого оборудования и нашли практическое применение при проектировании металлоконструкций эскалаторов, как при подборе материала, так и создании банка начальных данных.

Также практический интерес представляют разработанные номограммы, трансформированные в программное обеспечение для ЭВМ (свидетельства № 2024613806, дата государственной регистрации 15.02.2024, и № 2024613803, дата государственной регистрации 15.02.2024), что стало эффективным инструментом для анализа и прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов. Расширенная функциональность предложенных программ, реализованная через возможность учитывать изменение характеристик окружающей среды, позволяет использовать их в различных климатических регионах.

Использование результатов диссертационной работы Дятлова В.Н. направлено на повышение степени достоверности результатов оценки технического состояния несущих металлоконструкций эскалаторов, оценки возможности дальнейшей надёжной и безопасной эксплуатации с определением величины остаточного ресурса.

Начальник СКБЭ



А.А. Кузьмин