

На правах рукописи



СУПЛЕЦОВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКОВ СЛУЖБЫ СТАЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ В
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Улан-Удэ 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Корнилов Терентий Афанасьевич

Официальные оппоненты: **Туснин Александр Романович**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский московский
государственный строительный университет»,
заведующий кафедрой «Металлические и
деревянные конструкции»
Солодов Николай Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова», доцент кафедры
«Строительство и городское хозяйство»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет», г. Красноярск.

Защита состоится «23» декабря 2022 г. в 9⁰⁰ на заседании диссертационного совета 99.2.050.02, созданного на базе Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления по адресу: 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40 В, стр. 8, ауд. 8-124.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления и на официальном сайте www.esstu.ru.

Автореферат разослан «31» октября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Урханова Лариса Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Количественная характеристика долговечности строительной конструкции предопределяется процессом постепенного ухудшения технического состояния или отказами установленных функциональных характеристик. Применение статистических данных о количестве отказов в единицу времени или интенсивности отказов функциональных характеристик строительной конструкции в контексте практической разработки прогнозных моделей технического состояния представляется возможным решением задачи повышения долговечности.

Анализ действующих нормативных документов показывает, что они не содержат однозначной информации о точном и аргументированном значении срока службы строительной конструкции или здания и сооружения определенного функционального назначения, которые запроектированы в соответствии с действующими нормами проектирования, с учетом предполагаемых условий эксплуатации и применением конкретной конструктивной системы и строительных материалов, например, металлических конструкций. Вместе с тем, если в задании на проектирование устанавливается точное, но директивное значение срока службы, то в нормативных документах не приводятся конкретные проектные параметры (конструктивная система, условия эксплуатации) здания или сооружения.

Рассмотренные выше обстоятельства указывают на актуальность разработки методики по прогнозированию сроков службы стальных конструкций производственных зданий в экстремальных условиях эксплуатации с учетом возможного или вероятного уровня технического состояния, вызванного условиями эксплуатации и воздействиями внешней среды.

Степень разработанности темы исследования. В разные годы разработкой теоретических и практических методов оценки долговечности металлических конструкций производственных зданий, эксплуатирующийся в экстремальных природно-климатических и инженерно-геологических условиях, занимались Т.В. Дормидонтова, А.А. Дубовик, Н.Б. Кудайбергенов, Г.Г. Морозовская, В.В. Филиппов, И.К. Харламов, П.М. Иванов, К.П. Бережнов.

АК «АЛРОСА» с начала эксплуатации обогатительных фабрик пристальное внимание уделяла оценке промышленной безопасности объектов. Сегодня накоплен большой статистический материал по оценке технического состояния и физического износа стальных конструкций обогатительных фабрик АК «АЛРОСА», начиная с 1966 по 2016 годы. В настоящее время появилась возможность более точной оценки сроков службы стальных конструкций производственных зданий алмазодобывающей промышленности с использованием вышеуказанных статистических данных, современных методов математического анализа и возросших мощностей вычислительной техники.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка методики оценки срока службы стальных конструкций производственных зданий на этапе проектирования с учетом факторов эксплуатации и природно-климатических условий Республики Саха (Якутия).

Достижение цели исследований осуществляется последовательным решением следующих задач:

- анализ условий формирования дефектов и повреждений стальных конструкций (включая коррозионный износ) и особенностей их влияния на показатели надежности и эксплуатационной пригодности строительных объектов;

- обзор и характеристика методов определения технического состояния (износа) стальных конструкций;

- обработка результатов натурных обследований стальных конструкций производственных зданий, расположенных на территории Республики Саха (Якутия);

- систематизация и анализ дефектов и повреждений стальных конструкций производственных зданий, расположенных на территории Республики Саха (Якутия), по признакам функционального назначения, конструктивных решений, уровня ответственности, технологических процессов;

- формирование структуры параметров для оценки технического состояния и показателей надежности конструкций строительных объектов, с учетом особенностей их эксплуатации и расположения на территории Республики Саха (Якутия);

- разработка методики оценки срока службы стальных конструкций строительных объектов, анализ совершенства проектных решений производственных зданий;

- формализация рекомендаций по повышению продолжительности срока службы стальных конструкций производственных зданий.

Объект исследования. Объектом исследования являются стальные конструкции производственных зданий.

Предмет исследования. Предметом исследований является анализ параметров технического состояния и разработка методики оценки срока службы стальных конструкций производственных зданий с учетом факторов эксплуатации и природно-климатических условий Республики Саха (Якутия).

Научная новизна. Научная новизна результатов состоит в следующем:

- разработана структура учета влияния дефектов и повреждений на показатели надежности и безопасности функционирования строительных объектов, включающая алгоритм системной оценки параметров для принятия проектных решений по обеспечению показателей надежности производственных зданий;

- разработана методика оценки срока службы стальных конструкций для этапа их проектирования, в которой реализован прогнозный и вероятностный формат оценки количественных значений долговечности и безотказности объекта исследований;

- разработаны рекомендации по формированию (проектированию) показателей надежности, составленные по результатам системного анализа натурных исследований дефектов и повреждений стальных конструкций строительных объектов промышленного назначения, расположенных на территории Республики Саха (Якутия) и эксплуатируемых в экстремальных

природно-климатических, инженерно-геологических и технологических условиях.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в следующем:

- разработана классификация дефектов и повреждений, ориентированная на учёт особенностей их возникновения для следующих основных этапов жизненного цикла стальных конструкций: при изготовлении, при производстве работ (возведении), при эксплуатации;

- разработаны структурные схемы анализа показателей комплексного свойства надёжности в формате показателя долговечности (срока службы);

- разработан и реализован алгоритм определения количественных значений для основных показателей надёжности строительных объектов: проектного срока службы и вероятности безотказной работы (в течение установленного срока службы);

- разработаны предложения по прогнозированию сроков службы и вероятности безотказной работы, которые являются основой для разработки научно-обоснованных рекомендаций по технической эксплуатации стальных конструкций производственных зданий и назначения нормативных значений долговечности на этапе проектирования.

Практическая значимость работы. Практическая значимость работы состоит в следующем:

- даны рекомендации по проектированию объемно-планировочных и конструктивных решений производственных зданий со стальными каркасами;

- разработан методический аппарат и алгоритм статистической обработки информации (зафиксированной в ходе проведения натурных обследований) о характере и количестве дефектов и повреждений конструктивных элементов производственных зданий;

- разработана концепция математической модели прогноза срока службы несущей стальной строительной конструкции (здания), в которой реализован прогнозный и вероятностный формат оценки количественных значений долговечности и безотказности объекта исследований;

- проведен анализ и оценка срока службы конструктивных систем и конструктивных элементов производственных зданий.

Методология и методы исследования. В основе разработанной методики предусматривается использование эффективных статистических, расчетно-аналитических и вероятностных методов исследований с применением методов математического моделирования и автоматизированных средств исследований и проектирования, которые базируются на материалах комплексных натурных обследований. Для автоматизированной обработки и анализа результатов статистических данных применялись сертифицированные программно-вычислительные комплексы, текстовые и графические редакторы, российского и иностранного производства. В процессе проведения натурных обследований стальных конструкций производственных зданий применялись средства неразрушающего контроля качества, включенные в государственный реестр средств измерений Российской Федерации, и прошедшие периодические проверки. Для проведения визуально-инструментальных исследований, в том

числе оценки характера и размеров дефектов и повреждений, использовались методы неразрушающего контроля качества, регламентированные действующей на территории Российской Федерации нормативной документацией. Расчет несущих строительных конструкций осуществлялся в сертифицированных расчетных программах ЛИРА-САПР и SCAD Office.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм оценки показателей надёжности несущих стальных конструкций, характеризующихся наличием дефектов и повреждений.

2. Факторы, предопределяющие срок службы эксплуатируемых стальных конструкций производственных зданий, установленные на основе обобщения результатов многолетних комплексных натурных обследований.

3. Количественные характеристики износа стальных конструкций производственных зданий, установленные на основе методики определения количественных показателей интенсивностей возникновения и накопления дефектов и повреждений.

4. Методика оценки срока службы стальных конструкций производственных зданий на этапе их проектирования и рекомендации по формированию показателей надёжности стальных конструкций производственных зданий, эксплуатируемых в экстремальных природно-климатических, инженерно-геологических и технологических условиях.

Степень достоверности. Достоверность результатов диссертационной работы обосновывается анализом значительного объема научно-технической литературы и нормативной документации в строительстве; полнотой теоретических и практических исследований; применением общепринятых статистических, расчетно-аналитических и вероятностных методов анализа данных. Все результаты исследований подтверждены большим объемом проведенных комплексных натурных обследований на реальных строительных объектах с использованием апробированных визуально-инструментальных методов контроля, сертифицированных расчетных комплексов, специальных приборов и оборудования, прошедших периодические поверки.

Апробация результатов. Основные результаты исследований, проведенных в рамках данной диссертационной работы, предложены для ознакомления и обсуждения в материалах семи научных и тематических конференций и форумов: научно-практическая конференция студентов и аспирантов «IX Лаврентьевские чтения». Якутск: Апрель 2005; региональная научно-практическая конференция, посвящённая 70-летию строительного комплекса РС(Я) и 50-летию Якутского госуниверситета. Якутск: Апрель 2006; научно-практическая конференция студентов и аспирантов «XI Лаврентьевские чтения». Якутск: Апрель 2007; форум научной молодёжи РС(Я), посвящённый году академика В.П. Ларионова. Якутск: Февраль 2008; I Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение». Якутск: Март 2008; XIX Международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». М.: Апрель 2016;

International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies (FarEastCon2018). Vladivostok (Asian-Pacific region), Russia: October 2-4, 2018.

Также в рамках темы диссертационного исследования была выполнена госбюджетная НИР по теме №1239д-10/6.1 «Разработка руководства по технической эксплуатации строительных конструкций обогатительных фабрик АК «АЛРОСА», заказчиком которой являлись Минобрнауки РФ и АК «АЛРОСА» (2010-2012 г.г.).

Внедрение результатов исследования. Полученные автором диссертации научные результаты исследований использованы при разработке руководства по технической эксплуатации строительных конструкций обогатительных фабрик АК «АЛРОСА» (ОАО) и применяются в учебном процессе инженерно-технического института ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова». Достоверность используемых результатов подтверждена актами внедрения, приведенными в диссертационной работе после списка литературы.

Личный вклад автора. Автор участвовал в определении цели работы и постановке задач исследования, принимал активное участие в обсуждении результатов диссертации на конференциях и форумах, в написании статей по теме диссертационного исследования. Автором выполнен анализ положений нормативных и справочных документов, касающихся темы диссертационного исследования, и проведен аналитический обзор фактического уровня технического состояния конструктивных элементов и систем строительных объектов производственного назначения, на основании которого разработана авторская классификация дефектов и повреждений, ориентированная на учёт особенностей их возникновения. Кроме этого, автор, в период с 2004 по 2016 годы, принимал непосредственное участие в комплексных натурных обследованиях технического состояния стальных конструкций производственных зданий, расположенных на территории Республики Саха (Якутия), результаты которых приняты в основу разработки методического аппарата и алгоритма статистической обработки информации о характере и количестве дефектов и повреждений. Автором самостоятельно проведены расчеты и анализ количественных характеристик износа стальных конструкций производственных зданий. Лично автором, с применением разработанной методики прогноза (математической модели), проведен анализ и оценка срока службы конструктивных систем и конструктивных элементов производственных зданий. Основные результаты, приведённых в диссертации исследований, получены лично автором, доложены в ряде научно-технических мероприятий и отражены в публикациях.

Публикации. По теме диссертации всего опубликовано 10 научных трудов, включая 4 в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 2 в периодических научных изданиях из перечня международной базы данных Scopus. Общий объем всех публикаций в печатных листах составляет 3,44 п.л., объем выполненный лично автором – 1,47 п.л. Общий объем публикаций в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ (включая публикации в периодических научных изданиях из перечня базы

данных Scopus), в печатных листах – 2,26 п.л., объем, выполненный лично автором – 0,92 п.л.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает в себя: введение, четыре главы, заключение, список литературы (193 наименования, в том числе 27 на иностранных языках), 2 акта внедрения, 3 приложения, 53 рисунка, 28 таблиц, 4 формулы. Общий объем диссертации составляет 258 страниц.

Автор благодарит своего научного руководителя, директора инженерно-технического института, доктора технических наук ФГАОУ ВО «СВФУ имени М.К. Аммосова» Т.А. Корнилова, и выражает глубокую признательность В.В. Филиппову, член-корреспонденту РАН, за консультации при проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследования, указаны научная новизна и практическая ценность работы, перечислены основные защищаемые положения.

В первой главе проведен аналитический обзор основных видов и признаков дефектов и повреждений несущих стальных конструкций производственных зданий. Разработана авторская классификация дефектов и повреждений, состоящая из 14 групп и ориентированная на учёт особенностей их возникновения на основных этапах жизненного цикла стальных конструкций: при изготовлении, возведении и эксплуатации. Для каждой группы установлены количественные показатели дефектов и повреждений. Классификация дефектов и повреждений стальных конструкций позволяет осуществлять оценку возможности их проявления и разрабатывать систему мероприятий, ориентированных на предотвращение формирования и развития соответствующих аварийных последствий.

Рассмотрены особенности оценки показателей технического состояния стальных конструкций при наличии дефектов и повреждений. Одним из возможных направлений формирования новой классификации технических состояний, является системный подход к анализу показателей функциональной эффективности характеристик стальных конструкций. Суть подхода заключается в формализации возможных видов технического состояния и анализе условий, определяющих переходы между рассматриваемыми видами технического состояниями объектов исследований. В общем случае возможное количество технических состояний и направлений переходов между этими состояниями можно отобразить в виде соответствующей схемы (рис. 1).

В качестве возможных видов технических состояний допущены категории:

- «Состояние 1» – техническое состояние, которое характеризуется минимальной величиной (или отсутствием) отклонения показателей качества от установленных (проектных) значений условий и/или режимов эксплуатации (например, аналогичное категории: «исправное»);

- «Состояние 2» – техническое состояние, которое характеризуется наличием такой величины отклонений показателей качества от установленных (проектных) значений, которые не критичны для фактических условий и/или всех режимов эксплуатации (например, аналогичное категории: «работоспособное»);
- «Состояние 3» – техническое состояние, которое характеризуется наличием такой величины отклонений показателей качества от установленных (проектных) значений, которые критичны для фактических условий эксплуатации и/или всех режимов эксплуатации (например, аналогичное категории: «ограниченно работоспособное»);
- «Состояние 4» – техническое состояние, которое характеризуется наличием такой величины отклонений показателей качества от установленных (проектных) значений, которые критичны для фактических условий эксплуатации и не допускают применения установленных (проектных) режимов эксплуатации, за исключением единственного режима: с ограничениями или без ограничений (например, аналогичное категории: «недопустимое»);
- «Состояние 5» – техническое состояние, которое характеризуется наличием такой величины отклонений показателей качества от установленных (проектных) значений, которые настолько критичны для фактических условий эксплуатации, что требуют немедленной остановки любого из возможных режимов эксплуатации (например, аналогичное категории: «неработоспособное (аварийное)»).

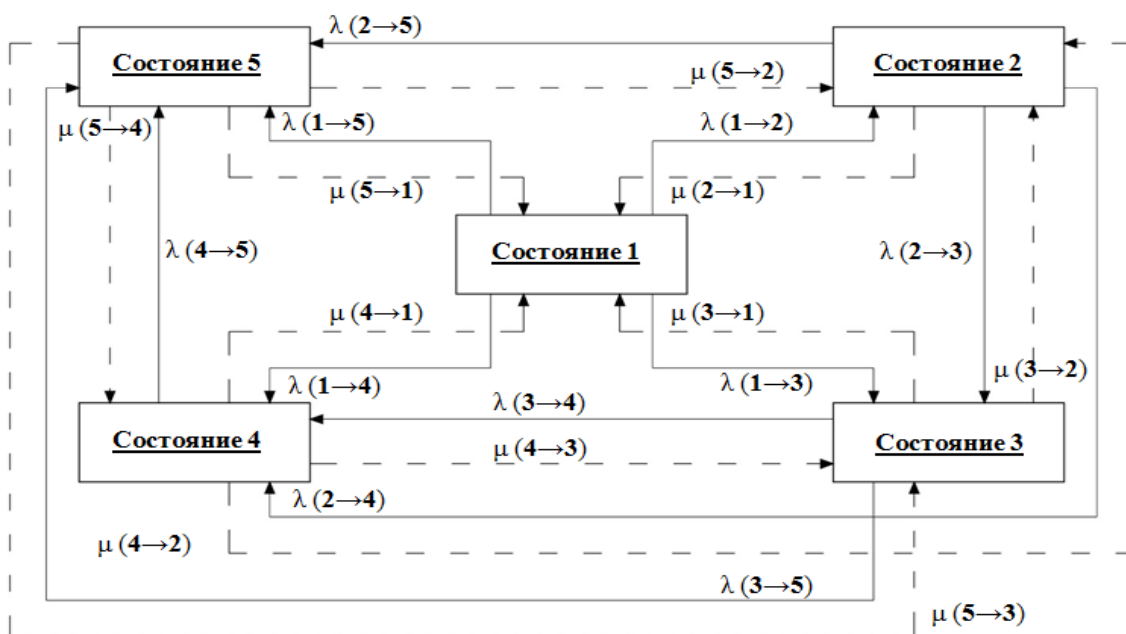


Рис. 1. Схема возможных технических состояний объекта исследований, где λ – количественный параметр, характеризующий направление перехода (развития деградационного процесса): из менее значительного в более значительное состояние; μ – количественный параметр, характеризующий направление перехода (парирования деградационного процесса): из более значительного в менее значительное состояние

Характер переходов между принятыми категориями технических состояний определяется посредством количественных параметров вида λ и μ (рис. 1). Эти показатели находятся в прямой зависимости от значений

зафиксированного количества дефектов и повреждений, а также восстановления соответствующих показателей качества. Определение количественных значений параметров вида λ и μ осуществляется на первом шаге в последовательности оценки технического состояния стальных конструкций.

Разработан алгоритм оценки показателей надёжности несущих стальных конструкций, характеризующихся наличием дефектов и повреждений, которые служат базой для прогнозирования сроков службы.

Нормативные положения по проектированию строительных конструкций практически не содержат аргументированных и научно-обоснованных рекомендаций по аналитическому учету фактора времени. Предполагается, что если срок службы производственного здания устанавливается в соответствии с положениями нормативных документов, то требуемый показатель надёжности должен быть поставлен в соответствие этой продолжительности времени. Такой подход предполагает реализацию комплекса мероприятий для защиты и восстановления конструкций от проявлений негативных факторов.

По результатам проведенного анализа положений нормативных и справочных документов обоснована актуальность темы исследования и определены цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе проведен анализ технического состояния стальных конструкций обогатительных фабрик №3,8,12,14,15,16 АК «АЛРОСА», расположенных на территории Республики Саха (Якутия), по результатам комплексных натурных обследований за период времени с 1966 по 2016 годы, в следующем составе:

- исследования проектно-технологической документации;
- инструментальные обследования стальных конструкций;
- натурные обследования стальных конструкций;
- расчеты и анализ напряжённо-деформированного состояния несущих стальных конструкций.

Уровень технического состояния стальных конструкций является основным управляющим показателем, а его количественное значение является основным результатом обследований по указанным направлениям. Установлено, что фактический уровень технического состояния обусловлен накоплением дефектов и повреждений на всех стадиях функционирования конструкций: изготовления, перевозки, хранения, монтажа и эксплуатации. Выявленные дефекты и повреждения носят разный характер, количество и интенсивность проявления, устранения, накопления и по-разному влияют на снижение несущей способности (рис. 2).

Все дефекты и повреждения классифицированы по категориям опасности «А», «Б» и «В» в соответствии с положениями РД 22-01-97 «Требования к проведению оценки безопасности эксплуатации производственных зданий и сооружений поднадзорных промышленных производств и объектов (обследования строительных конструкций специализированными организациями)». Также проведена систематизация выявленных дефектов и повреждений стальных конструкций по видам, возможной причине появления и вероятным последствиям.



Вырез в балке



Погиб полки и вырыв в
стержне фермы



Отрезаны балки



Разрыв горизонтальной связи



Погиб верхней полки
прогона



Взаимное смещение торцов
стыкуемых рельсов в плане и
по высоте



Сквозная коррозия колонны



Сквозная коррозия балки
перекрытия



Сплошная коррозия балок
перекрытия

Рис.2. Характерные дефекты и повреждения стальных конструкций обогатительных фабрик

На основе обобщения результатов комплексных натурных обследований установлены факторы, предопределяющие срок службы эксплуатируемых стальных конструкций:

- дефекты и повреждения механического характера, составляющие от 20,0 до 40,0% от общего объема дефектов и повреждений;
- среда эксплуатации, классифицирующаяся по степени опасности как среднеагрессивная и сильноагрессивная;
- коррозионный износ, приводящий к снижению геометрических характеристик сечений от 5,0% до сквозного повреждения конструкций.

Результаты проведенного анализа принимаются в качестве методического обоснования для постановки и решения задачи прогнозирования сроков службы стальных конструкций с учетом оценки их технического состояния.

По результатам анализа объемно-планировочных и конструктивных решений обогатительных фабрик, с точки зрения надежности стальных конструкций каркаса, выданы рекомендации для проектирования объектов в будущем.

В третьей главе разработан методический аппарат и алгоритм статистической обработки данных о характере и количестве дефектов и повреждений стальных конструкций, зафиксированных в ходе проведения комплексных натурных обследований. Статистические показатели разделены на абсолютные и относительные критерии. Из абсолютных критериев можно выделить статистические показатели вида: «количество дефектов и повреждений», «количество отклонений от проектного положения» или «количество изменений характеристик материала (стали)», зафиксированных за определенный период времени, например, за год.

Из относительных показателей используется следующий критерий отображения технического состояния эксплуатируемых стальных конструкций в виде:

$$\lambda_d = \frac{n_d}{N_\Sigma}, \quad (1)$$

где n_d – количество дефектов и повреждений, штук;

N_Σ – общее количество однотипных стальных конструкций, принятых к рассмотрению, штук.

В состав абсолютного показателя «количество возникших дефектов» включены зафиксированные случаи обнаружения дефектов и повреждений категорий опасности «А», «Б» и «В». В состав абсолютного показателя «количество устранённых дефектов» включены зафиксированные случаи устранения или снижения категории опасности для обнаруженных дефектов и повреждений (например, перевод дефекта из категории «А» в категорию «Б» или «В»). В состав абсолютного показателя «количество накопленных дефектов» включены обнаруженные дефекты и повреждения, которые сохранили установленную категорию опасности.

Методика определения количественных показателей интенсивностей возникновения и накопления дефектов представлена примером анализа функционирования (в период времени с 1966 по 1970 годы) второстепенных балок перекрытий (в количестве 124 штук), входящих в каркас обогатительной фабрики №3 (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты определения количественных показателей интенсивности возникновения и накопления дефектов и повреждений второстепенных балок перекрытий обогатительной фабрики №3

Год	Дефекты и повреждения, шт.			Общее количество конструкций, шт.	Интенсивность возникновения дефектов, годовая	Интенсивность возникновения дефектов, с начала эксплуатации	Интенсивность накопления дефектов, годовая	Интенсивность накопления дефектов, с начала эксплуатации
	возникшие	устраненные	накопленные					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1966	5	0	5	124	0.0403	0.0403	0.0403	0.0403
1967	0	2	3	124	0.0000	0.0202	0.0242	0.0323
1968	0	2	1	124	0.0000	0.0134	0.0081	0.0242
1969	3	0	4	124	0.0242	0.0161	0.0323	0.0262
1970	5	2	7	124	0.0403	0.0210	0.0565	0.0323

Первый отрезок времени (1966 год – один год эксплуатации):

В первый год эксплуатации зафиксировано возникновение 5 дефектов (графа «2») категорий «А», «Б», «В», которые являются следствием неправильных действий на этапе возведения каркаса обогатительной фабрики №3. В течение рассматриваемого периода времени не отмечено действий, направленных на устранение возникших дефектов, поэтому в соответствующей графе таблицы (графа «3») появилось значение «0», а все 5 возникших дефектов перешли в категорию «накопленные» дефекты (графа «4»).

Годовая (т.е. в течение только 1966 года) интенсивность возникновения дефектов имеет следующие значения (относительные показатели):

$$\lambda_{д1966}(\text{графа "б"}) = \frac{n_{дв}(\text{графа "2"})}{N_{\Sigma}(\text{графа "5"})} = \frac{5}{124} = 0.0403.$$

Поскольку 1966 год завершает один год суммарной эксплуатации, интенсивность возникновения дефектов, с начала эксплуатации, имеет следующие значения (относительные показатели):

$$\lambda_{дНЭ}(\text{графа "7"}) = \frac{\lambda_{д1966}(\text{графа "б"})}{(1966-1966)+1} = \frac{0.0403}{1} = 0.0403.$$

Годовая (т.е. в течение только 1966 года) интенсивность накопления дефектов имеет следующие значения (относительные показатели):

$$\lambda_{д1966}(\text{графа "8"}) = \frac{n_{дн}(\text{графа "4"})}{N_{\Sigma}(\text{графа "5"})} = \frac{5}{124} = 0.0403.$$

Поскольку 1966 год завершает один год суммарной эксплуатации, интенсивность накопления дефектов, с начала эксплуатации, имеет следующие значения (относительные показатели):

$$\lambda_{дНЭ}(\text{графа "9"}) = \frac{\lambda_{д1966}(\text{графа "8"})}{(1966-1966)+1} = \frac{0.0403}{1} = 0.0403.$$

Второй отрезок времени (1967 год – два года эксплуатации):

Во второй год эксплуатации зафиксировано возникновение 0 дефектов (графа «2») категорий «А», «Б», «В» для рассматриваемых второстепенных балок перекрытий обогатительной фабрики №3. В течение рассматриваемого периода времени отмечено 2 действия, направленных на устранение возникших или накопленных дефектов, поэтому в соответствующей графе таблицы (графа «3») появилось значение «2», а от 5 накопленных дефектов осталось значение «3» (графа «4»).

Годовая (т.е. в течение только 1967 года) интенсивность возникновения дефектов имеет следующие значения (относительные показатели):

$$\lambda_{д1967}(\text{графа "б"}) = \frac{n_{дв}(\text{графа "2"})}{N_{\Sigma}(\text{графа "5"})} = \frac{0}{124} = 0.0000.$$

Поскольку 1967 год завершает два года суммарной эксплуатации, интенсивность возникновения дефектов, с начала эксплуатации, имеет следующие значения (относительные показатели):

$$\lambda_{\text{дНЭ}}(\text{графа "7"}) = \frac{\lambda_{\text{д1966}}(\text{графа "6"}) + \lambda_{\text{д1967}}(\text{графа "6"})}{(1967-1966)+1} = \frac{0.0403}{2} = 0.0202.$$

Годовая (т.е. в течение только 1967 года) интенсивность накопления дефектов имеет следующие значения (относительные показатели):

$$\lambda_{\text{д1967}}(\text{графа "8"}) = \frac{n_{\text{дн}}(\text{графа "4"})}{N_{\Sigma}(\text{графа "5"})} = \frac{3}{124} = 0.0242.$$

Поскольку 1967 год завершает два года суммарной эксплуатации, интенсивность накопления дефектов, с начала эксплуатации, имеет следующие значения (относительные показатели):

$$\lambda_{\text{дНЭ}}(\text{графа "9"}) = \frac{\lambda_{\text{д1966}}(\text{графа "8"}) + \lambda_{\text{д1967}}(\text{графа "8"})}{(1967-1966)+1} = \frac{0.0645}{2} = 0.0323.$$

Подобным образом определяются количественные показатели интенсивностей возникновения и накопления дефектов второстепенных балок перекрытий обогатительной фабрики №3 для каждого периода времени. Основные результаты анализа количественных показателей технического состояния второстепенных балок перекрытий всех обогатительных фабрик (общим количеством 670 типоразмеров) за период эксплуатации с 1966 по 2016 годы, представлены на рис. 3, 4, 5.

По результатам анализа определены основные закономерности формирования и количественные значения интенсивностей отказов (для девяти функциональных групп стальных конструкций, с использованием абсолютных и относительных критериев), которые привели к формированию соответствующего технического состояния рассматриваемых объектов.

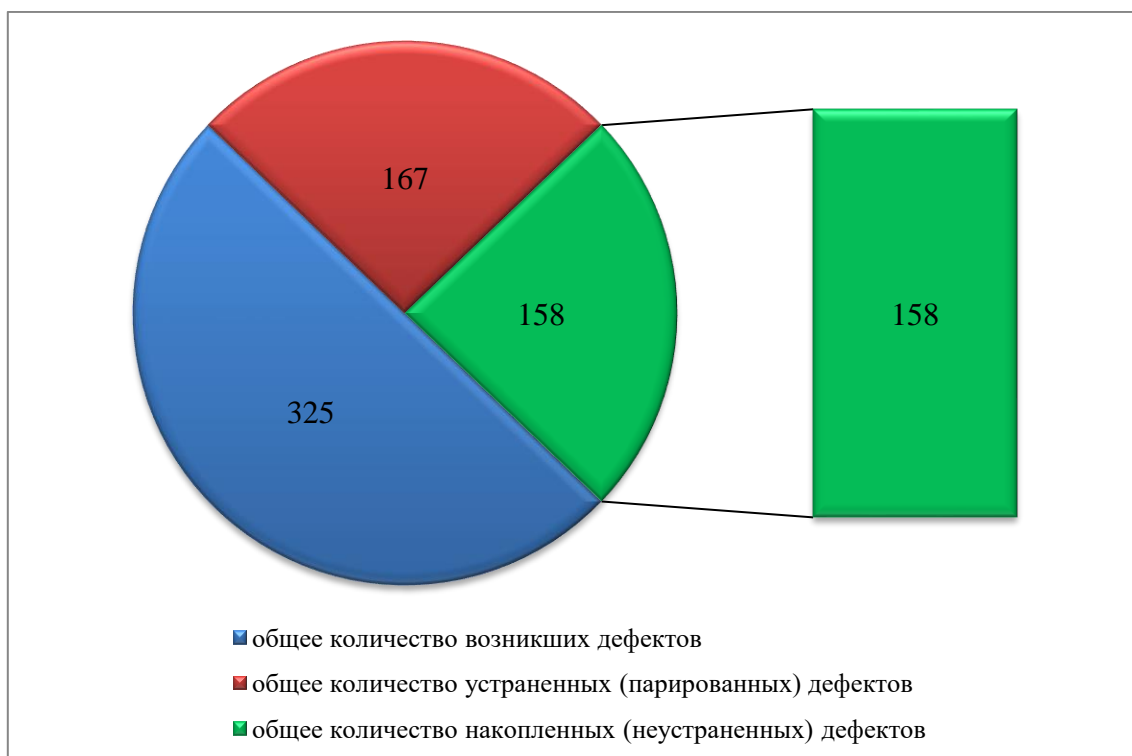


Рис. 3. Абсолютные показатели возникновения, устранения и накопления дефектов и повреждений второстепенных балок перекрытий обогатительных фабрик

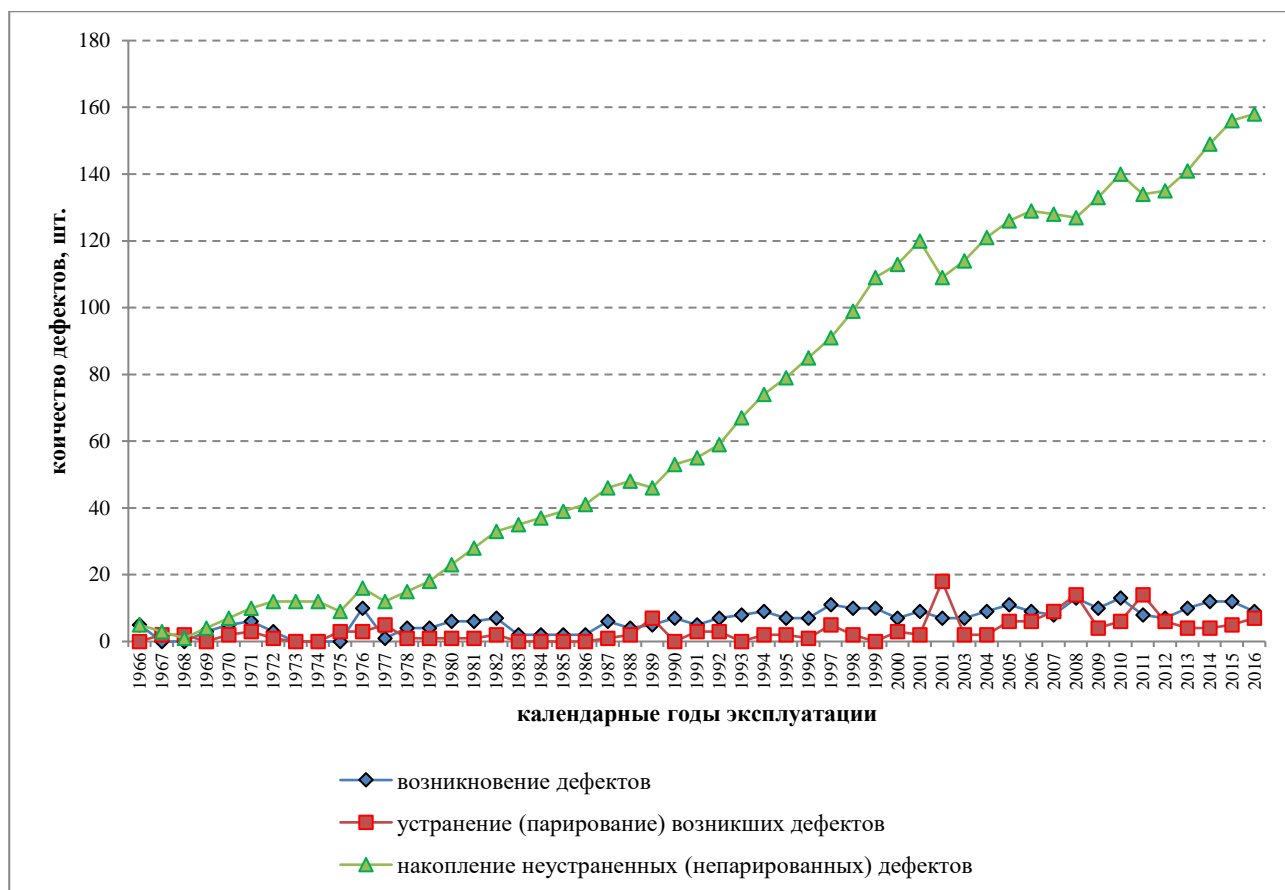


Рис. 4. Динамика возникновения, устранения и накопления дефектов и повреждений второстепенных балок перекрытий обогатительных фабрик

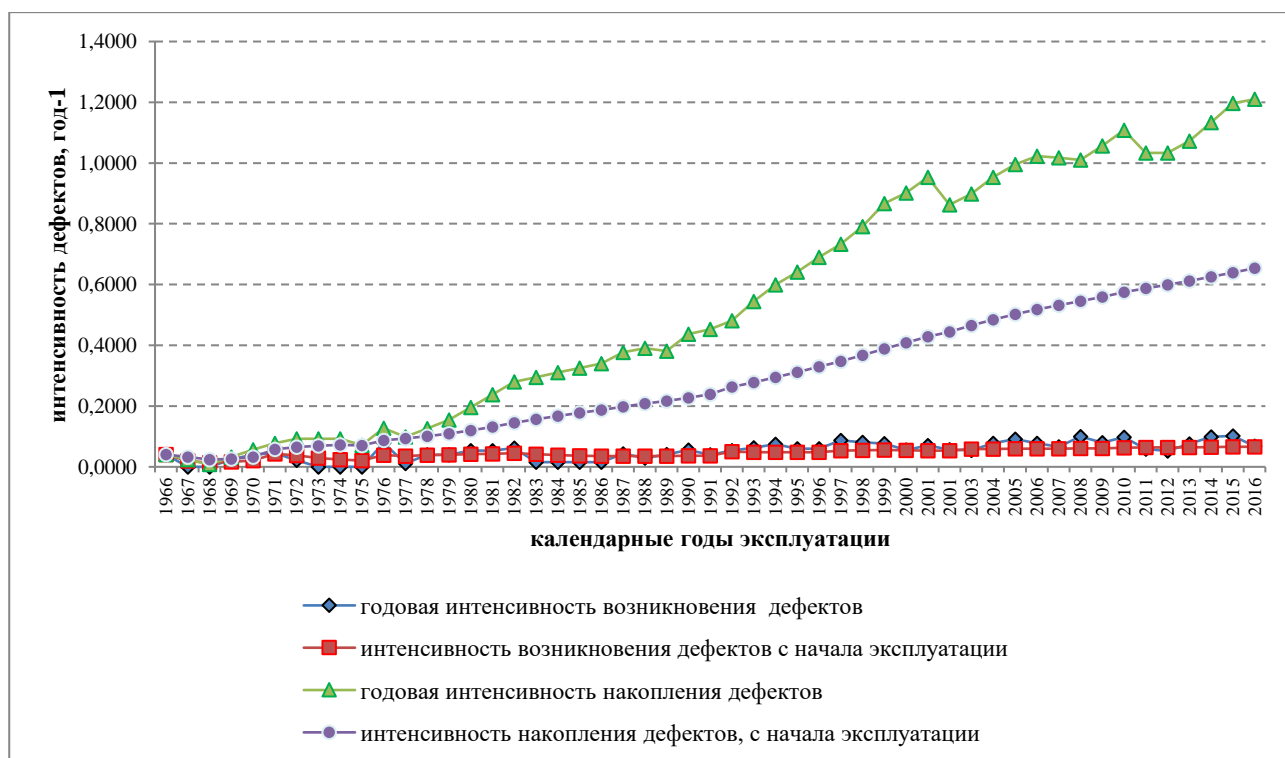


Рис. 5. Динамика интенсивности возникновения, устранения и накопления дефектов и повреждений второстепенных балок перекрытий обогатительных фабрик

Результаты анализа количественных характеристик износа стальных конструкций обогатительных фабрик показали, что интенсивность

возникновения, устранения и накопления дефектов и повреждений по различным фабрикам неодинакова. Однако, при этом, наблюдается прямая зависимость между интенсивностью накопления дефектов и повреждений с начала эксплуатации и сроком службы зданий обогатительных фабрик. Так, в основном (за исключением ОФ№15), интенсивность накопления дефектов и повреждений выше у стальных конструкций обогатительных фабрик раннего периода постройки, имеющих больший срок эксплуатации. Это в свою очередь позволяет использовать полученные значения интенсивности накопления дефектов и повреждений для прогнозирования сроков службы стальных конструкций обогатительных фабрик.

В четвертой главе выполнен анализ показателей функциональной эффективности проектных решений обогатительных фабрик, который производится по единичным (абсолютным) и относительным показателям для рассматриваемых объектов исследований.

Количественные значения интенсивности износа (отказов) каркасов обогатительных фабрик рассматриваются в качестве параметров качества (рейтинга) соответствующих проектных решений, характеризующих особенности проявления дефектов и повреждений (отказов), а также эффективность их устранения на этапе эксплуатации (рис. 6).

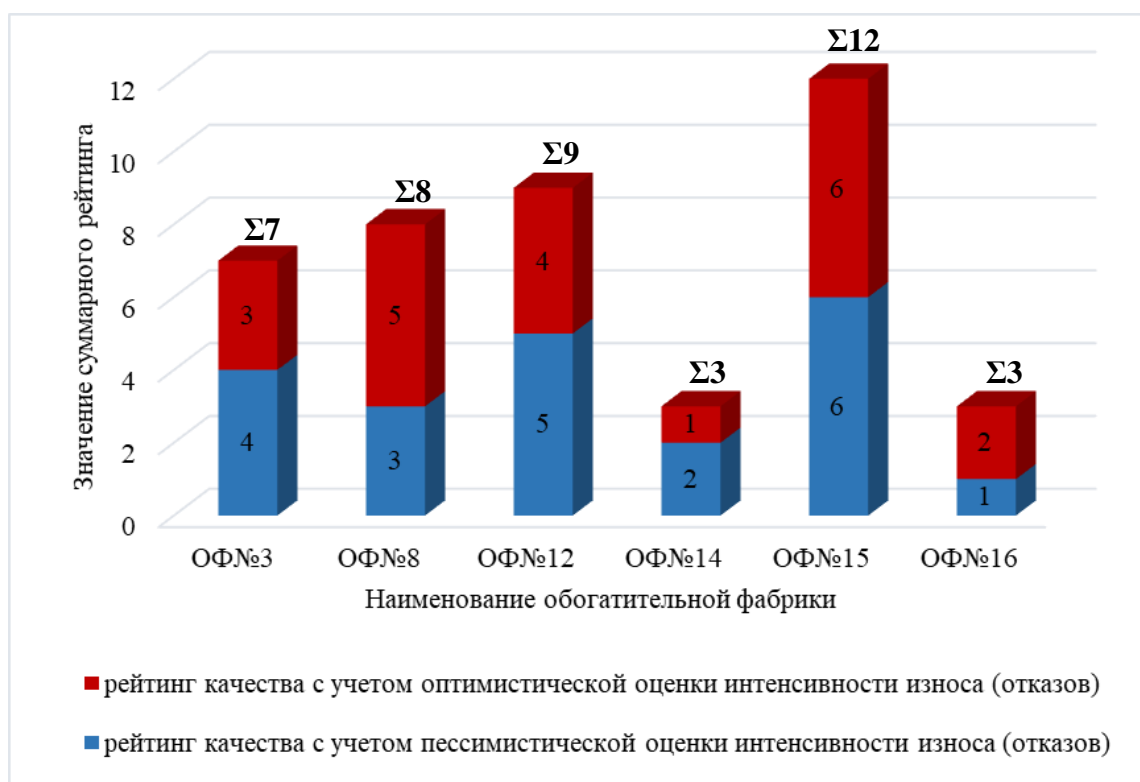


Рис. 6. Количественный анализ проектных решений по показателям интенсивности износа (отказов) каркасов обогатительных фабрик

Из приведенной на рис. 6 информации следует, что параметрами наибольшей функциональной эффективности (наименьшим суммарным значением рейтинга по интенсивности отказов каркасов), отличаются проектные решения обогатительных фабрик: ОФ№16 (суммарный рейтинг: 3) и ОФ№14 (суммарный рейтинг: 3). Наименьшее из возможных значений

функциональной эффективности соответствует проектным решениям обогатительной фабрики ОФ№15 (суммарный рейтинг: 12).

Приведены основные предложения по определению показателей надежности – долговечности (в формате срока службы) и безотказности (в формате интенсивности отказов) стальных конструкций производственных зданий, которые производятся на этапе их проектирования.

В предлагаемой прогнозной математической модели устанавливается связь между долговечностью (сроком службы) и количественной характеристикой показателя износа стальной конструкции или производственного здания в целом:

$$I_t = (e^{\lambda \cdot (t_i - t_0)} - 1) \cdot 100\% . \quad (2)$$

где: I_t – показатель износа конструкции или здания в целом (процент);

e – натуральное число;

λ – интенсивность износа;

t_0 – количество времени, необходимого для «приработки» конструкции (годы);

t_i – срок службы (годы).

Показатель износа объекта исследований I_t в аналитической зависимости (2) является интегральной количественной характеристикой технического состояния стальной конструкции или здания в целом, которая отражает снижение основных функциональных свойств к некоторому моменту времени, определяемому сроком службы.

В принятой прогнозной модели рассматривается процесс, который моделирует переходы строительной конструкции из состояния в состояние (по направлению снижения основных функциональных свойств). Возможные переходы с дискретным числом состояний $u_0, u_1, u_2, \dots, u_n$ представляются в виде последовательности:

$$u_0 \rightarrow u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow \dots \rightarrow u_i \rightarrow u_{i+1} \rightarrow \dots u_n \quad (3)$$

Переход из состояния u_i возможен только в состояние u_{i+1} так, как показано на рис. 7.

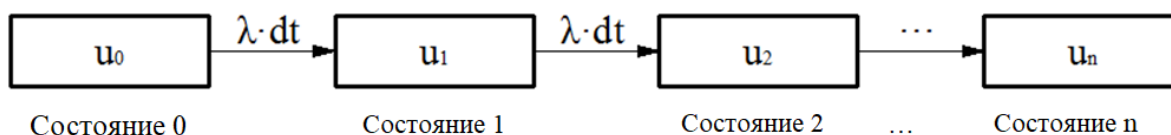


Рис. 7. Схема возможных переходов состояний объекта исследований.

Состояние строительной конструкции u_0 соответствует значению начала срока службы конструкции $t_i = t_0 = 0$ ($I_{t=0} = 0\%$), а состояние строительной конструкции u_n соответствует значению срока службы, принятому для значения показателя износа конструкции, равного $I_t = 60\%$.

После определения прогнозного срока службы, соответствующего установленному значению параметра износа (например, $I_t = 60\%$) проектными решениями устанавливаются такие свойства и условия эксплуатации строительной конструкций или здания в целом, которые не позволяют

значению параметра стать больше, чем проектное значение интенсивности износа.

В предлагаемой вероятностной математической модели устанавливается связь между сроком службы и количественной характеристикой показателя вероятности безотказной работы, с учетом интенсивности износа:

$$P_t = 1 - \frac{1}{n!} \cdot (\lambda \cdot t_i)^n \cdot e^{-\lambda \cdot (t_i - t_0)}, \quad (4)$$

где: P_t – показатель вероятности безотказной работы конструкции или здания в целом (доля от единицы);

e – натуральное число;

λ – интенсивность износа (отказов);

t_0 – количество времени, необходимого для «приработки» конструкции (годы);

n – количество состояний, принятых для анализа надежности;

t_i – срок службы (годы).

Показатель вероятности безотказной работы P_t в аналитической зависимости (4) является количественной характеристикой надежности состояния строительной конструкции или здания в целом, которая отражает снижение основных функциональных свойств к некоторому моменту времени, определяемому сроком службы.

Прогнозная (2) и вероятностная (4) математические модели характеризуют собой последовательные расчетные этапы для определения срока службы проектируемого объекта.

Для анализа результатов исследований принята доктрина пессимистичной и оптимистичной оценки при прогнозе процессов возникновения и накопления дефектов стальных конструкций:

- пессимистическая оценка: интенсивность возникновения и накопления дефектов будет не менее, чем зафиксированное количество за соответствующий период наблюдений;

- оптимистическая оценка: интенсивность парирования (устранения) дефектов будет не менее, чем зафиксированное количество за соответствующий период наблюдений.

Такой подход позволяет осуществить оценку интенсивности возникновения дефектов, вследствие проявления соответствующих аварийных факторов, а также интенсивности накопления (не устранения) дефектов.

На основании проведенных комплексных натурных обследований технического состояния обогатительных фабрик получены фактические данные по динамике проявления дефектов и повреждений, характеризующих интенсивность износа (отказов) рассматриваемых объектов, а также возможности по их устранению (парированию) в процессе эксплуатации. Эти данные позволяют определить количественные значения показателей износа стальных конструкций в формате относительных показателей, характеризующих количество дефектов и повреждений, приходящихся на общее количество (аналитическая зависимость (1)) рассматриваемых стальных конструкций.

В свою очередь, значения показателей износа стальных конструкций рассматриваются в контексте количественных значений параметра « λ – интенсивность износа (отказов)» прогнозной математической модели срока службы (долговечности) строительных конструкций (аналитическая зависимость (2)).

На рис. 8 представлены результаты сравнительной оценки значений интенсивности износа (отказов) каркасов обогатительных фабрик №3,8,12,14,15,16 АК «АЛРОСА» по принятому относительному показателю.

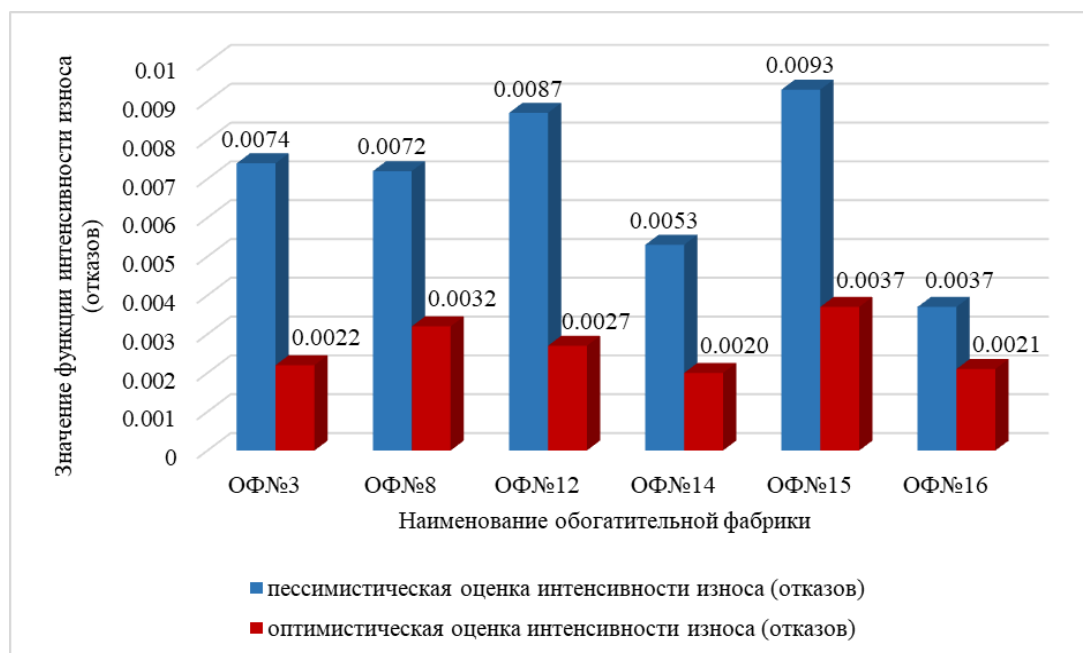


Рис. 8. Результаты сравнительной оценки количественных значений интенсивности износа (отказов)

На рис. 9 представлены значения сроков службы стальных конструкций обогатительных фабрик, на рис. 10 – значения сроков службы каркасов обогатительных фабрик. Для определения количественных значений сроков службы используются статистические данные об интенсивности проявления и устранения (парирования) дефектов и повреждений за время эксплуатации.

Результаты прогнозных расчетов каркасов обогатительных фабрик показали, что имеется прямая зависимость сроков службы зданий от интенсивности их износа. Сроки службы ниже у каркасов обогатительных фабрик раннего периода постройки (за исключением ОФ№15), имеющих наибольшую интенсивность износа. Среднее значение срока службы по всем обогатительным фабрикам составило 75 лет. При этом, срок службы для обогатительных фабрик, имеющих наибольший период эксплуатации и интенсивность износа (ОФ№3,8,12), составил от 55 (ОФ№12) до 66 лет (ОФ№8) при среднем значении 61 год, что близко к фактическому техническому состоянию объектов, установленному по результатам натурных обследований.

В завершении выполнена количественная оценка показателя вероятности безотказной работы стальных конструкций и каркасов обогатительных фабрик. Показатель вероятности безотказной работы рассматривается в качестве показателя надежности, который может быть принят, как показатель качества

проектных решений (технико-экономический показатель). Для оценки сроков службы и вероятности безотказной работы стальных конструкций и каркасов обогатительных фабрик рекомендуется использовать доктрину пессимистической оценки.

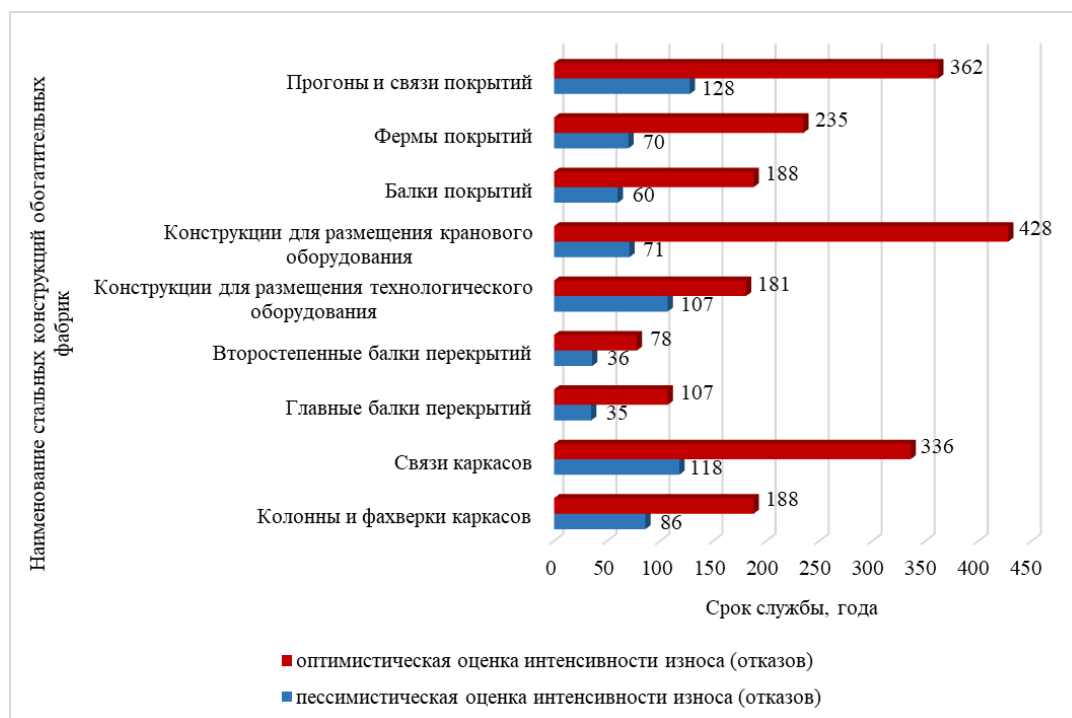


Рис.9. Сроки службы стальных конструкций обогатительных фабрик.

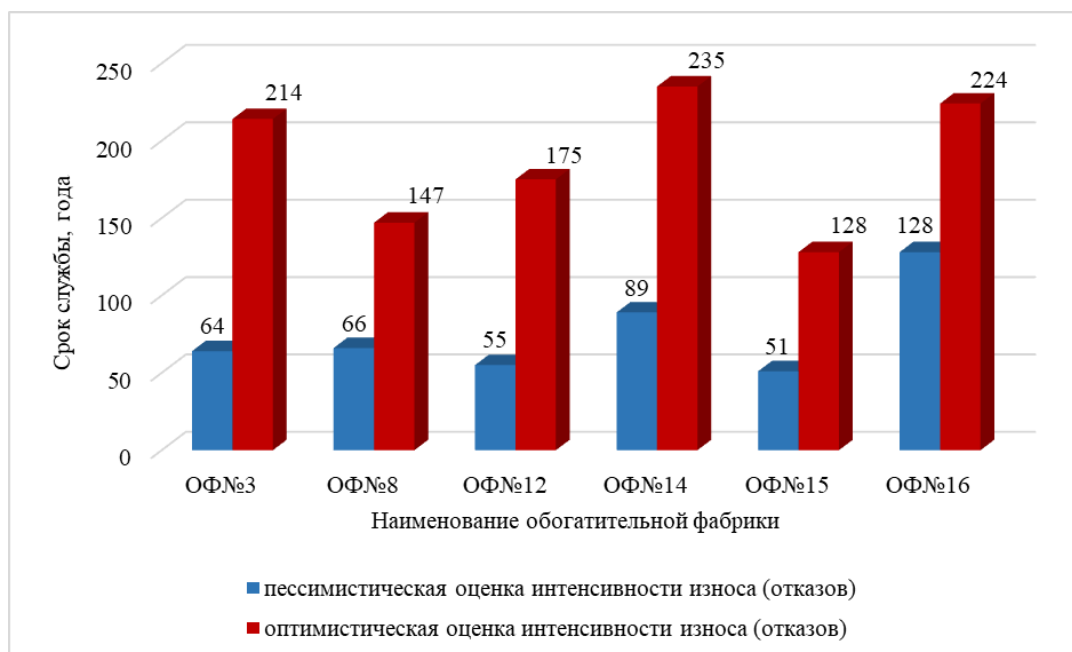


Рис. 10. Сроки службы каркасов обогатительных фабрик

Результаты выполненных в процессе научных исследований работ по обследованию и оценке технического состояния использованы при разработке руководства по технической эксплуатации строительных конструкций обогатительных фабрик АК «АЛРОСА» (ОАО) и внедрены приказом руководства на горно-обогатительных комбинатах компании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ состава и структуры действующей нормативной базы по строительству, который определяет нормативные и устанавливает директивные сроки службы зданий и сооружений различной степени ответственности. Отмечена недостаточная аргументация и обоснованность нормативных рекомендаций по обеспечению сроков службы конкретных видов стальных конструкций производственных зданий.

2. Выполнен анализ условий формирования дефектов и повреждений стальных конструкций и особенностей их влияния на показатели надежности и эксплуатационной пригодности зданий и сооружений. Разработана классификация дефектов и повреждений стальных конструкций, учитывающая особенности их возникновения для всех основных этапов жизненного цикла здания. Предложена концепция управления показателями надежности стальных конструкций с учетом условий формирования и парирования дефектов и повреждений от их проектных значений, которая служит базой для прогнозирования сроков службы.

3. Проведен аналитический обзор качественных и количественных показателей конструктивных решений и фактического уровня технического состояния стальных конструкций каркасов обогатительных фабрик АК «АЛРОСА», расположенных на территории Республики Саха (Якутия). Выполнена структурная обработка, и анализ данных многолетних натурных обследований обогатительных фабрик алмазодобывающей промышленности за период времени с 1966 по 2016 годы, результаты которых приняты в качестве методического обоснования для постановки и решения задачи прогнозирования сроков службы стальных конструкций обогатительных фабрик.

4. Разработан методический аппарат и алгоритм статистической обработки данных о характере и количестве дефектов и повреждений стальных конструкций обогатительных фабрик. По итогам обработки данных составлены графики динамического изменения показателей групп стальных конструкций обогатительных фабрик. Интенсивность накопления дефектов и повреждений с начала эксплуатации фабрик составила по видам стальных конструкций: второстепенные балки перекрытий – 0,6537, главные балки перекрытий – 0,5912, балки покрытий – 0,3509, конструкции для размещения технологического оборудования – 0,3295, конструкции для размещения кранового оборудования – 0,3167, связи каркасов – 0,2802, фермы покрытий – 0,2714, колонны и фахверки каркасов – 0,2652, прогоны и связи покрытий – 0,1644. Результаты анализа количественных характеристик износа стальных конструкций показали на наличие прямой зависимости между интенсивностью накопления дефектов и повреждений с начала эксплуатации и сроком службы зданий обогатительных фабрик. Полученные значения интенсивности накопления дефектов и повреждений использованы для прогнозирования сроков службы стальных конструкций обогатительных фабрик.

5. Разработана методика по прогнозированию сроков службы и технического состояния стальных конструкций обогатительных фабрик, эксплуатируемых в экстремальных условиях. Основной доктриной для оценки

сроков службы стальных конструкций и каркасов обогатительных фабрик принята пессимистическая оценка возможностей и условий для своевременного устранения дефектов и повреждений. По видам стальных конструкций сроки службы составили: от 35 лет (главные балки перекрытий) до 128 лет (прогоны и связи покрытий), по каркасам обогатительных фабрик – от 51 год (ОФ №15) до 128 лет (ОФ №16). В качестве нормативной величины срока службы для обогатительных фабрик рекомендуется принять значение равное 61 году, установленное по среднему значению сроков службы обогатительных фабрик, имеющих наибольший период эксплуатации и интенсивность износа.

6. Полученные при помощи предложенного подхода к прогнозированию сроков службы результаты позволяют оптимизировать соответствующие конструктивные решения и показатели надёжности на этапе проектирования несущих стальных конструкций производственных зданий аналогичного назначения. Результаты исследований показывают принципиальную возможность аргументированного определения срока службы именно на этапе проектирования строительных конструкций. Для рассмотренных зданий обогатительных фабрик, корректное решение задачи достигнуто благодаря наличию многолетних комплексных наблюдений за их техническим состоянием.

7. Предложена математическая модель для оценки показателя надёжности объектов исследований в формате вероятности безотказной работы. Для определения количественных значений рассматриваемого показателя надёжности использованы данные об интенсивности износа за время эксплуатации и прогнозного срока службы соответствующих стальных конструкций. Среднее значение вероятности безотказной работы по всем обогатительным фабрикам составило 0,999875284.

8. Выполнена количественная оценка качества проектных объёмно-планировочных и конструктивных решений обогатительных фабрик. Результаты анализа рекомендованы проектным организациям, участвующим в разработке конструктивных решений обогатительных фабрик.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в следующем:

1. Предлагаемый подход может быть использован для расчета сроков службы зданий иного функционального назначения, территориального расположения, природно-климатических и инженерно-геологических условий.

2. Результаты исследований могут быть основой для разработки методики определения проектных значений сроков службы зданий и сооружений с учетом параметров напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, соответствующих их реальным или вероятностным техническим состояниям в различные периоды эксплуатации.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Бережнов, К.П. Прогнозирование долговечности конструкций фабрик алмазодобывающей промышленности / К.П. Бережнов, В.С. Суплецов //

Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – № 4. – С. 13-15.

2. Посельский, Ф.Ф. Из опыта строительства и эксплуатации несущих конструкций обогатительной фабрики №3 в городе Мирном / Ф.Ф. Посельский, В.Г. Аржаков, А.В. Рыков, А.Г. Алексеенко, В.С. Суплецов // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – № 4. – С. 22-24.

3. Посельский, Ф.Ф. Оценка технического состояния зданий обогатительных фабрик АК «АЛРОСА» / Ф.Ф. Посельский, А.В. Рыков, А.Г. Алексеенко, В.С. Суплецов // Горный журнал. – 2012. – № 12. – С. 56-61.

4. Корнилов, Т.А. Вероятностная оценка расчетного срока службы строительных конструкций промышленных предприятий / Т.А. Корнилов, В.С. Суплецов // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 8. – С. 13-17.

- в периодических научных изданиях из перечня базы данных Scopus:

5. Посельский Ф.Ф. Расчет несущей способности строительных конструкций обогатительных фабрик АК «АЛРОСА» / Ф.Ф. Посельский, А.Г. Алексеенко, В.С. Суплецов // Горный журнал. – 2016. – № 9. – С. 74-79.

6. Kornilov T.A., Supletsov V.S. Forecast Intensity of Manifestations of Defects and Damage to Steel Structures Operating under Extreme Conditions of the External and Internal Environment. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. Vol.463/2/032058. – 2018.

- прочие:

7. Рыков, А.В. Несовершенство существующих сроков периодичности обследования металлоконструкций промышленных зданий и сооружений / А.В. Рыков, В.С. Суплецов // Материалы региональной научно-практической конференции «Наука – строительному комплексу Севера». – Якутск: ЯГУ, 2006. – С. 202-206.

8. Рыков, А.В. Разработка информационной базы по производственным объектам горнорудной промышленности Республики Саха (Якутия) / А.В. Рыков, В.С. Суплецов // Сборник материалов форума научной молодёжи РС (Я) посвящённый году академика В.П. Ларионова. – Якутск: ЯГУ, 2008. – С. 124-128.

9. Посельский, Ф.Ф. Информационная база по производственным объектам горнорудной промышленности Республики Саха (Якутия) / Ф.Ф. Посельский, А.В. Рыков, В.С. Суплецов // Сборник материалов I Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение». – Якутск: ЯГУ, 2008. – С. 198-202.

10. Корнилов, Т.А. Проблемы определения показателей надежности строительных конструкций зданий и сооружений / Т.А. Корнилов, В.С. Суплецов // Сборник материалов XIX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». – М.: НИУ МГСУ, 2016. – С. 407-410.

