

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА

На правах рукописи



ДОЛЖЕНКО АЛЕКСАНДР ВАЛЕРИЕВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ
ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗОЙ
ПЛОСКИХ РУЛОННЫХ КРОВЕЛЬ**

Специальность 2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Наумов Андрей Евгеньевич

Белгород 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	11
1.1 Строительная-техническая экспертиза на этапах жизненного цикла объекта строительства	11
1.2 Нормативно-правовая база производства строительно-технических экспертиз	19
1.3 Методы производства строительно-технических экспертиз.....	25
1.4 Метрологические обеспечение производства строительно-технических экспертиз	31
1.5 Выводы по главе 1.....	35
2 МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	36
2.1 Методология визуального обследования здания.....	36
2.2 Параметрическое моделирование в проектировании и изысканиях ...	38
2.3 Инструментальная база производства строительно-технической экспертизы с применением беспилотных авиационных систем.....	49
2.4 Нейросетевой анализ изображений.....	61
2.5 Выводы по главе 2.....	67
3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ПЛОСКИХ РУЛОННЫХ КРОВЕЛЬ	68
3.1 Состояние функционального соответствия объекта строительства и его элементов.....	68
3.2 Количественная оценка состояния функционального соответствия плоской рулонной кровли проведением автоматизированной дефектоскопии.....	75
3.3 Совершенствование инструментов экспертного оценивания	79
3.4 Выводы по главе 3.....	86
4 НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ В СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ПЛОСКИХ РУЛОННЫХ КРОВЕЛЬ.....	88

4.1 Технологии нейросетевого анализа в строительной дефектоскопии..	88
4.2 Обучение модели глубокой сверточной нейронной сети.....	98
4.3 Методология классификации дефектов плоских рулонных кровель	104
4.4 Выводы по главе 4.....	113
5 УПРАВЛЕНИИ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТОСКОПИЕЙ ПЛОСКИХ РУЛОННЫХ КРОВЕЛЬ	115
5.1 Практические аспекты реализации технологии производства автоматизированной строительно-технической дефектоскопии плоских рулонных кровель	115
5.2 Параметрическое моделирование результатов автоматизированной строительно-технической дефектоскопии плоских рулонных кровель..	123
5.3 Апробация технологии управления жизненным циклом объекта строительства производством автоматизированной строительно- технической дефектоскопии плоских рулонных кровель	129
5.4 Выводы по главе 5.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	141
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	165
Приложение А. Титульный лист «Стандарт организации на производство автоматизированной строительно-технической дефектоскопии плоских рулонных кровель»	165
Приложение Б. Акты о внедрении результатов научно-исследовательской работы.....	166
Приложение В. Справка о внедрении результатов научно- исследовательской работы в учебный процесс.....	168

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденная Правительством Российской Федерации, активно внедряется в строительную отрасль, преимущественно на этапах инженерных изысканий и архитектурно-строительного проектирования. Технологии информационного моделирования (ТИМ) используются большинством разработчиков проектной и сопровождающей строительство документации, однако на постпостроечных стадиях жизненного цикла (ЖЦ) объекта строительства (ОС) цифровизация все еще недостаточна.

Совершенствование научно-методических основ цифрового управления техническим и функциональным состояниями ОС как важной задачи управления его ЖЦ целесообразно строить на рассмотрении ОС как совокупности конструктивных элементов, обладающих признаками и алгоритмами управления своими состояниями в ТИМ. К числу наиболее распространенных и дефектоёмких конструктивных элементов ОС относятся плоские рулонные кровли (ПРК), оценка состояния которых выполняется в составе строительно-технических экспертиз (СТЭ) ОС, включающих важный этап получения количественных сведений о положении и развитии дефектов элемента – строительно-техническую дефектоскопию (СТД). Производство СТД ПРК должно отвечать требованиям к составу и структуре периодически обновляемых данных для информационных моделей (ИМ), однако на практике осуществляется вручную, ситуативно, с большими недостатками в актуальности, объективности интерпретации и детальности собранной информации, не соответствуя целям и задачам цифровизации управления ЖЦ ОС. В этой связи разработка и внедрение технологии автоматизированной СТД (АСТД), позволяющей осуществлять СТД ПРК с произвольной периодичностью, на требуемом уровне детализации дефектов, с цифровой диагностикой и документированием результатов, анализом текущего и прогнозного состояний, полагаемые в основу принятия эффективных управленческих решений на ЖЦ без существенного увеличения стоимости владения ОС, является актуальной научной задачей.

Работа выполнялась при финансовой поддержке в рамках реализации: государственного задания Минобрнауки РФ №FZWN 2024-0011; государственного задания Минобрнауки РФ №FZWN 2025-0003; проекта программы развития «Приоритет-2030» №СП2-2/2-2024.

Степень разработанности темы исследования. Теоретическими основами исследования стали труды отечественных и зарубежных ученых в области организации эксплуатации и обследования технического состояния объектов недвижимости, СТЭ, ИМ ОС, нейросетевого анализа, организации устройства и обследования ПРК.

Экспертиза технического состояния элементов зданий является ключевой задачей обеспечения надлежащего функционирования ОС. Граничное состояние ОС, соответствующее критическим изменениям в образующей контур его конструктивной безопасности и функциональной надежности элементной структуре, выявляется и диагностируется по ряду внешних признаков (дефектов), количественная оценка и качественная интерпретация которых определяет состав и порядок производства РВМ для безопасной эксплуатации ОС. Производимая при этом СТД осложняется большим количеством полевых и камеральных исследований, проводимых в стесненных объектом и ограниченных возможностях субъекта условиях, негативно сказывающихся на качестве результата. Недостатки в архивировании, документировании и динамическом анализе установленных дефектов делают процесс СТД дорогостоящим и малоэффективным для принятия рациональных управленческих решений на этапах ЖЦ ОС. Перспективным решением задачи снижения ресурсоемкости и повышения качества СТД является внедрение в практику экспертной деятельности автоматизированных аппаратно-программных комплексов ее полевого производства, инструментов нейросетевого распознавания дефектов, ТИМ и технического прогнозирования.

Теоретическими основами исследования стали труды ученых в области организации эксплуатации и обследования ОС Асаула А.Н., Бадьина Г.М., Бирюкова А.Н., Бойко А.Ю., Болотина С.А., Горбаневой Е.П., Грабового П.Г., Ибрагимова А.М., Лapidуса А.А., Мищенко В.Я., Опариной Л.А., Панибратова Ю.П.,

Римшина В.И., Ройтмана А.Г., Смирнова Е.Б., Шеиной С.Г., Шишкина А.И., Шрейбера К.А., Умняковой Н.П. и др., в области методологии СТЭ Белкина Р.С., Бутырина А.Ю., Винберга А.И., Кулакова К.Ю., Топчия Д.В., Улыбина А.В., Шляхова А.Р., в области ТИМ ОС Барабановой Т.А., Гири Л.В., Железнова М.М., Зеленцова Л.Б., Зильберовой И.Ю., Зиновьева А.Ю., Маилян Л.Д. и др., в области нейросетевого анализа Гаряева А.Н., Крюкова К.М., Юдина Д.А. и др., в области организации устройства и обследования плоских рулонных кровель Король Е.А., Мазура В.А., Садковского М.В., Югова А.М. и др.

Цель работы. Разработка научно обоснованной технологии производства автоматизированной СТД ПРК, повышающей эффективность производства СТЭ элементов зданий при управлении ЖЦ ОС.

Для достижения указанной цели решались **следующие задачи:**

- классификация дефектов ПРК и их параметрическое представление в ИМ ОС;
- предложение и содержательное наполнение термина «состояние функционального соответствия» (СФС), объединяющего оценку технического состояния элемента ОС, функционального и физического износа;
- разработка технологии производства АСТД ПРК с использованием беспилотных авиационных систем (БАС) и цифровых инструментов диагностики дефектов;
- разработка модели развития дефектов и оценки СФС ПРК;
- разработка технологии управления ЖЦ ОС по критерию минимизации ресурсоемкости ремонтно-восстановительных мероприятий (РВМ) при осуществлении технической эксплуатации ПРК;
- разработка стандарта организации на производство АСТД ПРК для реализации результатов исследования; промышленная апробация.

Научная новизна работы. Выполнена классификация дефектов ПРК, предложен термин и апробирован алгоритм оценки СФС ПРК, дополняющий используемые понятия физического износа и технического состояния при выборе рационального состава РВМ.

Предложен и апробирован научно-методический подход к совершенствованию ИМ ОС здания иерархическим классом дефектов ПРК, расширяющим инструментарий цифрового управления ЖЦ ОС.

Осуществлена программная реализация методики обучения глубокой сверточной нейронной сети, предложено аппаратно-программное обеспечение БАС, сформирована технология производства АСТД ПРК, снижающая ресурсоемкость и сроки производства СТЭ до 5 раз.

Предложена, научно-методически обеспечена и экспериментально обоснована технология управления эксплуатацией ПРК, интегрирующая автоматизированную диагностику и параметрическое моделирование дефектов, снижающая ресурсоемкость поддержания СФС ПРК на этапах ЖЦ ОС на 20%.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические положения о цифровом представлении дефектов ПРК как иерархического класса ИМ ОС, расширяющем эксплуатационные и аналитические возможности на этапах ЖЦ ОС.

Представлена технология получения, документирования и использования в ИМ ОС цифрового результата АСТД, обеспечивающая количественную оценку эффективности принимаемых управленческих решений в технической эксплуатации ПРК по критерию минимизации лимитированных затрат на РВМ.

Разработан и предложен усовершенствованный состав аппаратно-программного обеспечения АСТД, позволяющий выполнять произвольно-периодическое обследование, количественную оценку, документирование и прогнозирование развития дефектов ПРК в режиме реального времени.

Методология и методы исследования. Методологической основой работы являлись нормативные регламенты по осуществлению СТД и оценке физического износа (ГОСТ 31937-2024, ВСН 53-86(р) в части обследования, оценки технического состояния и физического износа ПРК. Идея базируется на гипотезе о наличии математической связи технического и функционального состояний

элемента ОС с количественными показателями развития дефектов и возможности на этой основе прогнозировать и оптимизировать ресурсозатраты на поддержание нормативного состояния ОС.

Методической базой для планирования и осуществления инструментальных исследований являются: строительные правила по эксплуатации зданий и сооружений (СП 255.1325800.2016); стандарт организации по эксплуатации и техническому обслуживанию крыш с кровлями из рулонных и мастичных материалов (СТО НКС 4.1-2022); указания по технической эксплуатации крыш зданий с рулонными, мастичными и стальными кровлями, технологии их ремонта и нанесения защитно-отделочных составов, используемые инженерно-техническими работниками жилищных и ремонтно-строительных организаций; локальные документы производителей кровельных материалов, устанавливающие характерные дефекты плоских рулонных кровель и способы их устранения.

Методической основой анализа изображений в дефектоскопии ПРК являются методики обучения глубоких свёрточных нейронных сетей на представительной выборке цифровых результатов изысканий (датасете).

Положения, выносимые на защиту:

- классификатор дефектов ПРК, комплементарный классификатору строительной информации, и технология параметрического моделирования дефектов ПРК как иерархического класса ИМ ОС;
- трактовка и содержание понятия СФС элемента здания как интегральной оценки обеспеченности способности функционировать, обладать ремонтпригодностью и долговечностью в пределах параметров, установленных проектом и практикой эксплуатации;
- технология АСТД ПРК, базирующаяся на получении и анализе цифровых результатов;
- технология оценки и прогнозирования динамики развития дефектов, цифровой оценки СФС ПРК, полагаемой в основу эффективного управления ЖЦ ОС по критерию минимизация ресурсоемкости технической эксплуатации элемента.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается использованием открытых экспериментальных методов оценки дефектов ПРК, верифицированного ПО нейросетевого анализа, сертифицированного аппаратного обеспечения получения и документирования анализируемого информационного потока, математических методов обеспечения надежности и достоверности результатов АСТД. Результаты подкреплены теоретическими и экспериментальными исследованиями, апробационными испытаниями, не противоречащими признанным в отрасли нормативным положениям, научным фактам, результатам работ ведущих ученых в области исследования.

Апробация результатов исследований. Основные положения диссертационной работы были представлены на: 4-ой международной научной конференции «Интеллектуальные информационные технологии для промышленности» (ПТИ, Прага, Чехия, 2019); Международной научно-технической конференции «Нейроинформатика-2020» в составе I Национального Конгресса по когнитивным исследованиям, искусственному интеллекту и нейроинформатике (Москва, 2020); Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных «Лидеры 3D-TECH» (Тула, 2023); VIII Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Тамбов, 2023), LXXVIII Международной научно-практической конференции «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика», (Санкт-Петербург, 2024).

Внедрение результатов исследований. Апробация технологии АСТД ПРК осуществлена на 11 эксплуатируемых объектах капитального строительства кампуса БГТУ им. В.Г. Шухова, 7 эксплуатируемых муниципальных объектах капитального строительства г. Белгорода и Белгородской области, 11 объектах капитального строительства г. Самары. Для практического внедрения результатов работы разработан стандарт организации по проведению АСТД ПРК.

Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и апробационного внедрения используются в учебном процессе при подготовке бакалавров направления 08.03.01 «Строительство» профилей «Экспертиза и управление недвижимостью», «Информационно-строительный инжиниринг»;

магистров направления 08.04.01 «Строительство» программ «Организация информационного моделирования в строительстве», «Судебная строительно-техническая и стоимостная экспертиза».

Публикации. Основные положения работы изложены в 12 публикациях, в том числе 6 – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад. Автором проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение эффективности применения инструментов АСТД, прогнозирования развития дефектов ПРК и технического советования при управлении ЖЦ ОС. Выполнен комплекс экспериментальных исследований с последующей обработкой и анализом полученных результатов. Принято участие в апробации результатов работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 168 страницах машинописного текста, включающего 18 таблиц, 57 рисунков, список литературы из 171 источника, 3 приложения.

Область исследований соответствует паспорту научной специальности 2.1.14 «Управление жизненным циклом объектов строительства», п. 5. Исследование и разработка методов и алгоритмов использования и управления данными информационных моделей объектов капитального строительства на всех этапах их жизненного цикла, включая: сбор, хранение, обработку, интеграцию и передачу данных, их мониторинг, актуализацию и анализ, валидацию и верификацию. Исследование и разработка моделей информационных процессов и структур, алгоритмов визуализации, трансформации и анализа информации, синтеза виртуальной и дополненной реальности, а также п. 7. Разработка методов и средств организации и управления жизненным циклом объектов капитального строительства в условиях ограничения доступности ресурсов, а также технических, экономических, экологических, социальных и других видов рисков. Ме-

тоды и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности строительных систем, поддержка принятия организационно-технических решений на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Строительная-техническая экспертиза на этапах жизненного цикла объекта строительства

Под понятием ЖЦ ОС в нормативной литературе [134] понимается период времени, в течение которого осуществляются:

- предпроектные работы, формирующие концепцию будущего ОС, и дающие технико-экономическое обоснование строительства;
- инженерные изыскания, дающие информацию о природных и техногенных условиях участка, на котором планируется строительство ОС;
- проектные работы;
- изготовление элементов ОС и их доставка на строительную площадку;
- строительные работы, включая консервацию в случае перерыва в строительстве;
- эксплуатация ОС – наиболее продолжительный по времени этап его ЖЦ, включающий все виды ремонтов (текущие, капитальные, аварийные и пр.). На этапе эксплуатации происходит процесс функционирования ОС;
- реконструкция или модернизация ОС;
- снос (демонтаж) ОС.

Другими словами, ЖЦ ОС – это совокупность взаимосвязанных процессов, которые имеют свою специфику и целевую направленность, общепринятый состав и структуру (Рисунок 1). Этапность ЖЦ ОС устанавливается несколькими нормативными документами [70, 134, 148], вместе с паспортом специальности 2.1.14 формирующими представление об актуальной структуре ЖЦ ОС (Таблица 1). Автором рассматривается несколько этапов ЖЦ ОС с учетом использования СТЭ в качестве инструмента эффективного управления продолжительностью его

функционирования: инженерные изыскания, эксплуатация (включая текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт.

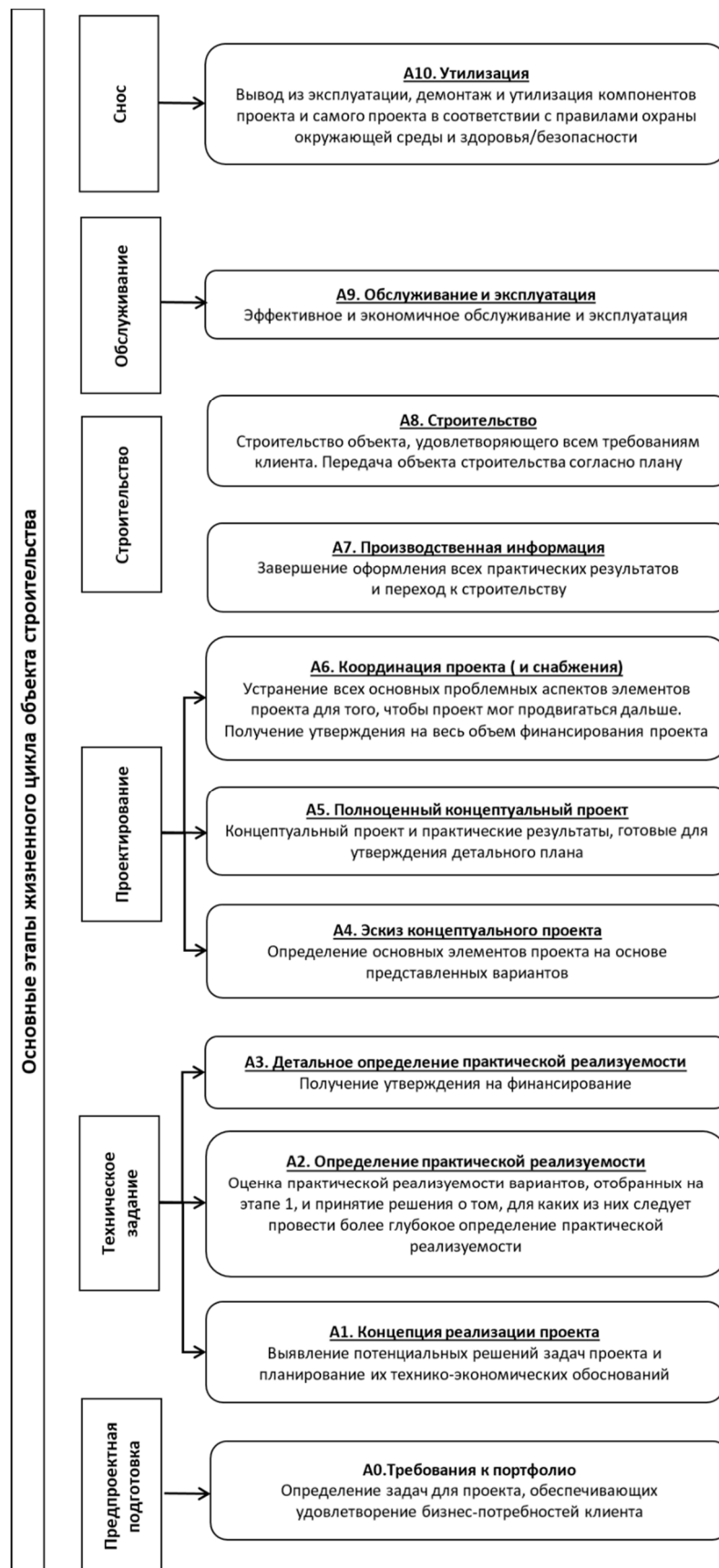


Рисунок 1 – Основные этапы ЖЦ ОС

Таблица 1 – Нормативная структура ЖЦ ОС

Документ	Этапы ЖЦ ОС, установленные нормативно												
	Предпроектный этап				Проектирование	Строитель-ство	Эксплуатация				Реверсивный этап		
Паспорт научной специальности 2.1.14 – Управление жизненным циклом объектов строительства		Обосно-вание ин-вестиций	Инженерные изыскания		Архитектурно-строительное и организационно-технологическое проектирование	Строительство (в т.ч. консерва-ция)	Эксплуатация (включая текущие ремонты)	Реконструкция	Модер-низация	Капитальный ремонт	Реставра-ция	Вывод из эксплуа-тации	Снос и утилиза-ция
Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. №384-ФЗ. Технический регламент о безопасности зданий и со-оружений					Проектирование	Строительство (в т.ч. консерва-ция)							
СП 333.1325800.2020. Ин-формационное моделиро-вание в строительстве. Правила формирования ин-формационной модели объектов на различных ста-диях жизненного цикла					Архитектурно-строительное проектирование (включая про-хождение экспер-тизы)	Строительство (включая ввод в эксплуата-цию)							
ГОСТ Р 10.0.03-2019/ИСО 29481-1:2016. Информа-ционное моделирование в строительстве. Справочник по обмену информацией. Часть1. Методология и формат	Пред-проект-ная подго-товка			Техни-ческое задание	Проектирование	Строительство	Обслуживание						

– этапы ЖЦ ОС, в реализации которых применимы результаты диссертационного исследования

Наиболее продолжительным этапом ЖЦ ОС является этап эксплуатации, в течении которого можно выделить три подэтапа: приработка, нормальная эксплуатация, включающая капитальные ремонты и реконструкции, и окончание срока службы. На этапе эксплуатации ЖЦ ОС происходит снижение его прочностных, механических и технологических характеристик, что приводит к изменению технического состояния ОС, характеризующегося соответствием ОС действующим нормативным документам. Практика проведения СТЭ и периодического мониторинга показывает, что интенсивность физического износа ОС существенно увеличивается к третьему периоду [58]. Статистически установлено, что физический износ элементов ОС наиболее интенсивно происходит на этапе до 30 и после 100 лет их эксплуатации [158].

Изменение технического состояния выражается ухудшением работоспособности отдельных конструктивных элементов ОС под воздействием внутренних и внешних факторов. К внутренним факторам относятся качество строительных материалов, изменение свойств материалов во времени, нагрузки и воздействия, возникающие в процессе эксплуатации ОС. К внешним факторам относятся условия эксплуатации и атмосферные воздействия. Совокупным воздействием этих факторов обусловлено различие сроков службы различных элементов ОС [58].

Детектирование изменения технического состояния объекта строительства осуществляется путем проведения СТЭ или обследования. Проведение СТЭ в Российской Федерации регламентируется ГОСТ 31937-2024 [70], устанавливающим нормативные требования к экспертным работам, их информационному содержанию, периодичности проведения экспертиз. Обследование технического состояния здания (сооружения) – это специальный вид инженерных изысканий, в который входит комплекс мероприятий по определению и оценке фактических значений контролируемых параметров, характеризующих работоспособность ОС и определяющих возможность его дальнейшей эксплуатации, реконструкции или необходимость восстановления, усиления, ремонта, демонтажа (сноса) и

включающий в себя обследование элементов ОС на предмет повреждений и дефектов, определения фактической несущей способности [70]. Иными словами, обследование ОС – это комплекс мероприятий по определению его технического состояния, а также технического состояния составляющих его элементов, результатом которого является отчет или заключение о техническом состоянии.

Нормами [70] рекомендуется следующая периодичность проведения СТЭ ОС, а также отдельных составляющих их элементов:

- первое обследование технического состояния – не позже, чем через два года после их ввода в эксплуатацию;
- последующие для ОС, эксплуатирующихся в неблагоприятных условиях (агрессивные среды, вибрации, повышенная влажность, сейсмичность района 7 баллов и более и др.) – не реже одного раза в 10 лет;
- последующие для ОС, эксплуатирующихся в нормальных условиях – не реже одного раза в 10 лет;

К иным факторам, влияющим на периодичность проведения СТЭ, следует отнести:

А) на этапе строительства:

- долгий перерыв в строительстве (необходимость экспертизы ранее возведенных элементов ОС);
- появление дефектов, повреждений и деформаций, свидетельствующих о наличии ошибок, допущенных в процессе проектирования и строительства;

Б) на этапе эксплуатации:

- инициатива собственника ОС;
- смена собственника по инициативе покупателя;
- истечение расчетных сроков службы элементов или ОС в целом;
- истечении расчетных сроков безаварийной эксплуатации элементов или ОС в целом, установленных в предыдущем заключении по результатам СТЭ;
- необходимость проведения реконструкции или капитального ремонта ОС, изменения его функционального назначения;

- обнаружение дефектов, повреждений и деформаций ОС, свидетельствующих о нарушениях, допущенных в процессе эксплуатации и способных повлиять на безопасность объекта:

- попадание обследуемого ОС в зону влияния нового строительства, реконструкции или природно-техногенного воздействия;

В) на этапе демонтажа:

- принятие решения о целесообразности дальнейшей эксплуатации ОС либо его сносе;

- разработка проекта демонтажа ОС.

Вышеуказанная периодичность подразумевает нормальную эксплуатацию ОС и отсутствие аварийных ситуаций. В случае, когда в процессе эксплуатации здания в его конструктивных элементах выявлены признаки, свидетельствующие об их отклонении от нормальных условий эксплуатации, стандарт [70] рекомендует проведение внеочередного обследования технического состояния. Также допускается увеличение нормативных сроков проведения СТЭ в случае соблюдения правил технической эксплуатации ОС, указанных в положении об эксплуатации или иной технической документации, при отсутствии видимых дефектов и повреждений, а также в случае наличия особых требований иных национальных сводов правил в области эксплуатации ОС. Своевременность выявления дефектов и повреждений и их устранения существенно влияют на продолжительность эксплуатации (срок службы) ОС.

Согласно [68] расчетный срок службы ОС это установленный в строительных нормах или в задании на проектирование период его использования по назначению до капитального ремонта и (или) реконструкции с предусмотренным техническим обслуживанием, отсчитываемый от начала эксплуатации объекта или после возобновления его эксплуатации в результате капитального ремонта, реконструкции или завершения строительством. Под нормативным сроком службы ОС понимают средний безотказный срок службы его основных элементов.

Задачей СТЭ является поддержание ОС в исправном и пригодном для использования техническом состоянии, своевременное устранение выявленного физического и морального износа и сохранение заданных эксплуатационных качеств [144]. Согласно [70] под физическим износом ОС подразумевается ухудшение его технических и связанных с ними эксплуатационных показателей, вызванное объективными причинами. Физический износ ОС может быть вызван как внешними воздействиями (климатические условия, природные катаклизмы), так и происходящими внутри (внутренними) технологическими процессами (естественное старение материалов, характер эксплуатации и т.д.). Причем, на величину физического износа существенное влияние оказывают своевременность, периодичность, качество, объем и характер периодических и капитальных ремонтов, а также уровень эксплуатационного содержания ОС [137].

Физический износ ОС оценивается согласно [53] и измеряется как в относительных величинах (%), так и в стоимостном выражении. Для определения величины физического износа устанавливается фактическое техническое состояние отдельных элементов ОС (строительных конструкций, функциональных систем, технологически и конструктивно обособленных частей) а также их точный срок службы. Эти данные представлены в [53] в виде таблиц, содержащих признаки физического износа, процент физического износа отдельных элементов ОС и соответствующий каждому элементу удельный вес. Таким образом, физический износ ОС оценивается путем сопоставления признаков физического износа, которые были выявлены в результате обследования, с их значениями, приведенными в таблицах, данные в которых не являются абсолютно точными и применимыми ко всем элементам, так как в реальности снижение первоначальных эксплуатационных характеристик элемента зависит от большого количества различных факторов, и является уникальной для каждого конкретного ОС.

Под моральным износом ОС подразумевается постепенное (во времени) отклонение основных его эксплуатационных показателей от современного уровня технических требований эксплуатации зданий и сооружений [74]. Таким

образом, физический и моральный износ приводят к снижению эксплуатационных качеств ОС, трактуемого в различных источниках по-разному. Например, государственный стандарт [71] определяет эксплуатационные показатели ОС как совокупность технических, санитарно-гигиенических, экономических и эстетических характеристик, обуславливающих качество функционирования ОС; свод правил [145] – как совокупность технических, объемно-планировочных, санитарно-гигиенических, теплотехнических, экономических и эстетических характеристик, обеспечивающих эксплуатационную пригодность ОС; Стражников А.М. [156] в качестве основных эксплуатационных показателей выделяет безотказность, долговечность и ремонтпригодность ОС и их составных частей.

Оценка технического состояния ОС строится на определении физического и морального износа объекта в целом, складывающегося из частных оценок износа отдельных конструктивных и функциональных элементов. Интегрирование частных оценок в общую оценку технического состояния ОС осуществляется удельными весами элементов в общем объеме ОС по стоимости строительства, амортизированной кадастровой стоимости или по показателям сравнительной значимости элементов, приведенных в отдельных нормативных рекомендациях. Таким образом, детализированная, периодическая и результативная СТЭ элементов ОС, выстраиваемая по общим универсальным алгоритмам производства и инструментального обеспечения, позволяет получать достоверную и проверяемую информацию о текущем состоянии ОС, поддерживать его на установленном уровне, продлевая продолжительность и качество безотказной эксплуатации. Результаты СТЭ элементов ОС, формирующие результаты оценки технического состояния всего объекта становятся основой для создания эффективных цифровых инструментов управления жизненным циклом ОС по показателям рационализации мероприятий технической эксплуатации минимальной ресурсоемкости при заданном поддерживаемом уровне технического состояния и функциональности ОС.

1.2 Нормативно-правовая база производства строительно-технических экспертиз

Нормативно-правовая база производства СТЭ ОС на протяжении всего ЖЦ – от проектирования до вывода из эксплуатации – регламентируется Федеральным законом №384–ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30 декабря 2009 г. [134], принятым в целях:

- 1) защиты жизни и здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества;
- 2) охраны окружающей среды, жизни и здоровья животных и растений;
- 3) предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей;
- 4) обеспечения энергетической эффективности зданий и сооружений.

В дополнение к [134] был разработан и введен государственный стандарт [70], являющийся первостепенной нормативной основой для оценки и повышения степени механической безопасности ОС и регламентирующий требования к перечню обязательных к выполнению при производстве СТЭ работ, их составу и объему. Кроме того, строительным экспертом могут быть использованы ВСН 57-88(р) «Положение по техническому обследованию жилых зданий» [52], СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» [145] и большое количество научно-технической документации, содержащей требования к строительным конструкциям, наружным и внутренним инженерным системам и пр.

Регламентам, регулирующим порядок производства и документирование результатов СТЭ [70, 122, 123, 145], присущи как общие недостатки нормативных документов в экспертно-правовом поле (устаревание и утрата актуальности в части требований к безопасности ОС и путей их обеспечения, смысловые и содержательные коллизии в части технического и метрологического оснащения, прав и обязанностей участников экспертной деятельности, недостатки общего целеполагания и отсутствие требований к сквозному отраслевому характеру результатов СТЭ), так и специфические для отрасли несовершенства технологиче-

ского характера (диспаритет технических требований к результату и современной оснащённости эксперта, связанность эксперта представленными в нормах методами и технологиями в ущерб современным цифровым, недостаток практических указаний к вариативности диагностического и аналитического матаппарата, интерпретационные сложности в работе экспертного оборудования при наличии современного опыта его отказов и недостоверности и т.п.). В современной экспертной практике проблема нормативной обоснованности исследований при производстве СТЭ стоит наиболее остро, в связи с чем вопросы совершенствования системы нормативно-технической и правовой документации, развития методического аппарата, обобщения практического опыта произведённых исследований, а также организации СТЭ весьма актуальны.

В своей работе строительный эксперт опирается не только на вышеперечисленные нормативные документы, но и на ряд других, призванных повысить уровень обоснованности результатов СТЭ, в тех случаях, когда нормы [70, 134] не содержат информации либо методик поведения эксперта для обоснования принятого решения. К таким нормативным документам относятся государственные стандарты [66-73], своды правил и строительные нормы и правила [145-154], технические регламенты [51-53, 126] и иная литература, содержащая обобщённый опыт в прикладной исследовательской деятельности [121-123, 127-136].

Нормативно-техническая документация находится в непрерывном развитии и актуализации. Например, [70] на текущий момент времени имеет вторую редакцию, датированную 2024 годом, взамен редакции 2011 года, а пособие по обследованию строительных конструкций зданий имеет редакции 1997 [122] и 2004 [123] гг. Это, в первую очередь, обусловлено развитием строительной индустрии, разработкой новых технологий и оборудования для производства СТЭ.

Вносимые изменения в нормативную документацию имеют как положительный, так и отрицательный эффект [91]. К положительному эффекту следует отнести закреплённую официально научно-обоснованную достоверность нормативной документации, чего не хватает научной или справочной литературе. Этот факт позволяет эксперту не сомневаться в правомерности своих действий или

выводов, так как он имеет возможность сослаться на пункт нормативного документа, интерпретируя изложенную в нем информацию в целях своего заключения. Однако же, у эксперта остается необходимость правильного выбора нормативного документа – свода правил (СП) или государственного стандарта (ГОСТ). К отрицательному эффекту внесения изменений в нормативную документацию следует отнести необходимость мониторинга внесения изменений. Зачастую эксперт не успевает реагировать на внесённые в нормативный документ изменения или же сталкивается с противоречиями в нормативных документах, одновременно устанавливающих различающиеся требования к общим процедурам и элементам СТЭ.

Наличие разногласий в нескольких нормативных документах, регламентирующих экспертную деятельность или же отсутствие рекомендаций по возникшему вопросу приводит к необходимости применения дополнительных обоснований со стороны эксперта. К примерам, характеризующим такую ситуацию, следует отнести различную градацию категорий технического состояния в государственном стандарте [70] и своде правил [145]. Так государственный стандарт [70] устанавливает четыре категории технического состояния строительных конструкций (нормативную, работоспособную, ограниченно-работоспособную и аварийную), свод правил [145] – шесть (нормативную, исправную, работоспособную, ограниченно-работоспособную, недопустимую, аварийную). Вышеописанное разногласие не является единичным, что требует от эксперта как знания системы нормативных документов, так и навыков проблемного научного поиска.

СТЭ ОС, согласно [70] проводится в несколько этапов:

- подготовительный этап, включающий ознакомление с ОС, имеющейся проектной и исполнительной документацией, материалами инженерных изысканий, журналами мониторинга, предыдущими заключениями по результатам СТЭ. Результатом этого этапа является программа работ, в отдельных случаях, согласованная с заказчиком;

– предварительное визуальное обследование, позволяющее получить уточненную конструктивную схему здания, схемы расположения дефектов, дефектные ведомости, фотографии дефектов и их описание, предварительную оценку технического состояния ОС. Результатом работ является заключение по результатам визуального обследования;

– детальное инструментальное обследование, проводимое при установленном визуальным обследованием недопустимом техническом состоянии ОС. Оно включает в себя инструментальные измерения геометрических параметров дефектов и повреждений, определение физико-механических характеристик материалов, вскрытие узлов и элементов, определение фактических нагрузок и пр. Результатом работ является заключение по результатам инструментального обследования.

При этом СТЭ может включать обследование не только элементов ОС, но и систем инженерного обеспечения. Такой вид СТЭ носит название комплексного обследования. Организационную схему проведения СТЭ можно представить в упрощенном виде (Рисунок 2) [143].

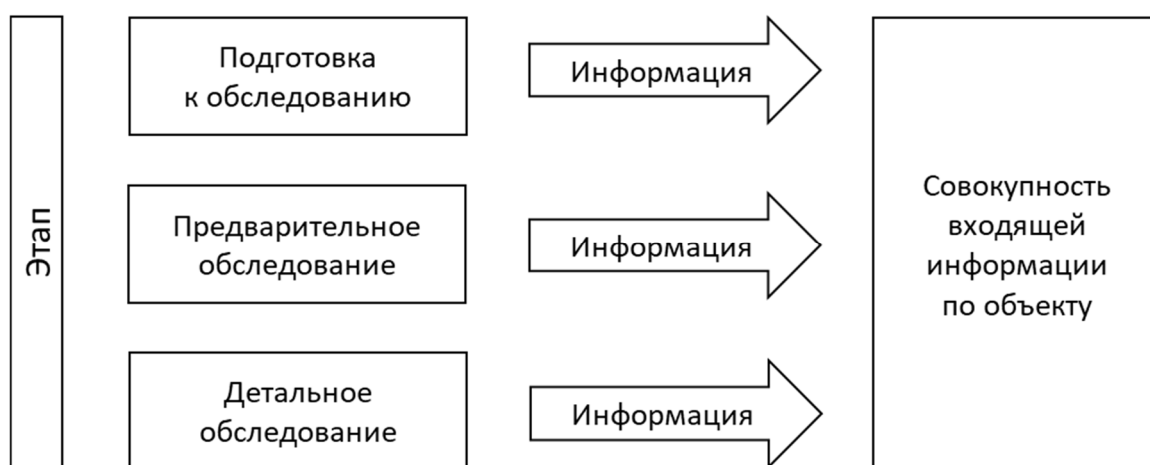


Рисунок 2 – Общепринятая схема организации проведения СТЭ

Как видно из представленной схемы СТЭ позволяет собрать большой объем информации, способы получения которой и их интерпретация могут существенно отличаться друг от друга даже в рамках одного ОС. Это связано, в первую очередь, с тем, что проведение СТЭ часто сопряжено с рядом объективных трудностей ее осуществления:

- недоступностью обследуемого объекта для прямого наблюдения или сложными погодными условиями производства экспертизы;
- необходимостью проведения большого или частого количества наблюдений;
- высокой стоимостью или риском доставки наблюдателя непосредственно к объекту наблюдений или измерений;
- большой трудоемкостью систематизации и анализа многочисленных наблюдений, связанным с этим высоким уровнем негативного влияния человеческого фактора на достоверность результатов;

Вследствие временного, индивидуального и часто нерационального преодоления трудностей производства СТЭ проводится вручную, занимает неоправданно большое время, крайне сезонна, непериодична, несистемна, в связи с чем в большинстве случаев экономически нецелесообразна, часто проводится на формальном профессиональном уровне без определенных целей и увязки с технологией эксплуатации ОС [43].

Одновременно с существенными организационно-технологическими трудностями производства большая часть ОС (объектов СТЭ) обладает рядом общих признаков, позволяющих формализовать процесс наблюдений, измерений и анализа параметров состояния объекта:

- типовые элементы ОС простой формы и известных размеров, что позволяет с высокой точностью прогнозировать места концентрации дефектов;
- плоские поверхности (стенные панели, плоские кровли, фасады), позволяющие осуществлять наблюдения из конечного числа пространственных точек или перемещая наблюдателя по заранее заданным траекториям;
- конечное число наиболее распространенных и значимых дефектов, что позволяет систематизировать наблюдения и концентрировать последующую аналитическую работу по нескольким направлениям восстановления работоспособности и безопасности ОС;

- характерные внешние признаки границ, характера и глубины распространения дефектов, типовые компенсационные воздействия, позволяющие формализовать процесс определения объемов дефектов, трудоемкости и стоимости РВМ.

ПРК являются примером элемента ОС, в отношении которого на практике СТЭ проводится в большой степени неавтоматизированно, нерегулярно, выборочно, с существенным недостатком качества результата, его низкой достоверности и высокой субъективности экспертных трактовок. Это не позволяет раскрыть существующий экономический и организационный потенциал мероприятий по мониторингу и диагностике дефектов ПРК с целью профилактики и предупреждения нефункциональности элемента, связанного с этим, критического снижения потребительских качеств ОС, нецелесообразно высокой ресурсоемкости их сохранения и восстановления.

Проведение СТЭ ПРК может быть существенно упрощено, удешевлено и качественно усовершенствовано цифровизацией и автоматизацией, включающей:

- привлечение к наблюдениям аэрофотосъемочного оборудования на базе беспилотных авиационных систем (БАС) производящего автоматизированную съемку и пространственную привязку мест накопления дефектов;
- формализацию состава и процедур СТЭ, сопряженных с типовыми и наиболее распространенными элементами и дефектами ОС;
- разработкой ПО, автоматизирующего распознавание дефектов, анализ, определение объема и стоимости РВМ на основании шаблонных методик [62].

Производство цифровой СТЭ эксперт осуществляет в тесном взаимодействии с технологиями информационного моделирования (ТИМ) путем создания цифровых моделей ОС, содержащих результаты СТЭ на всех этапах ЖЦ. Наличие такой информации позволит своевременно принимать эффективные инженерные и управленческие решения [56], а также прогнозировать развитие дефектов во времени [114]. Простота получения неограниченного объема результатов СТЭ позволит хранить, обрабатывать, передавать информацию на этапах ЖЦ

ОС, своевременно ее актуализируя, что позволит осуществить переход на качественно новый технологический уровень организации взаимодействия участников инвестиционно-строительной деятельности [91], при котором информатизация станет ключевым фактором, обеспечивающим повышение эффективности проектных, строительных и изыскательских работ [90].

Таким образом, внедрение цифровой автоматизированной системы СТЭ позволит:

- полностью автоматизировать производство исследовательских и аналитических работ в строительно-технической дефектоскопии, осуществлять автоматизированное документирование, архивацию, анализ результатов строительно-технической дефектоскопии и предложение на этой основе рациональных управленческих решений по эксплуатации ОС.

- снизить сроки и стоимость, ресурсоёмкость, повысить качество и результативность деятельности предприятий жилищно-коммунального хозяйства, занимающихся технической эксплуатацией ОС.

- существенно снизить бюджетную нагрузку на поддержание и восстановление эксплуатационной пригодности ОС [40].

Для дальнейшего обоснования перспективности и целесообразности исследований в выбранной предметной области необходимо проведение исследований существующих практик проведения СТЭ и нормативных основ её осуществления.

1.3 Методы производства строительно-технических экспертиз

Современный эксперт в своей практике может использовать большое количество методов, позволяющих выполнить сбор информации о текущем состоянии элементов ОС: всеобщих (диалектика, логика); общенаучных (наблюдение, измерение, описание, планирование, эксперимент, моделирование и др.); специальных (использование знаний из других отраслей науки). При использовании всеобщих методов эксперт пользуется своими ранее полученными знаниями для

выявления нарушений, а также способность анализировать полученную информацию для построения выводов. К таким методам относится, в первую очередь, метод визуального обследования, наиболее часто используемый экспертами. Этот метод основывается на быстром получении информации об объекте путем осмотра элементов ОС невооруженным взглядом и применения простейших инструментов для получения информации об их геометрических параметрах. При использовании этого метода эксперт наравне с простейшими инструментами использует косвенные способы получения информации (царапание, простукивание и др.), не всегда имеющие нормативную подоснову. Выводы строятся путем анализа полученной информации, который предполагает разложение выявленных признаков повреждения на составляющие более простые элементы. Так, высокий физический износ поверхности ПРК можно разложить на отдельные, характеризующие его признаки (вздутия, впадины, разрывы и пр.) и, проанализировав каждый выявленный дефект по отдельности, выявить причину повреждения.

В случае выявления существенных повреждений ОС экспертами используется более информативный инструментальный метод обследования, относящийся к общенаучным методам и предусматривающий использование наравне с простейшими приборами и инструментами, более сложных, позволяющих проводить измерения следующими методами (Рисунок 3):

- физическими (магнитные, электромагнитные, электрические, тепловые, акустические (ультразвуковые), радиационные и пр.). Физические методы обладают относительной малой надежностью;
- механическими (проведение измерений косвенными методами, преимущественного неразрушающего контроля). Механические методы дают ограниченную точность результатов, но позволяют провести большое количество измерений в полевых условиях;
- геодезическими (выявление пространственного положения объектов, общих деформаций, отклонений от проектного положения). К приборной базе метода, кроме известных нивелиров, теодолитов и тахеометров, относятся современные наземные лазерные 3D сканеры и лидары воздушного базирования);

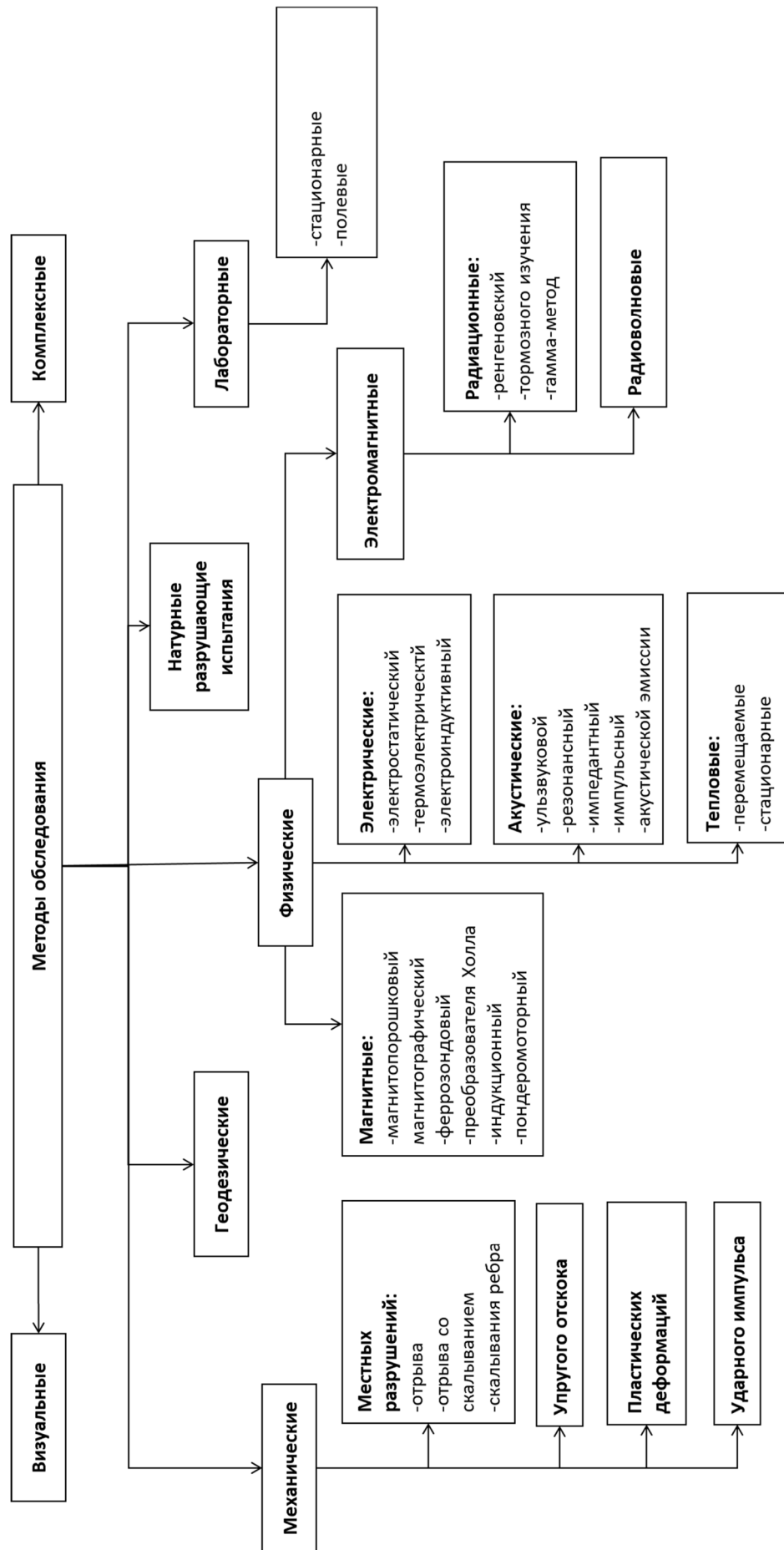


Рисунок 3 – Методы СТЭ, применяемые в современной экспертной практике

- комплексными (комбинация всех перечисленных методов и способов);
- экспериментальными (лабораторные и натурные испытания). Эти методы основаны на проведении натурных испытаний в лабораторных и полевых условиях. В первом случае проводится испытание отобранных образцов в лабораторных условиях, во втором – испытание без изъятия из ОС.

Несмотря на широкую распространенность инструментальных методов исследования необходимо учитывать, что многие строительные материалы, особенно в длительно эксплуатирующихся в условиях агрессивной окружающей среды ОС, характеризуются значительной неоднородностью свойств. В случаях, когда выявленные дефекты незначительны, но их развитие может привести к существенному повреждению ОС, проводят мониторинг технического состояния. Мониторинг опирается на наблюдения, в основе которых лежит способность человека воспринимать информацию об исследуемых предметах с помощью органов чувств [117]. Результат такого восприятия зависит от:

- характеристик наблюдаемого объекта;
- эффективности восприятия органов чувств эксперта;
- уровня профессиональной подготовки эксперта;
- характеристик и состояния применяемых для наблюдения инструментов и приборов.

Таким образом, метод наблюдения является «...своего рода сплавом, содержащим информацию о свойствах объекта, средствах и условиях наблюдения...» [125].

Визуальный осмотр ОС является первоочередной частью экспертного исследования, а результаты, полученные в процессе визуального осмотра, служат основой для дальнейшего изучения. Так при СТЭ ПРК эксперт должен установить наличие протечек с внутренней стороны кровли (из помещений), наличие на поверхности признаков нарушения герметичности (трещин, разрывов, отрывов рулонного ковра), а также заметных деформаций, которые могут являться источником протечек.

При производстве СТЭ экспертами используется метод графического моделирования – составление поэтажных планов, разрезов, разверток, схем и пр. В графических моделях фиксируются не поддающиеся текстовому описанию характеристики исследуемых объектов: ориентация относительно сторон света, расположение ОС в окружающей застройке, размеры, параметры и расположение помещений, элементов, выявленных дефектов и повреждений.

К общенаучным методам также относятся математические методы, к которым, преимущественно, относятся измерения, без которых невозможно ИМ. Измерения могут быть как прямые, так и косвенные. При прямых измерениях применяют инструменты (линейка, рулетка, штангенциркуль и др.) и оборудование (лазерный дальномер, теодолит, нивелир, тахеометр и др.). Косвенные измерения подразделяются на косвенные, основывающиеся на опытных данных нескольких прямых измерений и совокупные.

В последние годы для осуществления экспертной деятельности активно внедряются кибернетические методы [115], позволяющие автоматизировано осуществлять поиск и обработку научно- и нормативно-технической информации, необходимой для производства СТЭ; автоматически выявлять дефекты и повреждения и их геометрические параметры, производить математическое моделирование, формировать элементы ИМ ОС.

Под специальными понимают методы, применение которых сопряжено с использованием одной или нескольких наук. К ним относятся физико-химические, химические, физические методы, позволяющие проанализировать внешнее строение, состав, структуру, физико-химические свойства материалов, используемых в строительстве.

Зачастую техническое состояние ОС оценивается экспертами только на основании внешних признаков дефектов и повреждений. Особенно это касается протяженных объектов (кровли, фасады, полы и пр.), где проведение инструментального обследования весьма многодельно и результаты, как правило, подтверждают ожидания эксперта. Это, в первую очередь, связано с человеческим фактором, что приводит к недостоверным результатам СТЭ. В отдельных случаях

для расчетного обоснования выводов экспертами используются расчетные методы, подразумевающие выполнение как ручных расчетов, так и применения систем автоматизации проектирования (САПР). Использование САПР позволяет повысить качество расчетных методов исследования, наиболее полно моделировать состояние элементов ОС, использовать информационные модели ОС, полученные при проведении СТЭ для документирования и анализа установленных дефектов и повреждений.

К специальным методам также относится фотографирование [167], обеспечивающее высокую степень полноты передачи обстановки, фиксируя детали, не замеченные экспертом при осмотре. Также фотография не требует специфических знаний от получателя результатов СТЭ, так как техническая документация воспринимается не всеми участниками процесса.

Выделяют следующие виды фотосъемки:

- ориентирующая (фотографии взаимного расположения элементов ОС, взаимосвязанных дефектов рядом расположенных элементов и пр.);
- обзорная (состояние отдельных элементов ОС, содержащих дефекты и повреждения, с целью обоснования текстовой части заключения);
- узловая (места сопряжения элементов ОС крупным планом).

Также могут быть использованы панорамная съемка и фоторазвертки для масштабности передачи информации.

Все вышеописанные методы заимствованы из смежных с СТЭ сфер деятельности, постоянно обновляются, совершенствуются. Например, для съемки площадных объектов на текущий момент времени могут использоваться БАС, позволяющие не только осуществлять фото- и видеосъемку, но и получающие мультиспектральные снимки, ортофотопланы, облака точек. Это требует от эксперта своевременного изучения, обоснования и внедрения новых методов в экспертную практику, делает актуальными вопросы научно-методического и экспериментального обеспечения кроссплатформенности и трансдисциплинарности в комплексном использовании методом СТЭ.

1.4 Метрологическое обеспечение производства строительнотехнических экспертиз

При производстве экспертных работ активно используются приборы и оборудование, основанные на стандартных методах получения информации об обследуемых элементах ОС. Основными методами производства СТЭ, реализуемыми на практике, в наименьшей степени негативно влияющими на свойства объекта исследования и подлежащими автоматизации для повышения эффективности управления ЖЦ ОС являются методы неразрушающего контроля [57], как правило, визуального и инструментального, основанного на косвенных измерениях исследуемого параметра. Наиболее широкое распространения в СТЭ получили оптические, акустические, тепловые, магнитные методы, а также методы прямых и косвенных измерений [75, 88]. Тем не менее, вышеперечисленные измерительные методы несовершенны, а их применение без учета требований сопутствующих нормативных документов к технологии производства и статистической обработке результатов снижает достоверность СТЭ [89]. Методы зачастую небезопасны, так как работы проводятся на высоте, в условиях действующего производства или негативных атмосферных воздействий, существенно уступают методам визуального контроля, позволяющим провести СТЭ дистанционно.

Наравне с геодезическими инструментами, такими как тахометры и наземные лазерные сканеры в СТЭ используется менее точный метод фотограмметрии. Метод основан на получении фотографий высокого разрешения и применении электронных методов их обработки – создании ортофотопланов, позволяющих получить трёхмерную модель объекта. Этот метод может быть использован не только для получения геометрических параметров обследуемых ОС, но и для выявления дефектов и определения их параметров. Метод позволяет не только получить фотографическое изображение, но и зафиксировать содержащуюся информацию во времени, что особенно важно при организации цифрового документирования результатов СТЭ и последующего их анализа.

Для автоматизации процессов строительной дефектоскопии рядом авторов [48, 88, 94] использовались мульти- и гиперспектральных камер для оценки цвета и текстуры обследуемого элемента ОС с целью выявления его актуального технического состояния, однако широкое применение этой практики упирается в недостаток опыта и информации об обеспеченности результатов исследования.

Все вышеперечисленные методы получения информации (лазерное сканирование, фото-, видео- и тепловизионная съемка, мульти- и гиперспектральная съемка) могут быть осуществлены дистанционно с использованием беспилотных авиационных систем, а получаемые фото- и видеоматериалы могут быть автоматически обработаны современными цифровыми инструментами.

В отношении дальнейшего использования при формализации инструментов СТЭ, их автоматизации и автономизации методы неразрушающего контроля, (НК) к которым относятся и методы цифровой СТД должны быть системно метрологически обеспечены. Метрологическое обеспечение (МО) в области НК осуществляется с целью создания благоприятных условий для получения исчерпывающей и достоверной информации, достаточной для выработки определенных решений в областях деятельности, относящейся не только к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, но и для других [75].

МО НК представляет собой комплекс технических средств, организационно-технических мероприятий, норм и правил, регламентирующих методику проведения работ требуемой достоверности и точности оценки результатов. Это достигается за счет соответствия метрологическим требованиям средств неразрушающего контроля и технологической документации. Соблюдение требований позволяет обеспечивать необходимую достоверность контроля, единство измерений, прослеживаемость результатов измерений средствами НК.

Построение релевантной и достоверной системы автоматизированного НК реализуется процессным подходом к формированию МО [75], за счет:

- проектирования МО неразрушающего контроля, устанавливающего требования к показателям, обеспечивающим точность, достоверность, полноту и актуальность получаемой измерительной и иной информации;

- выбора гарантирующих точность, достоверность, полноту и актуальность получаемой информации принципов, методов и методик контроля и измерений;

- метрологического подтверждения пригодности элементов МО НК установленным требованиям. К метрологическому подтверждению также относятся испытания, утверждающие тип средств измерений, поверка и калибровка средств измерений, аттестация методик проведения измерений и др.).

Порядок производства измерений, состав измеряемых величин и метрологические требования к ним задаются в формируемых для использования на практике нормативных правовых или методических документах, регламентирующих производство СТД и АСТД.

На этапе проектирования и разработки процессов измерений, с учетом установленных на предыдущем этапе требований осуществляется моделирование процессов, учитывающее характеристики реальных условий, в которых будут выполняться измерения, испытания и контроль, оцениваются риски, связанные с несвоевременным получением, неполнотой и недостоверностью измерительной информации, устанавливаются требования к метрологической прослеживаемости результатов измерений. Так, большинство наземных лазерных сканеров и лидаров воздушного базирования, зарегистрированы в реестре средств измерений и подлежат ежегодной поверке, однако, для наземных систем существует ГОСТ Р 8.794 2012 [79], в то время как для лидаров на текущий момент времени отдельного нормативного документа нет, на практике используется ГОСТ Р 8.913-2016 [80]. Метрологическая поверка тепловизионного оборудования осуществляется по ГОСТ Р 8.619-2006 [78], а поверка оптических, мульти- и гиперспектральных камер заменяется процессом их калибровки. В случае рассмотрения измерительного оборудования в составе БАС требуется выполнение отдельного комплекса работ по метрологическому обеспечению их использования. На текущий момент ни одна такая измерительная система не внесена в реестр средств измерений и аттестованных методик и методического обеспечения применения реестровых средств измерений не существует [17].

Бесшовная интеграция разрабатываемых инструментов автоматизации СТД в практику экспертно-строительной деятельности, правомерность практического использования инструментов АСТД, в т.ч. для целей и задач эффективного управления ЖЦ ОС основываются на метрологическом подтверждении пригодности элементов МО НК, включающем:

- создание и аттестацию эталонов;
- создание методики сборки и аттестацию испытательного оборудования;
- аттестацию специалистов, реализующих практические методики АСТД;
- утверждение типа, поверку или калибровку средств измерений, контрольных мер и настроечных образцов;
- оценку соответствия вспомогательного оборудования установленным требованиям;
- метрологическую аттестацию методик контроля и измерений;
- метрологическую экспертизу документов по планированию и разработке процессов контроля и измерений;
- оценку квалификации и опыта работы специалистов АСТД;
- мониторинг условий выполнения контроля и измерений.

Представительное сопровождение разрабатываемых методов НК и реализуемых в них зависимостей показателей технического состояния элемента ОС от количественно и качественно устанавливаемых параметров автоматически выявляемых и диагностируемых дефектов рационально строить на алгоритмах множественной линейной и нелинейной регрессии, используемых в большинстве устоявшихся на практике методов анализа результатов косвенных измерений. В диссертационном исследовании рассматриваются средства измерений и испытаний, в отношении которых нормативное МО неполно или отсутствует, препятствуя обеспечению единства измерений с существующими методиками СТЭ и выполненными ранее изысканиями. В этой связи на основании процессов и параметров измерений, используемых в изыскательской деятельности, необходимо в перспективе разработать (дополнить, расширить) и установить к обязательному применению регламенты средств испытаний и методик их применения,

средств и инструментов аттестации и поверки. На текущий момент, учитывая продолжительность и институциональный характер этих мероприятий, в соответствии с устоявшейся практикой изысканий, методика и инструментальное обеспечение АСТД ПРК согласуется и вносится в техническое задание на производство изысканий, детально описывается и принимается заказчиком в программе изыскательских работ, носящей статус временного исполнительного документа, подытоживающего и подтверждающего надлежащий уровень производства и инструментального обеспечения экспертиз.

1.5 Выводы по главе 1

1. Дефекты и повреждения элементов оказывают существенное негативное влияние на продолжительность ЖЦ ОС. Несвоевременное их устранение приводит к лавинообразному нарастанию физического износа элементов и самого ОС, являясь причиной повреждения соседних, в случае ПРК, нижележащих конструкций.

2. Анализ нормативно-правовой базы управления ЖЦ ОС показал, что регламентам, регулирующим порядок производства и документирование результатов СТЭ, присущи как общие недостатки нормативных документов в экспертно-правовом поле, так и специфические для отрасли несовершенства технологического характера. Для повышения качества СТЭ необходимо осуществить переход на технологический уровень организации взаимодействия участников инвестиционно-строительной деятельности, при котором информатизация станет ключевым фактором, обеспечивающим повышение эффективности проектных, строительных и изыскательских работ. Такой переход позволит осуществить комплексный перевод управления ЖЦ ОС как на инструменты ТИМ, так и современное оборудование автоматизированных бесконтактных изысканий.

3. Существующие методы СТД ОС поверхностны, субъективны и труднопроверяемы, что совокупно с несовершенством требований нормативных документов, регламентирующих сроки и порядок проведения СТЭ, не позволяет в

должной мере своевременно и оперативно выявлять и устранять дефекты и повреждения, становящиеся причиной низкой эффективности эксплуатации ОС. Обследование технического состояния ОС выполняется вручную с использованием, преимущественно, контактных методов изысканий, а также проведения качественной и количественной оценки дефектов. Зачастую при последующем проведении СТЭ экспертами не могут быть учтены материалы ранее проведенных исследований, что не позволяет оценить и экстраполировать развитие дефектов во времени, предусмотреть своевременные, экономически обоснованные РВМ.

4. При производстве экспертных работ все активнее используются современные цифровые инструменты, не всегда должным образом метрологически обеспеченные, что затрудняет их применение для производства СТЭ, особенно судебной. В связи с этим требуется проведение дополнительных исследований, направленных на получение статистических данных, достаточных для разработки (совершенствования) регламентов производства цифровых СТД. С учетом применения новых инструментов исследования в других сферах производства (сельское и лесное хозяйство, дорожное строительство, энергетика, экологический надзор и пр.) МО современных бесконтактных инструментов и методик измерений является актуальной нормотворческой задачей.

5. Повышение эффективности управления ЖЦ ОС возможно с ростом качества и достоверности методов бесконтактного обследования элементов ОС с помощью БАС и цифровых инструментов количественной и качественной оценки дефектов.

2 МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Методология визуального обследования здания

Визуальное обследование (ВО) является наиболее распространённым видом обследования ОС [7, 30], зачастую, достаточным для установления категории технического состояния [32, 45]. При этом, качество результатов ВО не всегда позволяет оценить техническое состояние ОС с высокой достоверностью.

Это связано, в первую очередь, с низкой квалификацией привлекаемых специалистов, невозможностью проверки результатов без повторного обследования объекта, отсутствием методики контроля и стандартных форм представления результатов, труднодоступностью отдельных элементов.

ВО заключается в получении данных о техническом состоянии ОС и его элементов, достаточных для его оценки по внешним признакам. При этом согласно п. 5.1.9 [70] для проведения фотофиксации дефектов и повреждений при ВО допускается применение фото- и видеокамер, а также фотограмметрических методов обработки информации, не исключая применения приборов и средств контроля, в том числе контактного (лупы, эндоскопы, щупы и шаблоны, линейки, рулетки и др.).

Основным результатом ВО являются [70]:

- схемы и дефектные ведомости, включающие привязку мест их расположения и технических параметров;
- фотографии дефектных участков с описанием;
- результаты анализа деформации ОС и отдельных элементов;
- предварительная оценка состояния ОС;
- отчет по результатам ВО.

Анализ нормативной документации и технической литературы не позволил выявить общепризнанных указаний по порядку и последовательности действий при проведении ВО, при том, что содержательная часть работ и перечень характерных визуально определяемых дефектов представлены широко. В текущей практике ВО предлагается осуществлять в следующей последовательности действий [160, 161]:

- проведение сплошного визуального осмотра обследуемых поверхностей элементов ОС;
- камеральная обработка результатов ВО с составлением перечня и классификации выявленных дефектов;
- нумерация дефектов;
- составление схем дефектов с привязкой материалов фотофиксации;

- инструментальные измерения технических параметров выявленных дефектов;
- составление дефектных ведомостей и схем расположения выявленных дефектов и повреждений.

Следует отметить, что нормами не регулируется форма представления результатов ВО. Специалисты в своих отчетах используют различные типы условных обозначений дефектов и повреждений, их нумерацию, что приводит к разночтениям при анализе развития дефектов и при повторном обследовании.

В последние годы, особенно с запуском национального проекта «Беспилотные авиационные системы» (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 июня 2023 г. №1630-р), для визуального обследования активно исследуется и эпизодически используется БАС с установленным на них дополнительным оборудованием [13, 20] (фото- и видеокамеры, мульти- и гиперспектральные камеры, лидары, радарные системы и проч.), однако такая практика еще не может считаться устоявшейся и обоснованной.

2.2 Параметрическое моделирование в проектировании и изысканиях

Основной задачей развития строительной сферы на сегодняшний день является переход на полное цифровое управление ЖЦ ОС, начиная от этапа проектирования и заканчивая эксплуатацией объекта [120]. Современная строительная отрасль во всем мире столкнулась с новыми стандартами производительности, эффективности и сокращению затрат и сроков, современные строительные технологии позволяют строить быстро, качественно и выразительно [116]. ТИМ на практике доказал свою эффективность и именно поэтому стала основным направлением развития строительного проектирования и управления, перейдя в разряд стандартных отраслевых инструментов, закрепились на законодательном уровне и поощряется, например, снижением ставки кредитования компаний при использовании [108, 159].

По данным компании 1С 73% проектных организаций так или иначе применяют ТИМ, среди строителей-подрядчиков и генподрядчиков таких всего 43%

[127]. Одними из первых в использовании ТИМ стали компании, так или иначе работающие в программах 10-15 лет, для которых использование технологии стало дообучением. Для остальных строительных организаций переход на ТИМ – длительный и затратный процесс, включающий в себя разработку стратегии внедрения, закупку ПО, обучение специалистов или наем новых, и, соответственно, рост ресурсоемкости проектирования и управления ОС.

Сегодня ТИМ это не столько 3D-моделирование в САПР-программах, сколько целый комплекс инструментов коммуникации специалистов разных областей в цифровом формате, повышающих вариативность и управляемость проекта в трехмерной информационной модели, что уменьшает количество ошибок, способствует оптимизации затрат, оперативности и слаженности действий, отслеживанию изменений и ускорению строительства, а также обеспечивает информационную базу, применяемую в натурном возведении ОС и при его эксплуатации [37, 38]. Очевидно, комплексное программное обеспечение ЖЦ ОС, обеспечивающее единый цифровой формат и среду управления им – дело ближайшего времени [60, 61].

По данным Минстроя РФ [1] применение ТИМ многократно увеличивает эффективность, снижает стоимость и сроки строительства (Таблица 2).

Таблица 2 – Эффективность применения ТИМ

Снижение погрешности бюджета при планировании	в 4 раза
Возможность сокращения сроков инвестиционной фазы	до 50%
Возможность сокращения сроков строительства	на 20–50%
Снижение общих затрат на строительство и эксплуатацию	до 30%
Снижение вероятности ошибок в проектной документации	до 40%
Сокращение времени проектирования	на 20–50%
Уменьшение времени на проверку проекта	в 6 раз
Сокращение сроков координации и согласования	до 90%

Согласно исследованию НИУ МГСУ [118], отказ от традиционных методов строительного проектирования с помощью бумажных носителей в пользу цифровых инструментов способствует повышению как экономической так производственной эффективности, увеличивая показатели деятельности проектных

и строительных компаний до 20% (Рисунок 4). Причем с ростом опыта организации в ТИМ наблюдается рост и экономического эффекта от их использования [109], что, несомненно, повышает конкурентоспособность отрасли.

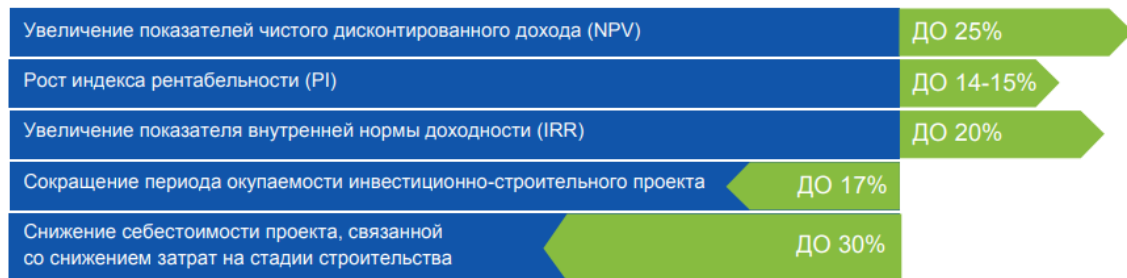


Рисунок 4 – Показатели эффективности инвестиционно-строительных проектов, реализуемых в ТИМ

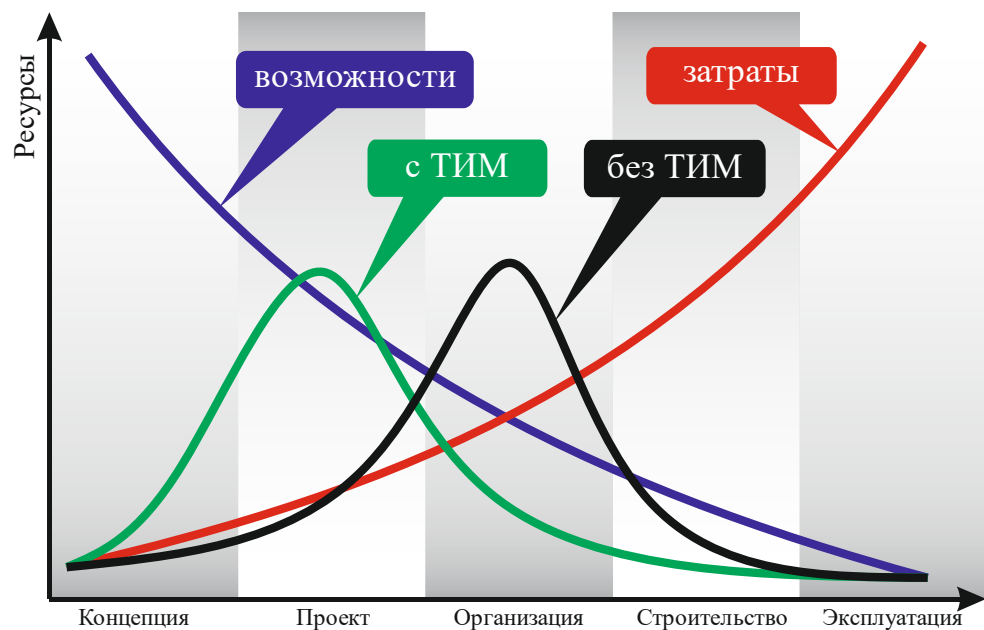


Рисунок 5 – Концепция эффективности ТИМ в строительном проектировании

Эффективность строительной проектной деятельности, реализуемой в ТИМ определяется возможностью переноса наиболее трудоемкой и сопряженной с большим количеством потенциальных ошибок и неточностей части проектирования — высокодетализированного пространственного конструирования — на ранние этапы проектной работы [39], осуществляемые в связной среде и с элементами цифрового двойника ОС, в связи с чем изменяемость проекта высока, а приведенная стоимость внесения изменений — низка (Рисунок 5) [42]. Это обсто-

тельность и позволяет считать ТИМ инструментом существенно более эффективной проектной деятельности, нуждающимся, тем не менее, в профессионально подготовленных и аппаратно-программно оснащенных эксплуатирующих кадрах [113]. В ряде случаев последнее существенно ресурсозатратно, что делает ТИМ не идеализированным инструментом эффективности отрасли, а только при определенных, позитивно складывающихся у потребителя кадровых и инструментальных возможностях [141], определяемых штатным и расширенным составом средств ПО.

К числу инструментов создания расширенных инструментов информационного моделирования — параметрических моделей, принадлежат среды и языки параметрического моделирования, в открытом или закрытом (доступном только разработчику) виде присутствующие во всех современных программах ТИМ. Так, в одном из наиболее популярных и функциональных программных продуктов ТИМ Archicad параметрическое моделирование реализуется в полностью открытом пользователю и интерфейсно дружелюбном формате внутренней среды разработчика на языке Geometric Description Language (GDL). Параметрические модели в GDL собираемые и информационно насыщаемые в интуитивно понятной и функционально обеспеченной внутренней среде программного комплекса, обеспечивающей полную совместимость с разрабатываемыми ИМ, обеспечивают возможности самостоятельного, гибкого, прикладного и клиентоориентированного расширения штатного функционала Archicad, существенно увеличивающего и область применения продукта, и перечень эффективно решаемых с его помощью управленческих задач, корпоративную связность и информационную безопасность проектных процессов, все более выполняемых в единой информационной среде [140].

Параметрические модели на сегодняшний день все активнее используются для создания внештатных инструментов строительного, в том числе специализированного проектирования — элементы зданий, инженерных сетей, навигационные знаки, оформительские обозначения, использование инструмента перспективно и для создания информационных прототипов дефектов и повреждений,

обеспечивающих их диагностику и мониторинг на ЖЦ ОС. Дефекты и повреждения могут быть как самостоятельными параметрическими моделями для наложения на штатно выполненные элементы ОС, так и инкапсулированы в параметрические модели нештатных элементов ИМ. Рассмотрим пример разработки параметрической модели элемента ОС, обеспечивающей ее высокоуровневное создание и ресурсоэффективное использование в проектной деятельности, поддерживаемое автоматизацией создания внешнего образа, структурного содержания и информационного наполнения. При разработке фундаментов зданий и сооружений отдельностоящие железобетонные фундаменты мелкого заложения являются рациональным технологическим решением, позволяющим достичь до 15% экономии средств на создание конструкции за счет сокращения земляных работ, возможной индустриализации конструкции и ее высокой конструктивной безопасности, допускающей монтаж и пуск в эксплуатацию в короткие сроки. Проектные задачи, стоящие перед проектировщиком отдельностоящих фундаментов, заключаются в рациональном подборе параметров подошвы и глубины ее заложения, конструировании арматурного каркаса с соблюдением требований строительных правил и практики проектирования, заключающейся в определенном наборе стандартных рутинных сценариев формирования, информационного наполнения и специфицирования модели конструкции [41].

Расчетное и проектное обоснование принимаемых при проектировании отдельностоящих фундаментов конструктивных решений осуществляется в соответствии с положениями [151, 152]. Ключевыми расчетным алгоритмами, формирующими рутинные проектные операции при конструировании фундаментов, являются размещение арматурных сеток подошвы с соблюдением принятого диаметра, шага, класса арматуры, параметров пересечения стержней, защитного слоя бетона. В значительной степени трудоемкость этих проектных процедур возрастает при необходимости многократного пересчета и перепроектирования фундаментов, индивидуализации его типоразмеров под различающееся нагружение отдельных колонн, корректное специфицирование расходуемых ресурсов,

сопряженное с многочисленными корректировками и изменениями, являющимися неотъемлемой практикой нормальной проектной деятельности, особенно в случае сжатых сроков или лимитированного финансирования строительства, вынуждающего проектировщика выискивать и реализовывать любые резервы по стоимостной и ресурсной оптимизации проекта. Основательно улучшить управление процессом проектирования, ускорить и ресурсно оптимизировать проект конструкций в этих условиях можно использованием параметрических моделей, допускающих широкую вариацию обширного диапазона исходных параметров и автоматически формирующих пространственное и плоские представления конструкции, ресурсные ведомости и необходимые элементы макетирования [5], что практически тождественно задачам документирования и обработки цифрового результата СТД ОС в целом.

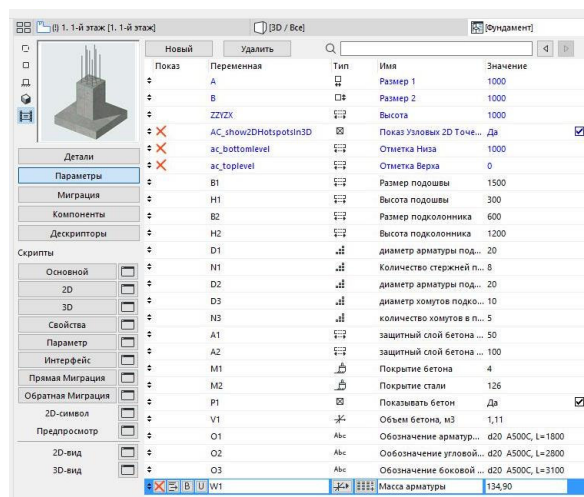


Рисунок 6 – Параметры модели фундамента в среде GDL для ArchiCAD

```
!Бетон
IF P1=1 THEN
  MATERIAL M1
  ADD -B1/2, -B1/2, 0
  BLOCK B1, B1, H1
  DEL 1
  ADD -B2/2, -B2/2, H1
  BLOCK B2, B2, H2
  DEL 1
```

Рисунок 7 – Фрагмент описания пространственного представления модели на языке GDL для ArchiCAD

Создание параметрической модели включает формирования управляющих параметров, описание объемного представления (3D-тела) и плоского изображения в макете (2D-символа), формирование спецификаций (сметных заданий) и ограничений на изменение и содержание отдельных параметров модели, обеспечивающих ее безотказность и устойчивость. Параметрами, управляющими внешним видом и информационным наполнением модели фундамента, управляемыми

пользователем, являются габаритные размеры конструкции, диаметр, класс и масса арматуры, количество стержней, класс бетона, его объем и защитные слои и прочее, список может быть существенно расширен в иных случаях (Рисунок 6). Модель содержит описание пространственного и плоского представления элементов, возможность отдельного отображения частей конструкции (сокрытия бетонной части), алгоритм установки элементов арматурного каркаса с изменяемыми параметрами арматуры – диаметрами, шагами установки, количеством элементов и параметрами объемной привязки арматуры. Команды скрипта (Рисунок 7) задают размеры подошвы и подколонника фундамента, определяют взаимное расположение элементов, привязку к точке вставки в ИМ и прочие геометрические и информационные параметры проектируемой модели.

Возможности автоматизированного подсчета ресурсоемкости модели (объема бетона и массы арматуры) реализованы в спецификационной части модельного редактора. Скрипт подсчета объемов материалов (Рисунок 8) необходим для оценки натуральной ресурсоемкости фундамента, переменные V1 и W1 определяют количество бетона и арматуры объекта соответственно, рассчитываемые по актуализируемым размерам элементов и транслируемые в числовом формате в создаваемую спецификацию элемента (Рисунок 9).

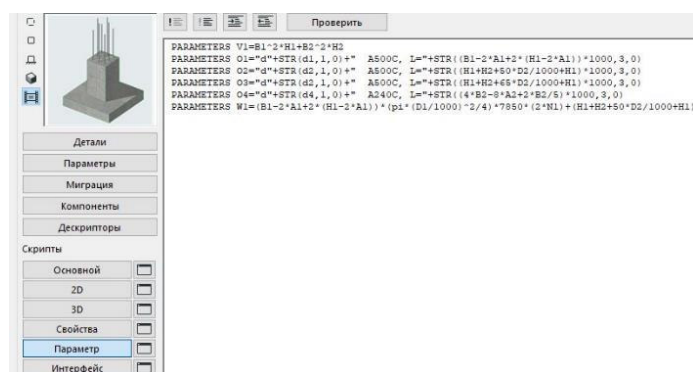


Рисунок 8 – Скрипт автоматизированного подсчета ресурсоемкости модели

СПЕЦИФИКАЦИЯ ФУНДАМЕНТОВ						
ID Элемента	Количество	Обозначение ар-ры подошвы	Обозначение угловых арматуры подколонников	Обозначение боковой арматуры подколонника	Объем бетона, м3	Масса арматуры
Ф1	16	d16 A500C, L=2100	d25 A500C, L=3050	d25 A500C, L=3425	3,67	202,14
Ф2	9	d18 A500C, L=2600	d25 A500C, L=3290	d25 A500C, L=3625	2,96	252,99
					85,36	5511,15

Рисунок 9 – Автоматически сформированная спецификация фундаментов с указанием объема бетона и массы арматуры

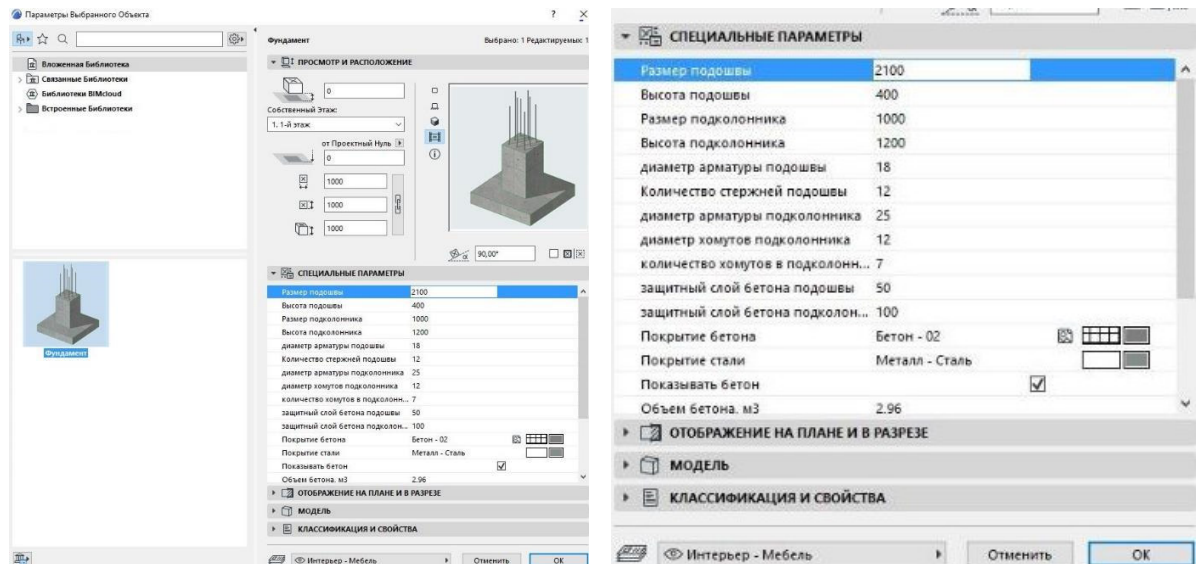


Рисунок 10 – Окно работы с параметрической моделью в ПК Archicad

Интерфейсная процедура вставки и редактирования модели фундамента в ИМ ОС (Рисунок 10) реализует взаимодействие с пользователем и непосредственную работу с инструментом при проектировании, содержит элементы информационного наполнения и его актуализации, результаты анализа и встроенные элементы советования при принятии рациональных технических и управленческих решений [24], что применимо и к моделированию дефектов и повреждений ОС.

Количественная оценка эффективности использования параметрических моделей получена сравнением ресурсоемкости создания элемента ИМ штатными и расширенными параметрическим объектом средствами ТИМ ПО. Проектирование фундаментов штатными инструментами, даже с использованием шаблонных объектов отдельных конструктивных элементов арматурного каркаса и бетонного остова, в целом, составило от 0,5 часов (оценка автора). Формирование параметрической модели конструкции, складываясь из этапов сбора и подготовки исходных данных, определения основных параметров модели, написания скрипта для создания модели и размещения в ней арматурных каркасов, написания скрипта для подсчетов объемов ресурсов заняло у автора не более 1 часа. Таким образом, существенная экономии времени и труда отмечается при создании и внесении в проект даже трех-пяти фундаментов, что много меньше потребности большинства реальных проектов. Средний проект ОС, опирающегося на

отдельностоящие фундаменты, содержит до 10 элементов типовых, но различных по армированию и габаритным размерам конструкций, проектирование которых параметрическими моделями может ускориться с 15-ти до 5-ти часов, что не только существенно повышает производительность проектного коллектива, но высвобождает проектировщика для решения более значимых и существенных для проектирования задач — индивидуализации конструкции, рационализации ее армирования, детального анализа и учета факторов действительной работы элемента под нагрузкой, вносимых в дальнейшем в используемые параметрические модели ИМ ОС при актуализации ресурсоэффективности принятых технических решений [4].

Основными преимуществами технологии параметрического моделирования, эффективными при создании цифровых моделей дефектов ОС становятся:

- быстрота корректировки технических решений в зависимости от внешних факторов среды эксплуатации (нагрузок, воздействий, условий обслуживания);
- мгновенное отображение во всех частях проекта изменений любого элемента использованной параметрической модели;
- автоматический подсчет объемов в спецификациях, ресурсных и элементных ведомостях;
- возможность расширения функциональности параметрической модели и уровня ее детализации внесением в ИМ ОС информации об эксплуатационных событиях (ремонтах, вскрытиях, реконструкции, и т.д.) при управлении ЖЦ ОС;
- возможность расширения функциональности параметрической модели внесением информации о потребности и стоимости ресурсов и/или интеграцией с элементной ресурсной базой через интерфейсы сметных классификаторов;
- возможность расширения функциональности параметрической модели созданием дополнительных расчетных блоков, осуществляющих структурный и управленческий анализ элемента и модели (расчет внутренних усилий, оптимизация и проч. советующие и инженерные функции) [119].

Следует отметить появившиеся относительно недавно инструменты визуального программирования для создания параметрических моделей. К ним следует отнести Grasshopper для Rhino в связке с Archicad. Визуальный метод программирования подразумевает сборку программы из функциональных блоков (нодов), соединенных между собой в последовательность действий. Каждый нод имеет входы и выходы для ввода и вывода информации путем подключения к соседним нодам, а также содержит в себе подпрограмму, выполняющую определенные вычисления. Код позволяет создавать сложные параметрические модели, включающие в себя аналитические вычисления, пространственные построения, выбор и оптимизацию элементов модели и проч. Несомненным преимуществом визуального программирования является открытость исходного кода для написания плагинов практически для любого ТИМ ПО, что дает специалистам различных отраслей инструмент для создания собственных нодов, автоматизирующих их текущую проектную и управленческую деятельность.

В составе параметрических моделей, равно как и при работе с ними, организационно и инструментально требуется осуществить ряд аналитических действий, связанных как с документированием и оценкой текущего состояния модели, так и расчетом ее параметров, необходимых в т.ч. для экстраполяции будущего состояния. Пример такой аналитической работы, эффективно автоматизируемой параметрическим моделированием, может послужить авторская модель «Оценка баланса земляных масс» в Rhino. Целью моделирования являлось автоматизированное построение планируемого рельефа участка ОС на основании данных топографической съемки с последующим автоматизированным вычислением объема земляных масс. Для решения поставленной задачи геометрический и аналитический алгоритмы были формализованы на языке визуального программирования Grasshopper для Rhino (Рисунок 11), результаты параметрического моделирования переданы в ИМ ОС в формате .ifc, что позволило визуализировать и качественно оценить ресурсоемкость принятых при планировании рельефа технических решений (Таблица 3). При этом инженер получает возможность оперативно автоматически изменять модель рельефа изменением только

набора исходных данных, что позволяет модели быть универсальной, масштабируемой и ресурсоэффективной, стоящей затрат на ее разработку и отладку.

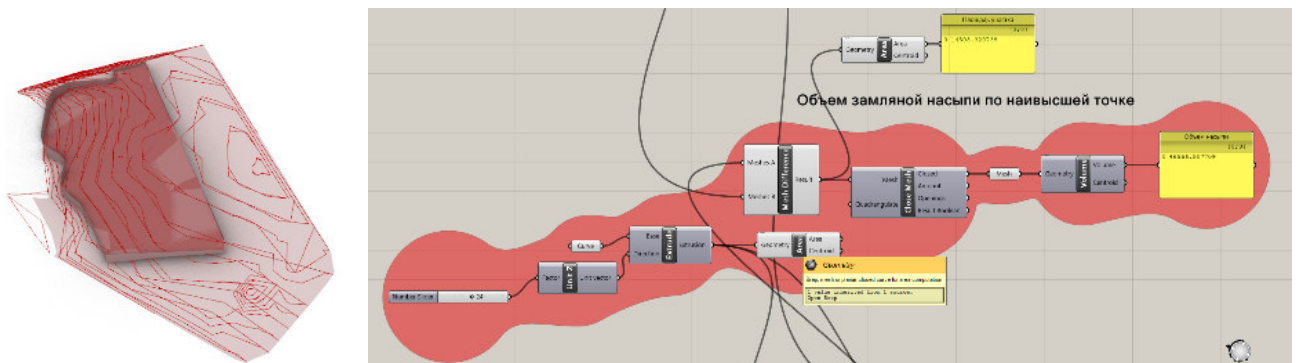


Рисунок 11 – Цифровая модель и фрагмент алгоритма вычисления объема земляных масс на языке визуального программирования Grasshopper для Rhino

Таблица 3 – Ведомость объемов земляных масс

Наименование грунта	Объем, м ³
Грунт планировки территории	46557
Поправка на уплотнение (остаточное разрыхление)	4903
Итого переработанного грунта	51460

Представленные алгоритмы параметрического моделирования, пример их реализации в ТИМ, демонстрация и количественная оценка эффективности практического использования параметрических моделей элементов ОС (включая и потенциально разрабатываемые модели дефектов ОС), обеспечивают общую эффективность цифрового управления ОС в ТИМ в условиях ограниченного кадрового и программного обеспечения, при развертывании корпоративных стандартов ИМ и шаблонных библиотек проектируемых элементов, расширяющих возможности штатного функционала ТИМ ПО. Использование параметрических моделей, требующее определенных усилий и затрат при их создании, оперативно окупается снижением количества проектных ошибок и ростом качества проектной продукции и принимаемых управленческих решений, сокращением рутинных операций и трудозатрат, высвобождающим и направляющим потенциал пользователя на решение задач ресурсной, технологической оптимизации и вариантного проектирования. Широкая номенклатура параметров модели позволяет автоматизированно создавать актуализируемые ресурсные ведомости эле-

ментов и всей ИМ ОС, обеспечивающие рациональную связку инженерного проектирования с актуальной ресурсоемкостью технических и управленческих решений, позволяющую осуществлять рациональное моделирование на любых этапах и в любых инженерных задачах управления ЖЦ ОС [3].

2.3 Инструментальная база производства строительной технико-экспертизы с применением беспилотных авиационных систем

Применение БАС в строительстве требует учета специализированных характеристик, соответствующих различным задачам отрасли. Обеспечение эффективности, точности и безопасности использования БАС строится на определении ключевых параметров устройства, к которым относятся грузоподъемность, точность позиционирования, устойчивость к погодным условиям и интеграция с цифровыми платформами приема и передачи информации (Таблица 4).

Таблица 4 – Характеристики отраслевых задач для применения БАС

Задача	Характеристика	Количественные параметры
Грузоподъемное оборудование	Грузоподъемность	5–50 кг (стандартные дроны); до 200 кг (гибридные системы).
	Точность позиционирования	±5 см.
	Рабочая высота	До 150 м
	Скорость перемещения	5–15 м/с
Средства подмачивания	Грузоподъемность платформы	10–20 кг
	Время разворачивания	До 5 минут
	Динамическая устойчивость	До 10 м/с ветровой нагрузки
	Максимальная рабочая зона	До 5х5 м
Фиксация	Прочность удерживающих механизмов	До 500 Н (50 кгс)
	Погрешность позиционирования	±2 см
	Время удержания	До 30 минут
	Диапазон применяемых материалов	Толщина материалов: 2–50 мм (стекло, металл, бетон).
Инструменты доставки	Грузоподъемность	До 10 кг
	Дальность доставки	До 2–5 км
	Скорость доставки	До 10 м/с.

Задача	Характеристика	Количественные параметры
	Точность посадки	± 10 см
	Обратная логистика	Время обратной доставки: до 15 минут
Внутрипроизводственная логистика	Оптимизация маршрутов	Время расчета маршрута: до 10 секунд
	Пропускная способность	До 100 операций доставки в день
	Скорость перемещения	До 8 м/с при средней нагрузке
	Интеграция с цифровыми платформами	Поддержка стандартов: IFC, gbXML
	Мониторинг и контроль	Обновление данных: каждые 1–5 секунд в режиме реального времени

Для иллюстрации применения БАС в СТЭ приведены примеры конкретных моделей, соответствующих описанным характеристикам (Рисунок 12). Каждая из представленных моделей БАС обладает техническими возможностями, позволяющими решать специализированные задачи отрасли:

- DJI Matrice 300/350 RTK (Рисунок 12, а) оснащен RTK (измерения в режиме реального времени) модулем, обеспечивающим высокую точность позиционирования (± 5 см), и поддерживает установку различного навесного оборудования. Модульная конструкция позволяет адаптировать БАС под конкретные отраслевые задачи – мониторинг строительных объектов, доставка мелких материалов и инструментов, сбор данных для создания 3D-моделей;

- DJI Mavic 3 (3T, 3PRO, (Рисунок 12, б) оснащен 4/3 CMOS-камерой Hasselblad, обеспечивающей выдающееся качество изображения. Аппарат обладает временем полета до 46 минут, передовыми системами обнаружения препятствий в 360° и передачи видео на дальность до 15 км. Существуют различные исполнения БАС – с тепловизионной и мультиспектральной камерами;

- Freefly Alta X (Рисунок 12, в) способен поднимать грузы до 15 кг, устойчив к ветровым нагрузкам (до 10 м/с) и поддерживает установку специализированных сенсоров. Аппарат используется для фиксации временных конструкций, перемещения строительных элементов средней тяжести и работы на сложных строительных площадках;

а) DJI Matrice 300/350 RTK



б) DJI Mavic 3



в) Freefly Alta X



г) Yuneec H520



д) Геоскан 801



е) DJI Matrice 4



ж) Autel EVO Max 4T Defence



з) Геоскан 401



Рисунок 12 – Модели БАС, рациональные для использования в СТЭ

– Yuneec H520 (Рисунок 12, г) оснащен тепловизором и лидаром, обеспечивая точность позиционирования до ± 1 см с использованием RTK. Он эффективен для диагностики фасадов, крыш и инженерных систем, сбора данных для

топографических и геодезических изысканий, создания цифровых моделей зданий;

- Геоскан 801 (Рисунок 12, д) – отечественный БАС, оснащенный 2-мя камерами с высоким разрешением для высококачественной фото и видеосъемки с возможностью 12-кратного приближения без потери качества;

- DJI Matrice 4 (Рисунок 12, е) – профессиональный БАС с оптической камерой и тепловизором, созданный для задач высокой отраслевой сложности. Аппарат штатно оснащен интегрированным искусственным интеллектом, распознающим транспортные средства, суда, артефакты на поверхности земли и иные расширяемые в перспективе объекты исследования;

- Autel EVO Max 4T Defence (Рисунок 12, ж) оснащен оптической и тепловизионной камерами с 10-кратным оптическим и 160-кратным цифровым увеличением;

- Геоскан 401 (Рисунок 12, з) – отечественный БВС, оснащенный оптической фото- и видеокамерой, лидаром, гамма-спектрометром и комплексом аэромагнитной съемки с квантовым магнитометром.

Представленные модели БАС обладают широким диапазоном технических характеристик, позволяющих применять их в заводском или кастомизированном исполнении для эффективного решения специализированных задач СТЭ в условиях структуры, состава и окружения большинства ОС, исследуемых в настоящее время.

Исследование разнообразного навесного оборудования, предназначенного для выполнения задач СТЭ, позволяет сделать вывод о наличии широкого спектра технических решений, адаптирующих БАС под варьируемые технические требования. Так, лидар — технология дистанционного зондирования, использующая лазерное излучение для создания высокоточных 3D-моделей поверхности, может быть использован для решения ряда задач СТЭ, таких как создание 3D-моделей поверхности, мониторинг изменений рельефа, определение объемов земляных работ и мониторинг состояния инфраструктуры (Таблица 5).

Таблица 5 – Основные лидары, используемые на мониторинговых БАС

Модель лидара	Тип	Диапазон измерения, м	Точность измерения, см	Вес, кг	Габариты, см
DJI Zenmuse L1	Механический	190/450	5-10	0,93	15×17×11
DJI Zenmuse L2	Механический	250/450	4-5	0,9	15×18×13
Velodyne HDL-64E	Механический	100	2-5	1,3	23×18×15
Riegl VUX-240	Механический	400	1-2	2,0	15×10×8
Trimble AX60	Механический	200	2-5	1,5	12×8×6
Sick LMS511	Механический	80	2-5	1,0	10×6×4
Quanergy M8	Твердотельный	200	3-5	0,5	10×6×4
Leica SPL100	Твердотельный	150	1-2	0,7	10×6×4
Hokuyo UST-10LX	Твердотельный	30	1-2	0,2	6×4×3
Ouster OS1	Твердотельный	120	1-2	0,4	8×5×3

Механический лидар использует движущиеся части, которые сканируют окружающую среду и измеряют расстояние до объектов следующим образом — лидар испускает лазерный луч, который отражается от объекта и возвращается к лидару, вращающееся зеркало или лазерный диод сканирует окружающую среду, создавая двумерную картину расстояний до объектов. Твердотельный лидар использует сканирование, основанное на неподвижных элементах оборудования, и работает следующим образом — лазерный диод испускает лазерный луч, который отражается от объекта и возвращается к лидару, массив фотодетекторов измеряет интенсивность лазерного луча и рассчитывает расстояние до объекта. Результаты измерений обрабатываются и используются для создания трехмерной модели окружающей среды или ОС.

Таблица 6 – Тепловизионные камеры, используемые на мониторинговых БАС

Модель тепловизора	Разрешение	Чувствительность	Диапазон температур, °C	Частота кадров, Гц	Вес, г	Энергопотребление, Вт
FLIR Vue Pro R	640x512	50 мК	–40...+135	30	100	2,5
DJI Zenmuse H30T	1280x1024	50 мК	–20...+130	30	920	2,8
Boson 60	640x512	20 мК	–40...+550	90	100	3,0
Tau 2 640	640x480	50 мК	–25...+135	30	100	2,5

Тепловизионная камера — устройство, позволяющее обнаруживать тепловые аномалии и измерять температуру объектов в окружающей среде. Камеры преобразуют тепловое излучение в видимое изображение, позволяя визуализировать температурные различия объектов. Выбор тепловизионной камеры для

БАС обуславливается параметрами решаемой технической задачи СТЭ, в первую очередь техническими требованиями к разрешению, чувствительности и условиям эксплуатации (Таблица 6). Интеграция тепловизионной камеры в БАС существенно расширяет отраслевые возможности последних, превращая его в эффективный инструмент энергетического исследования, теплового анализа и промышленного мониторинга.

Мультиспектральная камера — устройство, позволяющее одновременно получать изображения различных типов (Таблица 7), работающее на принципе разделения электромагнитного спектра на несколько диапазонов определенной длины волны, что существенно расширяет области применения и перечень решаемых задач СТЭ. В отличие от прочих комплектующих БАС доступных видов мультиспектральных камер для этих устройств немного, классифицировать их можно по нескольким признакам:

— *количество спектральных диапазонов:*

- камеры с ограниченным количеством диапазонов (3-5), включают в себя основные цвета (красный, зелёный, синий) и несколько каналов ближнего инфракрасного диапазона (NIR). Эти камеры доступны, но собирают менее детальную информацию об исследуемом объекте, устанавливаются на БАС, выполняющих быстрый качественный мониторинг без глубокого анализа данных;

- камеры с расширенным количеством диапазонов (6-10 и более), включают больше каналов ближнего инфракрасного диапазона, могут охватывать коротковолновый и средневолновый инфракрасные диапазоны (SWIR, MWIR). Эти камеры менее доступны, но обеспечивают детальный анализ, позволяя получать информацию о скрытых ранее свойствах исследуемых объектов. Камеры устанавливаются на БАС, выполняющих задачи СТЭ с глубоким анализом данных;

— *по типу сенсора:*

- CMOS-сенсоры – наиболее распространённые, обеспечивающие высокую скорость съёмки и хорошую чувствительность. CMOS-сенсоры недорогие, но могут иметь высокий уровень шума при слабом освещении;

Таблица 7 – Мультиспектральные камеры для мониторинговых БАС

Модель	Количество каналов	Спектральные диапазоны, нм	Радиометрическая глубина, бит	Вес (г)	Особенности
Parrot Sequoia+	4 + 1 (солнечный сенсор)	470 (синий), 550 (зелёный), 660 (красный), 735 (красный краевой), 840 (NIR)	12	220	Солнечный сенсор для калибровки, поддержка RTK, высокая чувствительность в условиях низкой освещенности
DJI Mavic 3 Multispectral	4	560 (зелёный), 650 (красный), (730) красный край, 860 (NIR)	16	900	Комбинация мультиспектральной и RGB камер, собственное программное обеспечение. Высокая точность позиционирования за счет RTK модуля
DJI Mavic 2 Multispectral	4	450 (синий), 560 (зелёный), 650 (красный), 860 (NIR)	16		Комбинация мультиспектральной и RGB камер, собственное программное обеспечение. Высокая точность позиционирования за счет RTK модуля
TOPODRON E P61	5-14	470 (синий), 560 (зелёный), 665 (красный), 720 (дальний красный), 840 (NIR)	16	450	Высокое разрешение. Большое количество каналов. Совместима с различными БАС
Geoscan Pollux	5	470 (синий), 560 (зелёный), 665 (красный), 720 (дальний красный), 840 (NIR)	12	260	Высокая производительность. Собственное ПО. Возможность построения карт в естественных цветах

- CCD-сенсоры – обеспечивают высокое качество изображения и низкий уровень шума, но медленнее и дороже, чем CMOS-сенсоры. Малоподходящи для массового использования в мониторинговых БАС из-за ограничений по весу;

- *по методу генерации изображения:*

- pushbroom-сканеры – линейные сенсоры, осуществляющие сканирование местности при движении БАС. Pushbroom-сканеры обеспечивают высокое пространственное разрешение, но требуют дооснащения БАС устройством полетной стабилизации;

- frame-камеры – устройства, захватывающие изображение всего объекта исследования в целом, что делает их проще в использовании и не требует дооснащения БАС устройством полетной стабилизации. В тоже время frame-камеры имеют меньшее пространственное разрешение по сравнению с pushbroom-сканерами;

- *по степени детализации:*

- высокое разрешение, предоставляющее подробную информацию, но требующее значительных аппаратных ресурсов для обработки данных онлайн;

- среднее разрешение, являющихся компромиссом между детализацией и объёмом обрабатываемой информации;

- низкое разрешение, подходящее для качественного мониторинга, включающего обзор территорий с ограниченной детализацией.

Фотовидеокамеры являются одним из наиболее распространённых и универсальных видов навесного оборудования для беспилотных летательных аппаратов, применяемого для решения разнообразных задач мониторинга и диагностики благодаря простоте, доступности и высокой функциональности (Таблица 8). Выбор фотовидеокамеры определяется спецификой отраслевых задач, однако существует ряд характеристик, которые имеют значение при оснащении БАС:

- качество изображения/видео;

- разрешение, от размера которого зависят детализация изображения и объем данных, требующих хранения и обработки;

– динамический диапазон — способность камеры улавливать детали как в областях с очень ярким, так и с очень тёмным освещением. Высокий динамический диапазон критически важен для создания качественных изображений в условиях значительного контраста освещённости, что характерно периодически выполняемых СТЭ;

– светочувствительность — способность камеры функционировать при недостаточной освещённости. Более высокие значения светочувствительности позволяют вести съёмку в условиях плохой видимости (сумерки, ночь), но могут привести к появлению шумов на изображении;

– частота кадров — параметр, определяющий плавность и естественность видео для камерального анализа и детализацию фиксируемого процесса при малом времени или динамическом характере его протекания;

– битрейт — параметр, определяющий количество данных, передаваемых или записываемых в единицу времени. Высокий битрейт способствует улучшению качества видео, но при этом требует больших аппаратных ресурсов для хранения и передачи данных.

При комплектовании кастомизируемых под задачи СТЭ БАС учитываются следующие технические характеристики устанавливаемых камер:

– вес и габариты — камера не должна создавать избыточную нагрузку на БАС, не сокращать продолжительность полёта, обладать компактностью, необходимой для удобства монтажа и транспортировки;

– надёжность в условиях внешних воздействий — камера должна сохранять работоспособность в условиях вибрационных и динамических средовых нагрузок, характерных для ряда СТЭ. Работоспособность камеры в столь же характерных для СТЭ условиях повышенной влажности, пыли и прочих агрессивных сред характеризуется степенью защиты IP;

– стабилизация изображения — ключевой аспект съёмки, обеспечивающий чёткость и качество видео и фотографий, характерный для условий ее ведения с борта БАС. Стабилизация изображения может быть реализована оптически (внутри самой камеры) или программно (цифровыми алгоритмами);

Таблица 8 – Фото-, видеокамеры для мониторинговых БАС

Модель	Разрешение, Мп/К	Скорость съемки, fps	Стабилизация	Вес, г	Размер, мм	Интерфейс	Особенности
DJI Zenmuse P1	42 (фото), 2К (видео)	3 (фото), 60 (видео)	3-осевая гироскопическая подвеска	595	119×104×78	USB-C, MicroSD, HDMI	Full Frame сенсор, поддержка RAW, высокий динамический диапазон, интеграция с RTK
DJI Zenmuse H20T	20 (фото), 4К (видео)	14 (фото), 60 (видео)	3-осевая гироскопическая подвеска	710 (с подвесом)	132×132×159	HDMI, USB, MicroSD	Многофункциональность, термический сенсор, интеллектуальные режимы съемки
DJI Mavic 3 Cine	20 (фото), 5К (видео)	20 (фото), 50 (видео)	3-осевая гироскопическая подвеска	240	61×61×61	USB-C, MicroSD, HDMI	Высокое разрешение видео, поддержка Apple ProRes, улучшенная батарея, интеллектуальные режимы съемки
GoPro HERO10 Black	23 (фото), 5К (видео)	30 (фото), 60 (видео)	HyperSmooth 4.0 (EIS)	157	68×49×32	Wi-Fi, Bluetooth, USB-C, MicroSD	Компактность, высокая скорость съемки, поддержка HyperSmooth, водонепроницаемый корпус
Sony RX0 II	15,3 (фото), 4К (видео)	16 (фото), 30 (видео)	Электронная стабилизация	132	60×43×35	USB-C, MicroSD	Малогабаритная, высокое разрешение, поддержка RAW, электронная стабилизация, поворотный экран

– угол обзора — параметр, определяющий область пространства, охватываемый камерой за один кадр. Широкоугольные объективы позволяют получить широкий обзор и подходят для съёмки больших пространств, в то время как узкоугольные объективы предоставляют детальное изображение и используются для съёмки объектов, находящихся на расстоянии.

Важным аспектом работоспособности камеры в условиях выполнения задач СТЭ задач является набор поддерживаемых форматов файлов фото- и видеосъёмки (JPEG, RAW, MP4, MOV и других), обеспечивающих совместимость информационного потока с инструментами обработки и хранения данных, штатно реализованными в ПО ТИМ .

Специальные задачи СТЭ включают периодическое измерение физико-механических свойств материалов и сред, что делает БАС, оснащенной измерительными системами и работающей в труднодоступных, опасных, масштабных условиях мониторинга эффективным средством его рационализации. Навесным измерительным оборудованием таких специализированных БАС могут быть газоанализаторы, датчики радиации, магнитометры, ультразвуковые толщинометры, склерометры и прочие контактные устройства. Газоанализаторы представляют собой приборы, основанные на инфракрасном, электрохимическом, термokatалитическом принципах детектирования, предназначенные для определения качественного и количественного состава газовых смесей, широко используются в промышленном, медицинском и экологическом мониторинге. Применение газоанализаторов эффективно при контроле качества воздуха, оптимизации технологических процессов, обеспечении промышленной и бытовой безопасности. Датчики радиации — устройства, предназначенные для обнаружения и измерения ионизирующего излучения, находящие широкое применение в отраслевом мониторинге в энергетике, промышленности и в научных исследованиях. Газоразрядные, сцинтилляционные и полупроводниковые датчики радиации преобразуют энергию ионизирующего излучения в измеряемый и анализируемый электрический сигнал. Датчики радиации рациональны в СТЭ, включающем контроль уровня радиационного фона, обнаружение источников излучения, обеспечение

радиационной безопасности. Магнитометры, предназначенные для измерения магнитных полей и магнитных свойств различных материалов, широко применяются в геофизике, космических исследованиях, археологии и других областях мониторинга среды. Магнитометры используются при решении изыскательских задач, связанных с измерением напряжённости и направления магнитного поля, определением намагниченности материалов, выявлением аномалии магнитного поля в геологоразведке, исследовании пространства, создании навигационных систем. Ультразвуковые толщинометры, функционирующие на основе использования ультразвуковых волн для измерения толщины различных материалов без необходимости их разрушения, применяются при контроле трубопроводов, резервуаров и прочих тонкостенных конструкций. Устройства используются при выявлении коррозии, эрозии, износа и других дефектов элементов ОС, что делает использование навесных версий толщинометров эффективным оснащением БАС в СТЭ промышленных объектов. Склерометры, измеряющие твердость материалов измерением отскока / вдавливанием индентора определённой нагрузкой, также возможны к использованию на базе БАС.

На текущий момент времени существующие БАС и навесное оборудование к ним позволяют выполнять рутинные операции визуального и по мере необходимости контактного обследования, аккумулируя фото- и видео материалы, термограммы тепловизорных съёмок, облака точек, описывающие геометрические параметры обследованных конструкций, что служит источником данных для составления исполнительной, проектной документации чертежей, информационных моделей, экспресс-диагностики состояния и деформаций ОС. Таким образом, преимуществами решения задач СТЭ с использованием БАС являются следующие аспекты, определяемые как параметрами навесного оборудования, так и техническими возможностями носителя:

- высокая скорость выполнения СТЭ, сокращение сроков сбора данных;
- доступность производства СТЭ в ранее труднодоступных и опасных ОС;
- точность результата СТЭ, обеспечиваемая высокой разрешающей способностью и полетной стабилизацией оборудования;

- сниженные затраты на оборудование и его обслуживание, экспоненциально уменьшающиеся с ростом периодичности СТЭ;
- сниженные риски для экспертного и обслуживающего персонала, связанные с бесконтактностью и безопасной доступностью исследуемой среды;
- цифровое документирование и потенциально полностью автоматизированная обработка результата СТЭ, обеспечивающие автономность производства экспертиз, оперативность и эффективности построенных на этой основе систем управленческого советования.

2.4 Нейросетевой анализ изображений

Нейронные сети (НС) являются эффективным инструментом обработки информации и инновационной организации экспертных работ [6, 14], потенциально обеспечивая высокую эффективность управления и реализации строительного проекта на всех этапах ЖЦ ОС [23, 19]. НС позволяют автоматически анализировать большой объём данных, поступающих извне с оптических [31], лидарных и прочих систем, выявлять закономерности, прогнозировать течение исследуемых процессов [22], что делает НС эффективным подспорьем в решении задач СТЭ. Основными причинами, тормозящими повсеместное внедрение НС в экспертную деятельность, является отсутствие или недостаток специализированных/обученных сетей и инструментов их практического обучения, большое разнообразие исследуемых ОС, элементов и дефектов. Последнее обстоятельство значительно снижает качество и достоверность технического зрения НС, технологии распознавания дефектов ОС в составе СТЭ [106], для компенсации чего необходимы новые инструменты как создания, так и совершенствования НС.

Современные НС в общетехническом смысле термина – это математические модели, воплощенные в программном виде, функционально подражающие биологическим НС [18], представляя собой уникальный аналитический инструмент современной практики инженерных исследований, способный обучаться и формировать механизмы распознавания и анализа, результируя незамкнутыми

решениями статических и динамических задач, автоулучшаемыми и самосовершенствуемыми в процессе целевого использования. Получению приемлемых результатов нейросетевого анализа, в частности востребованного в СТЭ технического зрения, предшествует длительный и объёмный процесс обучения [21], эффективность организации которого целиком зависит от выбранной архитектуры сети и используемого программного инструментария.

НС по своему строению повторяет нервные клетки, т.е. состоит из нейронов и соединяющих их синапсов. Нейроны представляют собой объединенные в слои элементы, определяющие по установленному правилу выходные параметры [55], НС самостоятельно включают и объединяют бесконечное число нейронов исходя из опыта решения задач, что обеспечивают гибкую приспособляемость инструмента и рост качества обучением. Среди уже решаемых НС задач, демонстрирующих эффективность и потенциал инструмента, можно выделить кластеризацию, классификацию, регрессионный анализ, техническое зрение и другие, комплементарные основным производственным задачам СТЭ.

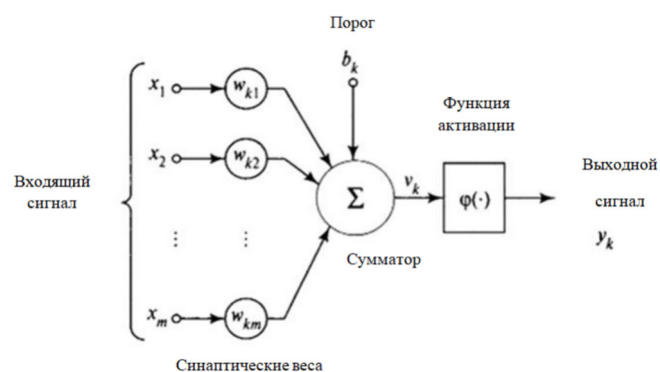
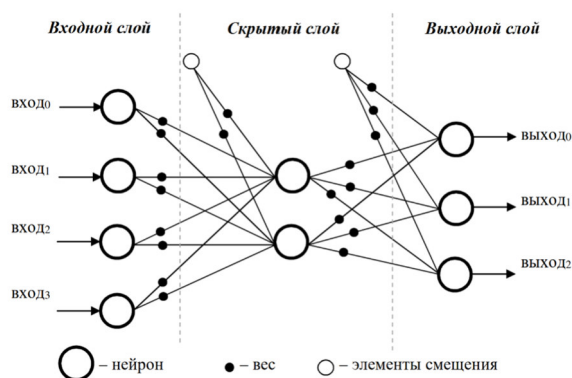


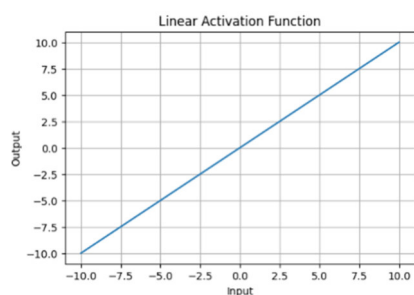
Рисунок 13 – Базовая архитектура типовой НС

Рисунок 14 – Нелинейная модель нейрона

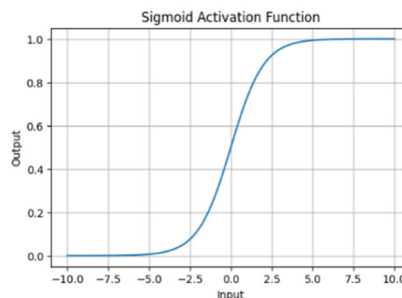
Типовая НС состоит из трёх слоев – входного, скрытого и выходного [10, 25]. На входной слой поступает информация от внешних и источников, на скрытом слое происходит её анализ и преобразование, выходной слой формирует обработанные данные в требуемом конечном виде (Рисунок 13). Каждый узел НС представляет собой реагирующий на входные данные искусственный нейрон

(Рисунок 14), включающий синаптический вес, сумматор, функцию активации (ФА), генерирующие выходной сигнал. ФА представляет собой математическую функцию, применяемую к выходному сигналу нейрона, вносящую нелинейность в модель, позволяя НС изучать и аналитически строить сложные закономерности в данных. ФА решает, следует ли активировать нейрон, вычисляя взвешенную сумму входных данных и добавляя член смещения, что помогает модели принимать сложные решения и предсказания, внося нелинейности в выходные данные каждого нейрона, без которых НС вела бы себя как модель линейной регрессии, независимо от числа входящих слоев. ФА определяет выходное значение нейрона анализируя результат взвешенной суммы входов и порогового значения, представляя результат в определенном диапазоне данных.

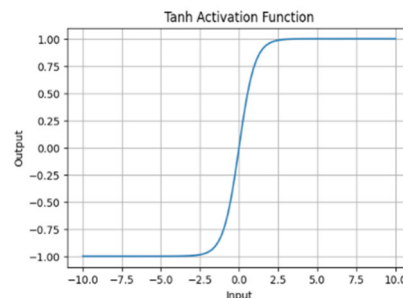
а) линейная



б) сигмоидальная

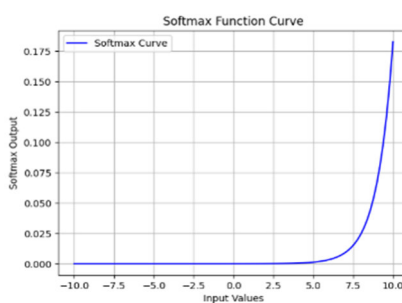


в) гиперболическая



д) нормализованная

экспоненциальная



е) аналитическая

кусочно-линейная

г) кусочно-линейная

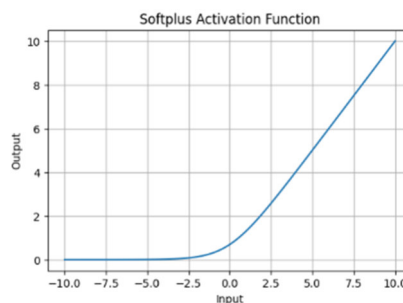
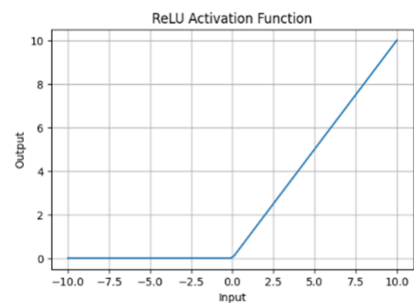


Рисунок 15 – Основные функции активации, используемая в нейронах НС [2]

Выбор ФА зависит от решаемой НС задачи (Рисунок 15). Функция линейной активации напоминает прямую линию, определяющую прямую пропорциональность входящего и выходящего сигналов. Функция используется только на

выходном слое. Независимо от числа слоев НС при использовании функции линейной активации на выходе получается линейная комбинация входных данных. Использование линейной активации на всех уровнях ограничивает способность сети к саморазвитию, линейные функции активации полезны для быстрого решения отдельных задач, но должны сочетаться с нелинейными для расширения возможностей НС в обучении и прогнозировании. Сигмоидальная ФА обеспечивает плавный и непрерывный вывод, что важно для решения задач оптимизации градиентными методами, позволяя НС обрабатывать и моделировать сложные шаблоны, недоступные линейным уравнениям. Выходные данные находятся в диапазоне от 0 до 1, удобном для двоичной классификации. Сигмоидальная ФА обладает высокой чувствительностью – при небольших изменениях во входных данных это может вызвать значительные изменения в выходных, что имеет решающее значение в процессе обучения НС. Гиперболическая ФА (гиперболического тангенса), представляет собой смещенную версию сигмоидальной ФА, позволяющую ей растягиваться по оси ординат, моделируя сложные структуры данных. ФА обычно используется в скрытых слоях из-за его вывода с нулевым центром, что облегчает изучение последующих слоев. Кусочно-линейная ФА (ReLU) возвращает входной сигнал при его положительном значении и 0 при отрицательном, выводя только неотрицательные значения. Это нелинейная функция активации, позволяющая нейронным сетям изучать сложные шаблоны и повышающая эффективность обратного распространения, используемого в скрытых слоях для ускорения обучения, помогая избежать исчезающих градиентов. В отличие от других ФА ReLU требует меньших ресурсозатрат, поскольку включает более простые математические операции, в которых одновременно активируется только несколько нейронов, что делает НС разреженной, простой и эффективной как для вычислений так и при глубоком обучении. Нормализованная экспоненциальная ФА (Softmax) – нелинейная функция, предназначенная для решения задач многоклассовой классификации. Она преобразует исходные баллы нейронной сети в вероятности путем сжатия выходных значений каждого класса в диапазоне от 0 до 1, гарантируя при этом, что сумма всех вероятностей равна

1. Каждому классу присваивается определенная вероятность, определяющая, к какому классу принадлежат входные данные. Аналитическая кусочно-линейная ФА (Softplus) возвращает положительный и дифференцируемый во всех точках результат, что является преимуществом по сравнению с ее кусочно-линейной версией ReLU. ФА плавная и непрерывная, позволяющая избежать резких разрывов, свойственных ReLU, которые могут приводить к проблемам поиска глобального экстремума в задачах оптимизации.

Устоялись общие следующие правила выбора ФА [11], рациональных для решения задач, родственных задачам СТЭ: для классификации используется ФА Softmax, для регрессии — ReLU, для моделей глубокого обучения — ReLU для скрытых слоев с целью ускорения обучения, для обработка серии событий во времени (рекуррентных нейронных сетей) рациональна гиперболическая ФА. В процессе проектирования НС используется комбинация ФА, вычисление идет по нескольким путям и приводит к получению единого результата, при этом каждый из слоев НС играет отведенную роль: входной слой формирует массив исходных данных, скрытый слой осуществляет обработку исходных данных по установленным правилам, выходной — обеспечивает формирование итогового решения. Выходное значение формируется в рамках сформированной архитектуры для каждого нейрона НС путем установки определенного правила, использующего входные данные, комбинирование которых осуществляется отдельно для каждого нейрона и предусматривает проведение вычислений суммированного значения взвешенных связей [103]. Таким образом, каждый входной нейрон дополнительно имеет свой синаптический вес, являющийся ключевым элементом НС, отражающим относительную важность входных данных нейрона, и определяющим возможность для стимуляции [10]. Умножение весовых коэффициентов на входные данные сигналов и их суммирование формирует комбинированный выходной сигнал нейрона. Способ присвоения нейронам весовых коэффициентов зависит от характера НС. Для статической НС присвоение весовых коэффициентов осуществляется одновременно при построении архитектуры

нейросети, а для динамической – производится в процессе обучения и существенно зависит от условий внешней среды.

Ключевой задачей информационного обеспечения СТЭ, эффективно решаемой НС является классификации изображений фото- и видеопотока – определение категории изображенных объектов и их визуально диагностируемых количественных параметров. Наилучшим инструментом достижения этой цели являются глубокие сверточные нейронные сети (ГСНС) [99], использующие серию слоев свертки и объединения для извлечения объектов из изображений, с их последующей классификацией и оценкой (Рисунок 16). На входной слой ГСНС поступает изображение в виде матрицы пикселей, соответствующей размерности изображения, каждому пикселю которой присваивается значение яркости от 0 до 255 (где 0 – белый, а 255 – черный) для черно-белых изображений и трех матриц, отвечающие за отдельные каналы RGB (красный, зеленый, синий) – для цветных изображений.

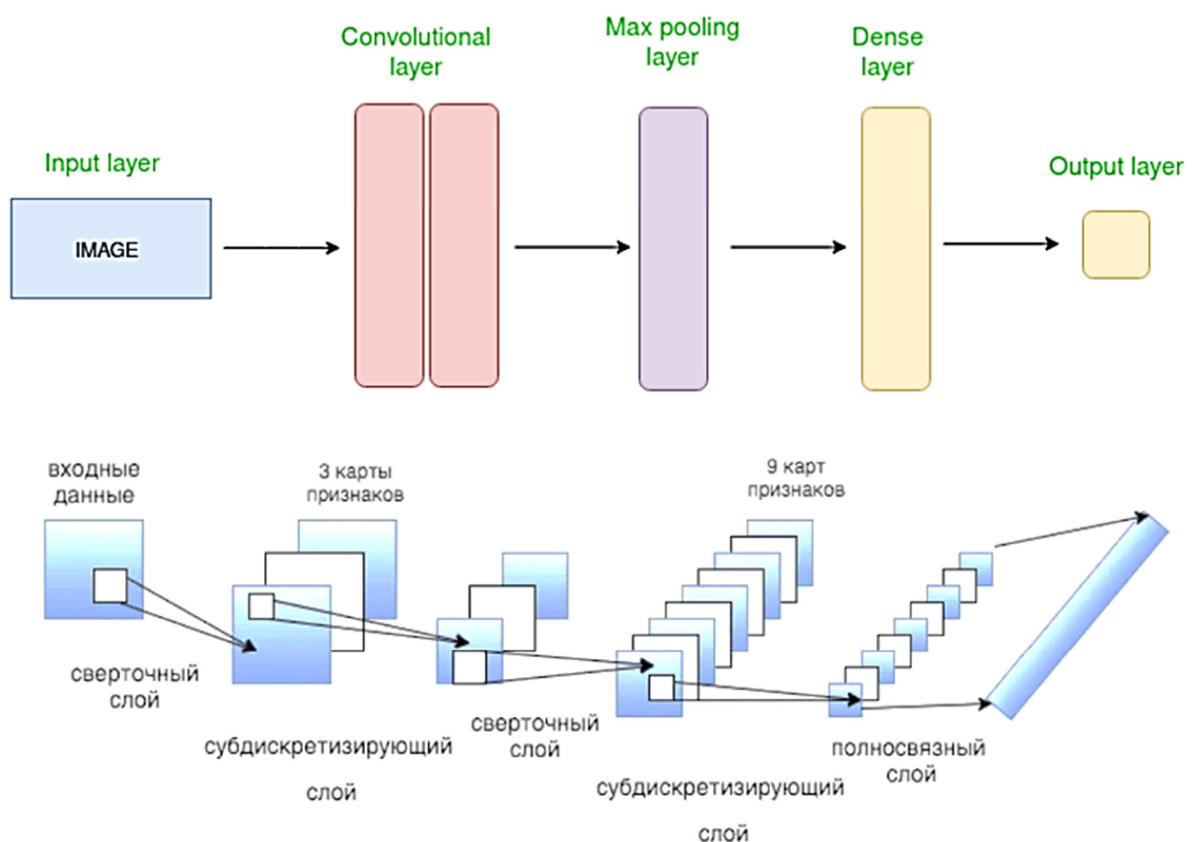


Рисунок 16 – Типовая архитектура ГСНС

Синаптические веса нейронов ГСНС формируются в собственной матрице, а их начальные значения – случайным образом. Суть свертки заключается в умножении ядра фильтра на матрицу исходного изображения со сдвигом на один пиксель по ширине и высоте матрицы. Для цветного изображения в свертке участвуют 3 ядра с последующим суммированием, что позволяет уменьшить размер входных данных и снизить вычислительные затраты. Свернутая матрица в дальнейшем проходит ФА ReLU, где происходит удаление всех отрицательных значения без изменения остальных, при этом получается матрица, называемая картой объектов, демонстрирующая распознанный объект, прогрессируя в процессе обучения от объектов с простейшими признаками, до объектов, содержащих признаки более высокого уровня.

Обучение ГСНС представляет собой задание синаптических весов и структуры нейронных связей [8]. Оно осуществляется как с использованием ручного ввода (веса задаются человеком), так и без (производится автоматизированная классификация выборки путем поиска связей между входными данными до минимизации ошибок) [9]. Таким образом, применение ГСНС для решения основной визуально-аналитической задачи СТЭ — распознавания дефектов и повреждений на материалах фото- и видеофиксации, является перспективным инструментом снижения трудоемкости, повышения качества и обоснованности результатов СТЭ.

2.5 Выводы по главе 2

1. В настоящее время ВО в составе СТЭ осуществляется, преимущественно, классическими методами с использованием ручного труда экспертов. В последние годы происходит трансформация нормативной документации в сфере СТЭ в сторону применения новых методов сбора информации, например, упоминание возможности применения БАС, имеющих широкий спектр навесного оборудования, обработка данных которого с использованием только ручного труда существенно усложняет процесс СТЭ и увеличивает его продолжитель-

ность. Решить ключевую задачу автоматизируемой СТД — потоковую обработку фото- и видеофиксируемой навесным оборудованием БАС информации позволят инструменты на основе НС.

2. ГСНС позволяют с высокой точностью определять дефекты и повреждения на фото- и видеоматериалах, получаемых с использованием навесного оборудования БАС, однако качество распознавания достигается путем обучения с использованием обучающего датасета, размечаемого экспертами вручную. Объем датасета и скорость роста качества при обучении может существенно различаться для различных типов и особенностей детектируемых фрагментов изображений, в связи с чем создание баз обучающих данных позволит широко внедрить применение ГСНС в практику и повысить уровень автоматизации и качество производства СТД.

3. Инструментальной средой документирования, обработки, хранения и актуализации сведений о дефектах и повреждениях становится ИМ ОС, расширяемая параметрическими элементами – цифровыми прототипами результатов СТЭ, в первую очередь установленными, классифицированными и оценёнными дефектами элементов. Работа с потоками данных, поступающих от навесного оборудования БАС, обработчиком и аналитиком которых выступает ГСНС может быть организована полностью в автоматизированном режиме, что позволит значительно улучшить качество производства и достоверность результатов СТЭ как за счет достоверности распознавания дефектов, так и в связи с ростом регулярности оценки состояния ОС.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ПЛОСКИХ РУЛОННЫХ КРОВЕЛЬ

3.1 Состояние функционального соответствия объекта строительства и его элементов

Задачей СТЭ, включающей в свой состав процедуры и алгоритмы СТД является оценка текущего состояния ОС и его элементов. Количественную оценку

состояния ОС традиционно дают с помощью категоризации по техническому состоянию (ТС) и степени физического износа (ФИ) элементов. В то же время нормативная трактовка указанных состояния достаточно обобщена [43, 164], что не позволяет в равной степени универсально использовать эти понятия при характеристике состояния отдельных элементов здания, складывающихся в общую характеристику состояния ОС. Рядом авторов справедливо отмечаются следующие организационно-методические недостатки установленных нормами [68-70] и применяемых при оценке результатов СТЭ систем оценки ТС и ФИ.

1. Субъективность. Большинство методов определения категории ТС и ФИ основаны на визуальном осмотре ОС и субъективных выводах эксперта, квалификация и опыт которого играет существенную роль в формировании выводов заключения [59]. В случае отсутствия классифицированных ранее или установленных неклассифицированных дефектов [51] эксперт вынужден пользоваться альтернативными методами оценки, поскольку адаптировать к этим случаям нормативную методику невозможно [58].

В технической литературе встречаются следующие методы оценки ФИ ОС:

- экспертно-нормативный метод, в рамках которого ФИ оценивается по результатам визуального осмотра СК и последующего соотношения выявленных дефектов и повреждений с их количественными выражениями в нормативных документах [83, 139];

- метод экспертных оценок, основанный на шкале опроса мнений (экспертных оценок) специалистов [110];

- метод расчёта сроков жизни здания (метод хронологического или эффективного возраста), основанный на предположении о том, что что показатели ФИ (эффективный возраст и срок экономической жизни объекта) находятся в определенном соотношении [156];

- метод компенсации затрат, в основе которого лежит величина ФИ, выраженная через соотношение затрат на необходимые РВМ к стоимости объекта [163];

- методы технической диагностики, основанные на проведении СТД с определением суммарного ФИ на основании индивидуально определенного ФИ каждого элемента ОС и стоимости РВМ [47].

Каждый из вышеперечисленных методов допустим к использованию в равной степени, однако результаты оценки одного и того же ОС, полученные по каждому методу в отдельности, могут и будут на практике различаться, что делает затруднительным их адаптацию к использованию цифровых результатов СТЭ, отличительными признаками которых должны быть проверяемость и повторяемость.

2. Ограниченный охват методов. Большинство используемых методов определения ФИ предлагают упрощённые подходы к его оценке, проводимой на основании визуального обследования и прямых измерений параметров выявленных дефектов, игнорируя инженерные расчёты и качественные характеристики материалов [96]. Методика [70] подразумевает использование современных технологий инструментальной СТЭ, однако эти положения скорее декларативны, чем практически полезны. Кроме того, на текущий момент отсутствует нормативно установленная количественная зависимость между величиной физического износа и категорией технического состояния ОС.

3. Отсутствие унифицированной классификации дефектов. Оценка категории ТС ОС нередко проводится по разным показателям и классификационным признакам, что затрудняет сопоставление результатов разных обследований и разработку единых стандартов ТИМ, используемых в управлении ОС на постпостроечных этапах ЖЦ [49]. Представленная в [70] классификация неполная, что вынуждает эксперта использовать описания дефектов терминами иных источников, гибкого инструментария оперативного обновления нормативных классификаторов дефектов не существует. Используемые стандарты и нормы для определения ФИ существенно отстают от современных технологий строительства и инноваций в строительном материаловедении, что, при отсутствии нормативных инструментов обновления, снижает достоверность итоговых выводов эксперта и

общую практическую значимость результатов СТЭ для управления ЖЦ ОС. Принятые в [51] общие категории степени ФИ (0-20%, 21-40%, 41-60%, 61-80%) крайне укрупнены, часто не отражают реальное техническое состояние ОС без значительных допущений. Снижения уровня дискретизации таких количественных оценок значительно упростит анализ состояния ОС, особенно сравнительный, и может быть полезным при детальной оценке состава и объема рациональных РВМ.

4. Отсутствие комплексного подхода. Многие методы рассматривают отдельные элементы ОС изолированно друг от друга, хотя на практике ФИ одних влияет на другие [92, 157]. ФИ ПРК, например, очевидно скажется на ТС стен и покрытия, однако такие взаимосвязи нормативно отсутствуют, единства форматов представления результатов СТЭ для разных элементов, как и инструментальной возможности к их построению нет.

5. Невозможность факторного анализа причин ФИ. Факторы внешней среды, такие как влажность, температура, агрессивная среда, ветровые и снеговые воздействия оказывают значительное влияние на текущую оценку и динамику изменения ФИ ОС, но методы количественно не учитывают эффект воздействий, либо делают это поверхностно, что ведёт к значительным различиям расчётных и фактических состояний [58]. Повреждения, развивающиеся скрытно, например, внутренняя коррозия арматуры или глубокие микротрещины в бетоне, сложно диагностировать стандартными методами, часто критические дефекты проявляются лишь после значительного накопления повреждений [104]. Несмотря на то, что при определении ТС применяются инструментальные методы обследования, позволяющие выявить скрытые дефекты и повреждения, существующие методы оценки ФИ их не учитывают.

6. Трудности с интеграцией информационных потоков. Данные, полученные различными способами при определении ТС и ФИ, сложно объединить в единую моноформатную информационную систему, что осложняет процесс рационализации РВМ, эффективный в управлении ЖЦ иных антропогенных объектов. Технологии информационного моделирования [95, 124, 166] и машинного

обучения пока не связаны с методиками оценки ТС и ФИ, хотя потенциально эффективны и рациональны для автоматизации обработки большого объема данных, получаемых и анализируемых в составе цифровых строительных изысканий.

В этой связи использование категорий ТС и методики оценки ФИ в нормативной постановке, являясь сложившейся практикой производства СТЭ в доцифровую эпоху не вполне соответствует ключевым принципам становления и развития цифрового управления ЖЦ ОС – универсальности, оперативной горизонтальной и вертикальной масштабируемости, основанности на цифровых форматах представления результатов СТЭ и приспособляемости к изменяющейся структуре ИМ ОС.

С целью заложения основ подобного рода универсального подхода к определению и оценке диагностируемых в составе СТЭ параметров состояния элементов ОС предлагается использовать понятие *состояния функционального соответствия* (СФС) ОС, в первом приближении линейно и пропорционально складывающегося из частных оценок СФС отдельных обследуемых в СТЭ элементов зданий, в том числе ПРК. СФС рассматривается как универсальный и обобщенный категорийный контейнер, иерархически структурированный вводимыми в его состав качественно и количественно оцениваемыми эксплуатационными состояниями, относящимися к исследуемому ОС и его элементам. Алгоритм определения СФС строится на однообразии и формализации аналитического определения показателей эксплуатационных состояний на основании цифрового результата СТЭ, открыты для рациональных изменений в процессе управления ЖЦ, формируя свертку оценок эксплуатационных состояний в интегральную оценку СФС оцениваемого ОС и его элементов.

Для использования в СТЭ ПРК предлагается рассматривать СФС как интегральное состояние, обобщающее количественные оценки следующих частных эксплуатационных состояний ПРК: герметичность, долговечность, ремонтпригодность, работоспособность. Под герметичностью ПРК подразумевается экс-

платационное состояние, обеспеченное способностью препятствовать проникновению влаги, ветра и других внешних воздействий внутрь ОС. Рядом авторов указывается, что существенное влияние на герметичность ПРК оказывают трещины [98], разрывы и отрывы рулонного ковра от вертикальных поверхностей [100]. Нарушение герметичности ПРК приводит к повреждению нижележащих элементов (плит перекрытия и покрытия, балок, стен, колонн) а также элементов внутренней отделки. Под долговечностью ПРК подразумевается эксплуатационное состояние, обеспеченное способностью определённое время нормально функционировать при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Рядом авторов указывается, что основным фактором, ускоряющим процессы старения рулонных битумных материалов является УФ-облучение, жидкие активные средства [105] и циклические температурно-влажностные воздействия [85, 93, 171]. Под ремонтпригодностью ПРК подразумевается эксплуатационное состояние, обеспеченное способностью к поддержанию и восстановлению нормального функционирования проведением РВМ. Рядом авторов указывается, что ремонтпригодность ПРК существенно зависит от вида и качества примененных при строительстве материалов, климатических условий эксплуатации, качества и периодичности технического обслуживания [86, 163, 168]. Под работоспособностью ПРК подразумевается эксплуатационное состояние, обеспеченное способностью заданное время функционировать с параметрами, установленными нормативно-технической и проектной документацией. Рядом авторов указывается на приоритетность работоспособности в целом над прочими эксплуатационными состояниями [47, 165], что следует принимать во внимание при операционном ранжировании состояний по степени влияния на СФС в разрабатываемых методиках адаптации инструментов оценки СФС к реальным условиям производства СТЭ.

Интегральную оценку СФС предлагается строить на основании частных оценок входящих в СФС функциональных состояний (в иерархической классификации ИМ обозначаемых MnP), определяемых на основании диагностируе-

мых параметров каждого из i классифицированных и каталогизированных дефектов элемента ОС, в отношении которого устанавливается текущая содержательная трактовка СФС [84].

В процессе АСТД ПРК каждый из дефектов $.../Def_i$ диагностируется и оценивается по $j=1...m$ параметрам:

– $.../Par_1$ – площадь, занимаемая дефектом в горизонтальной проекции на плоскость ПРК, %;

– $.../Par_2$ – объем, занимаемый дефектом от уровня окрестности, очерчиваемой площадью, до максимальной точки по высоте дефекта, %;

– $.../Par_3$ – стадия развития дефекта: 1 – зарождающийся дефект; 2 – зрелый дефект; 3 – критически деструктивный дефект;

– $.../Par_4$ – степень воздействия дефекта по глубине ПРК: 1 – слои А-В; 2 – слои А-Д; 3 – слои А-І.

Действия с массивом оценок параметров (принять или отвергнуть оценку) для каждого дефекта назначаются параметрической маской $.../Def_i/M[j]$ (Таблица 9), конструирующей индивидуальную выборку параметров по каждому из исследуемых дефектов в соответствии с задачами АСТД.

Таблица 9 – Параметрическая маска дефектов ПРК, диагностируемых в АСТД

Дефект	$.../Def_i/M[j]$				Дефект	$.../Def_i/M[j]$			
	Par 1	Par 2	Par 3	Par 4		Par 1	Par 2	Par 3	Par 4
$.../Def_1$	1	0	1	1	$.../Def_8$	0	1	1	1
$.../Def_2$	1	0	0	0	$.../Def_9$	0	1	1	1
$.../Def_3$	1	0	0	1	$.../Def_10$	1	0	1	1
$.../Def_4$	1	0	1	1	$.../Def_11$	1	0	1	0
$.../Def_5$	1	0	0	1	$.../Def_12$	0	0	1	0
$.../Def_6$	1	0	1	0	$.../Def_13$	0	0	1	0
$.../Def_7$	1	0	1	0	$.../Def_14$	1	0	1	0

Ранжирование классифицированных дефектов по степени влияния на СФС осуществляется группой привлеченных отраслевых экспертов методом анализа иерархий исходя из опыта оценки характера развития дефектов и повреждений. Результат нормализованного ранжирования дефектов по эксплуатационным со-

стояниям (герметичность, долговечность, ремонтпригодность, работоспособность) позволяет количественно связать интегральную оценку СФС с частными оценками дефектов по каждому из .../MnP_s (Рисунок 17).

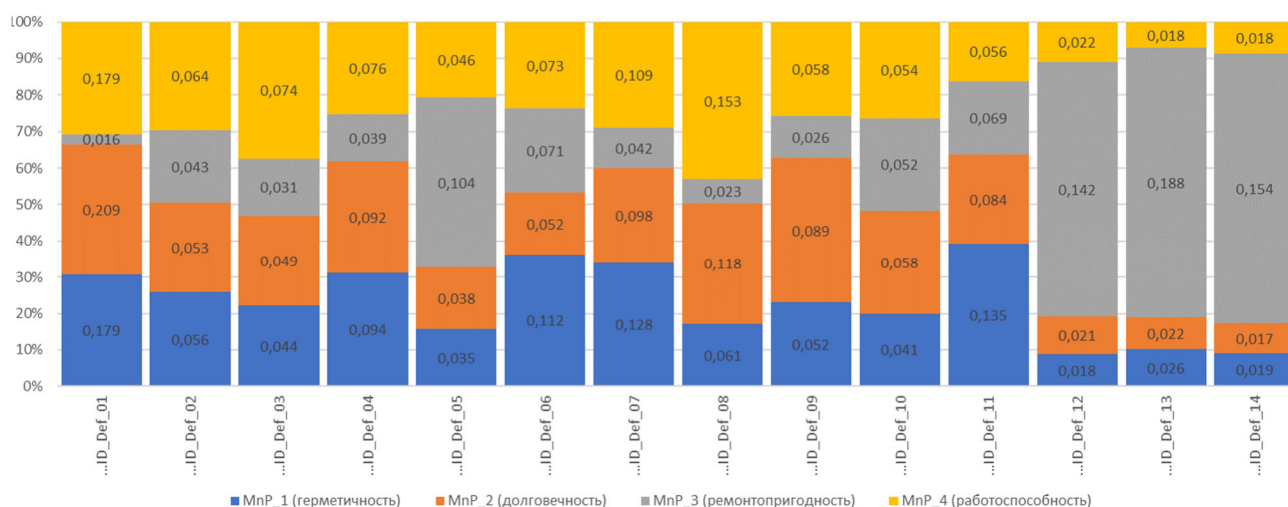


Рисунок 17 – Нормализованное ранжирование классифицированных дефектов ПРК .../Def_i по эксплуатационным состояниям .../MnP_s

3.2 Количественная оценка состояния функционального соответствия плоской рулонной кровли проведением автоматизированной дефектоскопии

Формализация предлагаемой диагностики СФС ПРК рациональна на оценке текущих эксплуатационных состояний ПРК .../MnP_s ($s = 1 \dots r$) на каждом из k ($k = 1 \dots m$) участков ПРК, составляющих $a[z]$ площади ПРК (%). Оценка производится диагностикой и количественной оценкой дефектов .../Def_i по эксплуатационным параметрам .../Def_i/Par_j, определяемой в текущее время ЖЦ (время производства АСТД $t = 0 \dots \text{ЖЦ}$) по установленной процентной шкале .../Def_i/Par_j/MnP_s/Point[t] (этап 1). С использованием устанавливаемых экспертно и варьируемых в дальнейшем по опыту принимающего решения лица параметрической маски (отклика на оценку) $M[j]$, параметров дефекта .../Par_j, удельных весов $\gamma[s][i]$ классифицированных дефектов .../Def_i (этап 2), удельных весов $\delta[s]$ эксплуатационных состояний .../MnP_s (этап 3), осуществляется свертка полученных частных оценок эксплуатационных состояний в интегральную оценку СФС ПРК:

$$\text{СФС} = \delta[s] \sum_{s=1}^k a[z] \sum_{z=1}^w \gamma[s][i] \sum_{i=1}^l M[j] \sum_{j=1}^f \dots/\text{MnP}_s/\text{Def}_i/\text{Par}_j/\text{Point}[t], \quad (1)$$

где $\dots/\text{MnP}_s$ — эксплуатационные состояния ($s = 1 \dots k$), на которые декомпозируется оцениваемое СФС ПРК;

$\delta[s]$ — удельные веса (значимости) эксплуатационных состояний $\dots/\text{MnP}_s$ в общей оценке СФС ПРК (назначаются экспертно, $\delta[s] = 0 \dots 100\%$);

z — участок ПРК, на котором осуществляются частные оценки MnP_s в составе СФС ($z = 1 \dots w$);

$a[z]$ — удельный вес участка z в общем объеме ПРК, определяемый на основании координат центра участка в локальной системе координат и площади $n[x_z][y_z][A_z]$;

$\dots/\text{Def}_i$ — дефект ПРК ($i = 1 \dots f$), оцениваемый количественно во влиянии на СФС;

$\dots/\text{Par}_j$ — количественный/качественный параметр дефекта ПРК ($j = 1 \dots v$);

$\dots/\text{Point}[t]$ — автоматизировано осуществляемые оценки влияния дефектов $\dots/\text{Def}_i$ по параметрам $\dots/\text{Par}_j$ на СФС, $0 \dots 100\%$;

$\gamma[s][i]$ — удельные веса (значимости) классифицированных дефектов $\dots/\text{Def}_i$ во влиянии на $\dots/\text{MnP}_s$ в общей оценке СФС (назначаются экспертно, $\gamma[s][i] = 0 \dots 100\%$);

$M[j]$ — параметрическая маска (отклик на оценку j -го параметра i -го дефекта, $M[j] = 0/1$).

Таким образом, общий алгоритм оценки СФС ПРК инструментами АСТД (Рисунок 18) включает этапы частных оценок влияния на эксплуатационные состояния классифицированных дефектов, интеграцию частных оценок в общую оценку СФС и интеграцию СФС по участкам ПРК в СФС ПРК в целом. Последний показатель может использоваться как единый информирующий показатель текущего состояния ПРК в системах операционного мониторинга и критерий

сравнительного ранжирования ОС, элементов, вариантов производства РВМ, при необходимости рационализации лимитированных затрат, запланированных для технического обслуживания на этапах ЖЦ ОС.

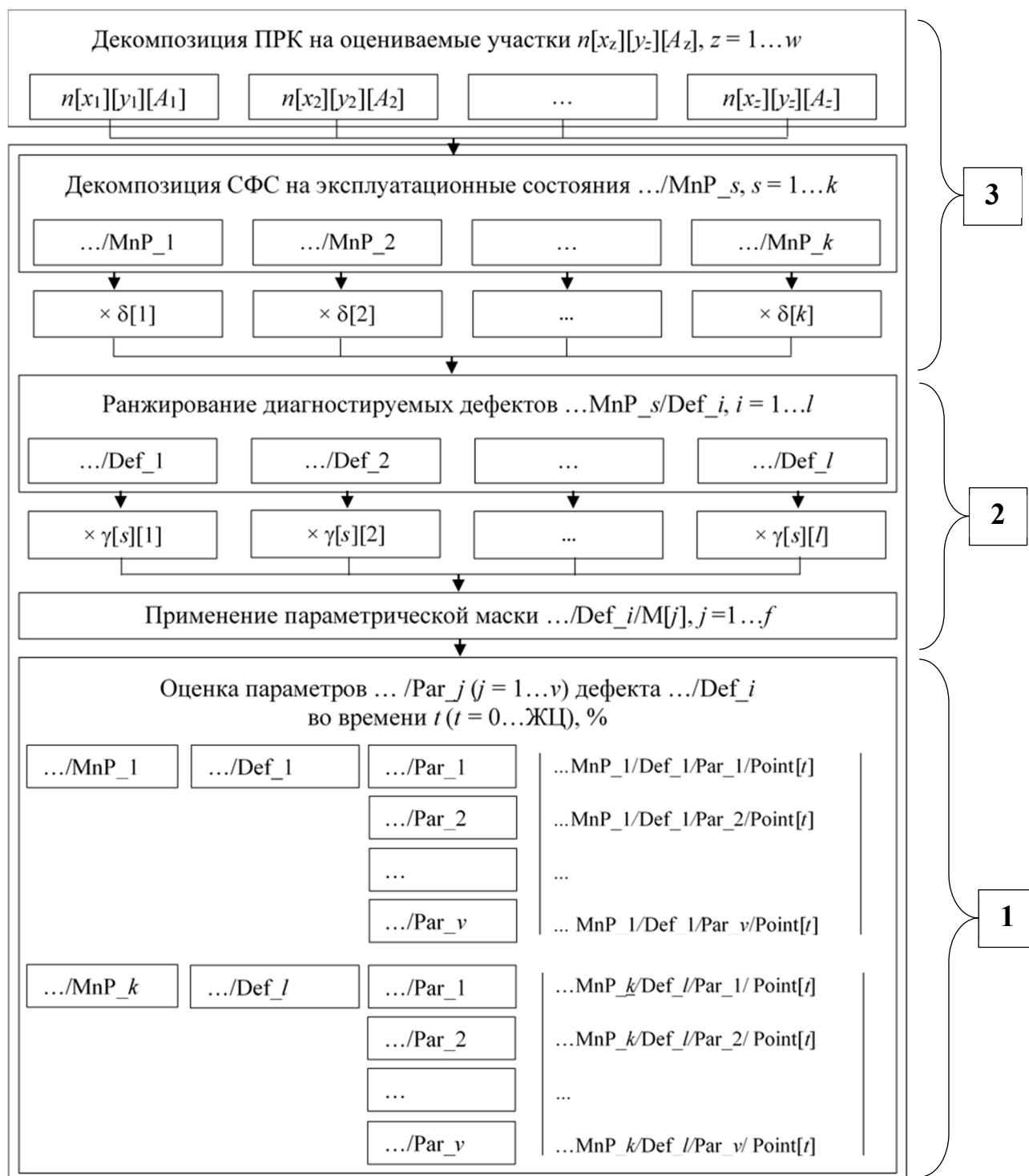


Рисунок 18 – Общий алгоритм оценки СФС ПРК инструментами АСТД
(обозначения см. ф. (1))

Алгоритм определения СФС ПРК инструментами АСТД (1) апробирован для следующих условий проведения: $k=4$ (число эксплуатационных состояний .../MnP_s декомпозиции СФС); $l=14$ (число диагностируемых дефектов .../Def_i), $v=4$ (число диагностических параметров дефектов .../Par_j). Поверхность ПРК в зависимости от очертаний ОС в плане декомпозируется на необходимое для целей СТЭ и зависящее от профиля ПРК количество близких по площади участков, в связи с чем удельные веса $a[z]$ участков могут быть приняты равными. Для каждого из классифицированных дефектов .../Def_i определяются частные оценки .../MnP_s по параметрам .../Par_j с дискретизацией в 1% для количественно (.../Par_1, .../Par_2) и 33% для качественно (.../Par_3, .../Par_4) оцениваемых параметров, что связано с практически достигаемой инструментальной точностью и принятой шкалой оценки параметров.

Управление ЖЦ ОС основывается на инструментах прогнозирования СФС элемента и потенциально всего ОС по собранной ранее информации о его текущей и прогнозируемой дефектности. Прогнозирование, являясь основой выбора рациональных управленческих решений на ЖЦ ОС осуществляется аналитической идеализацией динамики изменения СФС, констатированной на определенном интервале исходных данных и экстраполяцией на прогнозируемый горизонт СФС, оцениваемый в 12 месяцев. Произведенная на этапе набора исходных данных оценка СФС, сформированная частными оценками .../MnP_s во времени $t = 0 \dots \text{ЖЦ}$ позволяет осуществить прогнозирование развития дефектов (частных оценок влияния дефектов .../Def_i по параметрам .../Par_j на СФС) квадратными полиномами вида (Рисунок 19):

$$\dots/\text{MnP}_s/\text{Def}_i/\text{Par}_j/\text{Point}[t] = A[1]t^2 + A[2]t, \quad (2)$$

где t — дата производства АСТД (в т.ч. дата прогнозирования);

A — константы, определяющие скорость прогнозируемых изменений ($A = [0; 1]$ — линейная, $A = [1; 0]$ — ускоряющаяся, $A = [-1; 2]$ — замедляющаяся).

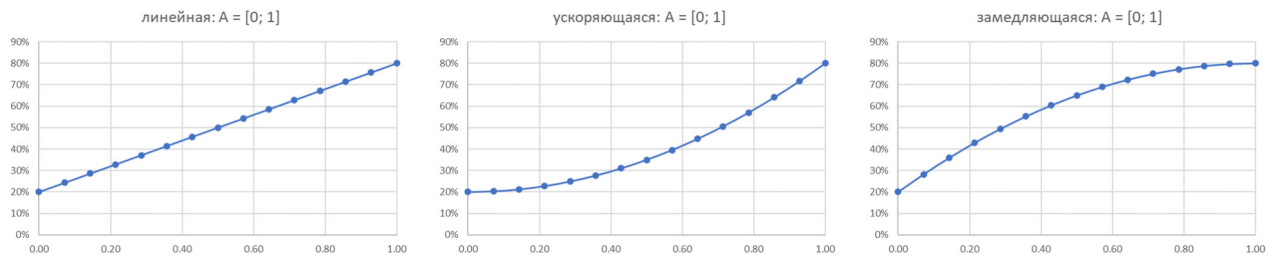


Рисунок 19 – Квадратные полиномы, используемые для прогнозирования состояния дефектов экстраполяцией

Допускается как гладкая, так и кусочно-гладкая интерполяция, при которой характер динамики (2) меняется для одного и того же дефекта во времени ЖЦ, при этом константы A и характер зависимости выбираются на основании усреднении нескольких предшествующих динамик. Авторские исследования показывают, что принципиального в пределах практической точности значения разницы в гладкой и кусочно-гладкой интерполяциях не имеет, поскольку изменение состояния дефектов ПРК на горизонте планирования 1-2 года протекают в динамике, близкой к линейной, а резкое нарастание ухудшения состояния удастся предотвращать своевременными РВМ, что и является конечной целью создания методики управленческого советования на основании представленных алгоритмов. В это связи здесь и используется единая охватывающая этап набора данных до 12 месяцев и экстраполирующая на горизонт до 12 месяцев динамика, выбираемая одним из полиномов (2), константы которого обеспечиваются лучшим МНК соответствием интерполируемым данным ($R^2 > 0,9$).

3.3 Совершенствование инструментов экспертного оценивания

При управлении ЖЦ ОС мониторингом и управлением СФС ПРК возникает необходимость в приведении частных оценок эксплуатационных состояний по дефектам и участкам ПРК к интегральной СФС, включаемой в состав критериев отнесения состояния ОС и его элементов к требующим управленческого вмешательства. Интегральная (прогнозируемая) оценка СФС используется и при сравнительном анализе эффективности возможных вариантов РВМ в случаях, когда альтернативные технические решения допустимы и задачей управления

ЖЦ является выбор наилучшего из них по организационно-экономическим показателям.

С учетом существенного отличия дефектов ПРК по используемым технологиям инструментальной оценки и аналитической интерпретации предлагается для свертки частных оценок в общую использовать метод анализа иерархий (МАИ, АНР), традиционно используемый в инженерной практике для количественного сравнения технических и управленческих альтернатив в условиях поликритериальной вариативности [68].

При поликритериальной оценке управленческих альтернатив в МАИ используется шкала сравнительной важности переменной балльности, динамически устанавливаемой в соответствии с ощущаемым экспертом диапазоном качественных состояний дефектов ПРК, определяемых инструментальными исследованиями и визуальными признаками. Сами дефекты оцениваются по каждому из выбранных показателей оценки организацией формализованного попарного сравнения в матричном поле размерностью, равной количеству учитываемых дефектов.

Традиционно, в методе анализа иерархий используется 9-балльная шкала сравнительной значимости, предложенная автором метода Т. Саати [138], количественно интерпретирующая психологические особенности качественного восприятия сравниваемых величин принимающим решение лицом, установленные законом Вебера-Фехнера [111]. В большинстве процедур инженерной квалиметрии пороговая чувствительность восприятия экспертом качества сравниваемых процессов и явлений составляет не более 10%, что соответствует, в целом, девятибалльной (полной) шкале сравнительной значимости. В то же время пороговая чувствительность в большинстве реальных практических случаев СТЭ существенно меньше оценочных диапазонов, установленных как в нормативных методиках оценки дефектов, так и регламентами процедур визуального обследования. Существенный потенциал упрощения и ускорения процедур экспертного оценивания за счет снижения требуемой остроты восприятия качества дефекта совершенствованными инструментальными методами до сих пор не находит

должного отражения ни в практике, ни в проектах перспективных методик анализа результатов СТЭ.

Рациональная шкала оценки сравнительной значимости в СТЭ, таким образом, ограничивается положениями нормативных методик, практически достижимой точностью существующих методов обследования и регламентами эксплуатации аппаратно-программного обеспечения СТЭ. Возникает необходимость в исследовании и количественной оценке рациональности использования шкал оценок высокой балльности, технически сколь угодно точно реализуемых аппаратно-программными инструментами, но практически невостребованными на практике ни при обработке результатов изысканий, ни при построении прогнозных моделей по результатам СТЭ.

a

шкала 3	альт1	альт2	альт3	альт4	альт5	альт6	альт7	альт8	альт9	альт10	альт11	альт12	альт13	альт14	альт15	альт16	альт17	альт18	альт19	альт20	Среднее
альт1	1,000	0,333	1,000	1,000	0,333	3,000	3,000	0,500	0,500	2,000	2,000	0,333	1,000	2,000	0,333	0,333	3,000	0,333	1,000	3,000	0,190
альт2	3,000	1,000	0,500	0,333	2,000	3,000	1,000	3,000	0,333	0,500	3,000	0,500	2,000	2,000	0,333	1,000	2,000	2,000	0,333	0,500	0,224
альт3	1,000	2,000	1,000	3,000	1,000	0,500	2,000	0,500	1,000	3,000	2,000	0,500	0,500	0,333	0,333	0,333	3,000	0,500	1,000	1,000	0,349
альт4	1,000	3,000	0,333	1,000	2,000	0,333	0,500	3,000	3,000	0,500	0,333	2,000	0,500	3,000	2,000	1,000	0,500	0,500	0,500	0,500	<
альт5	3,000	0,500	1,000	0,500	1,000	1,000	0,500	0,500	0,333	0,500	0,500	0,500	1,000	1,000	3,000	3,000	2,000	3,000	1,000	0,333	0,256
альт6	0,333	0,333	2,000	3,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,333	1,000	1,000	2,000	0,500	1,000	0,333	3,000	1,000	2,000	1,000	0,500	0,344
альт7	0,333	1,000	0,500	2,000	2,000	1,000	1,000	3,000	2,000	2,000	2,000	1,000	3,000	2,000	2,000	3,000	2,000	0,333	2,000	1,000	0,191
альт8	2,000	0,333	2,000	0,333	2,000	1,000	0,333	1,000	2,000	0,333	1,000	2,000	3,000	0,500	0,500	1,000	3,000	0,333	0,500	1,000	0,289
альт9	2,000	3,000	1,000	0,333	3,000	3,000	0,500	0,500	1,000	2,000	0,500	0,333	0,333	0,333	0,500	0,500	2,000	1,000	0,500	0,500	0,306
альт10	0,500	2,000	0,333	2,000	2,000	1,000	0,500	3,000	0,500	1,000	0,333	0,333	3,000	0,500	0,500	2,000	3,000	0,500	2,000	0,333	0,223
альт11	0,500	0,333	0,500	3,000	2,000	1,000	0,500	1,000	2,000	3,000	1,000	1,000	0,500	0,333	0,333	0,500	0,500	3,000	0,333	2,000	0,219
альт12	3,000	2,000	2,000	0,500	2,000	0,500	1,000	0,500	3,000	3,000	1,000	1,000	2,000	3,000	0,500	0,500	0,500	1,000	1,000	3,000	0,404
альт13	1,000	0,500	2,000	2,000	1,000	2,000	0,333	0,333	3,000	0,333	2,000	0,500	1,000	0,333	1,000	0,500	2,000	0,333	2,000	1,000	0,332
альт14	0,500	0,500	3,000	2,000	1,000	1,000	0,500	2,000	3,000	2,000	3,000	0,333	3,000	1,000	0,333	0,333	3,000	0,500	0,500	2,000	0,399
альт15	3,000	3,000	3,000	0,333	0,333	3,000	0,500	2,000	2,000	2,000	3,000	2,000	1,000	3,000	1,000	2,000	2,000	3,000	1,000	0,333	0,524
альт16	3,000	1,000	3,000	0,500	0,333	0,333	0,333	1,000	2,000	0,500	2,000	2,000	2,000	3,000	0,500	1,000	2,000	0,333	1,000	2,000	0,453
альт17	0,333	0,500	0,333	1,000	0,500	1,000	0,500	0,333	0,500	0,333	2,000	2,000	0,500	0,333	0,500	0,500	1,000	2,000	3,000	2,000	0,110
альт18	3,000	0,500	2,000	2,000	0,333	0,500	3,000	3,000	1,000	2,000	0,333	1,000	3,000	2,000	0,333	3,000	0,500	1,000	0,333	1,000	0,415
альт19	1,000	3,000	1,000	2,000	1,000	1,000	0,500	2,000	2,000	0,500	3,000	1,000	0,500	2,000	1,000	1,000	0,333	3,000	1,000	0,500	0,342
альт20	0,333	2,000	1,000	2,000	3,000	2,000	1,000	1,000	2,000	3,000	0,500	0,333	1,000	0,500	3,000	0,500	0,500	1,000	2,000	1,000	0,275
А																					
	6,000	6,333	2,833	5,333	5,333	6,833	6,500	7,000	4,833	6,000	7,333	3,333	4,000	4,833	4,000	3,667	9,000	3,333	2,833	5,000	

б

Размер матрицы (MS) = 04
Шкала оценок = 3
Свободный вектор (λ) = 4,810
Индекс согласованности (CI) = 0,270
Индекс случайной согласованности (CIR) = 0,924
Показатель согласованности (CR) = 29%

в

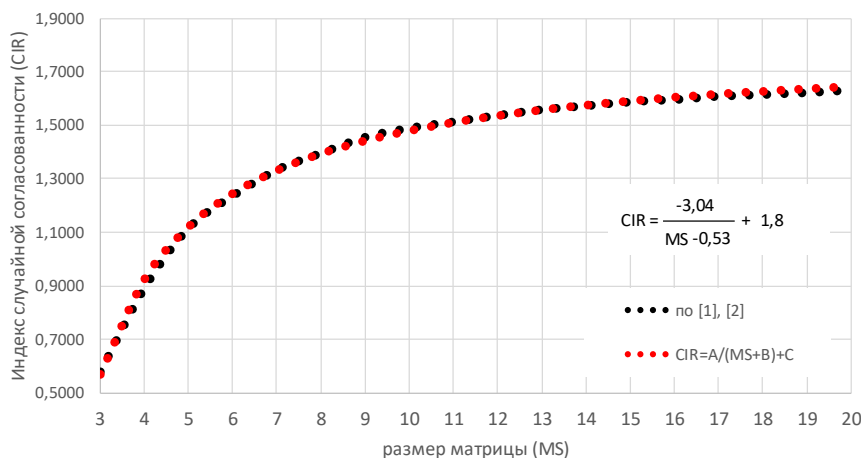
Размер		4
Оценка		3
Погрешность		26%
Код	04/3	29%
им1	04/3	9%
им2	04/3	24%
им3	04/3	16%
им4	04/3	28%
им5	04/3	11%

г

3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000
2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000
1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000
0,500	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000
0,333	0,500	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000
	0,333	0,500	1,000	2,000	3,000	4,000
	0,250	0,333	0,500	1,000	2,000	3,000
		0,250	0,333	0,500	1,000	2,000
		0,200	0,250	0,333	0,500	1,000
			0,200	0,250	0,333	0,500
			0,167	0,200	0,250	0,333
				0,167	0,200	0,250
				0,143	0,167	0,200
					0,143	0,167
					0,125	0,143
						0,125
						0,111

Рисунок 20 – Экспериментальное пространство анализа погрешности оценки согласованности парных суждений МАИ методом случайной согласованности: *a* – матричное поле $MS 4 \times 4 \dots 20 \times 20$; *б* — варьируемые факторы эксперимента; *в* — поле имитационного моделирования частных оценок на 1000 итераций (фрагмент); *г* — поле варьируемых шкал попарных оценок в 3...9 баллов

Метод случайной согласованности оценок по показателю *CI* (*Consistency Index*), повсеместно реализуемый для верификации результатов МАИ, состоит в оценке количественных характеристик качества согласованности суждений в матрице попарных сравнений, искусственно смоделированной случайным образом, и сопоставлении полученного результата с той же мерой достоверности, полученной на матрицах фактически проведённых экспертных оценок [33]. С целью количественной характеристики влияния используемой балльности шкалы на результаты оценки качества даваемых МАИ результатов, основанных на согласованности сделанных принимающим решение лицом попарных сравнительных оценок, методом случайной согласованности выполнены математическое моделирование и численные исследования погрешности оценки согласованности в матричном поле размером *MS* (*Matrix Size*) $4 \times 4 \dots 20 \times 20$, с варьируемой балльностью шкалы попарных оценок в $3 \dots 9$ баллов, с использованием имитационного моделирования частных оценок глубиной в 1000 итераций в табличном процессоре MS Excel (Рисунок 20).



MS	CIR [6]	CIR _{эксп}	Δ, %
3	0,5799	0,56923	1,9%
4	0,8921	0,92392	3,4%
5	1,1159	1,11991	0,4%
6	1,2358	1,24424	0,7%
7	1,3322	1,33014	0,2%
8	1,3952	1,39304	0,2%
9	1,4537	1,44109	0,9%
10	1,4882	1,47899	0,6%
11	1,5117	1,50965	0,1%
12	1,5356	1,53496	0,0%
13	1,5571	1,55621	0,1%
14	1,5714	1,57431	0,2%
15	1,5861	1,58991	0,2%
16	1,5943	1,60349	0,6%
17	1,6064	1,61542	0,6%
18	1,6133	1,62599	0,8%
19	1,6207	1,63541	0,9%
20	1,6292	1,64386	0,9%

Рисунок 21 – Интерполяция степенной функцией зависимости случайной согласованности суждений *CIR* [138] от размера матрицы попарных оценок *MS*

Мера случайной согласованности суждений *CIR* (*Consistency Index Randomized*), учитываемая составленной моделью, дана автором МАИ в табличной форме [138], что затрудняет её формализацию для замкнутого аналитического решения задачи. С этой предложено описание зависимости *CIR* от *MS* степенной

функцией вида $CIR = \frac{A}{MS \times B} + C$ ($A, B, C = \text{const}$), для которой выполнена интерполяция табличных значений, продемонстрировавшая сходимость с точностью менее 1%, заведомо превышающую практически необходимую (Рисунок 21). Используемая аналитическая зависимость применялась в экспериментальном пространстве для анализа погрешности оценки согласованности (ПОС) парных суждений МАИ по показателю CI в установленном диапазоне размера матрицы и балльности шкалы. Анализировались оценки согласованности CR (*Consistency Rate*), определяемые отношением CI/CIR , рекомендуемой для практически согласованных суждений величиной до 10%. Установленные зависимости размера ПОС парных суждений оценивались как среднераспределенные ложные оценки приемлемой согласованности в объеме 1000 матриц, сформированных по каждому из размеров матрицы и баллов шкалы случайным образом с заведомой несогласованностью. Распределение погрешности по размерам матрицы и баллам оценки носят выраженный нелинейно убывающий характер (Рисунок 22), позволяющий сделать количественные рекомендации к совершенствованию методики экспертного оценивания в СТЭ.

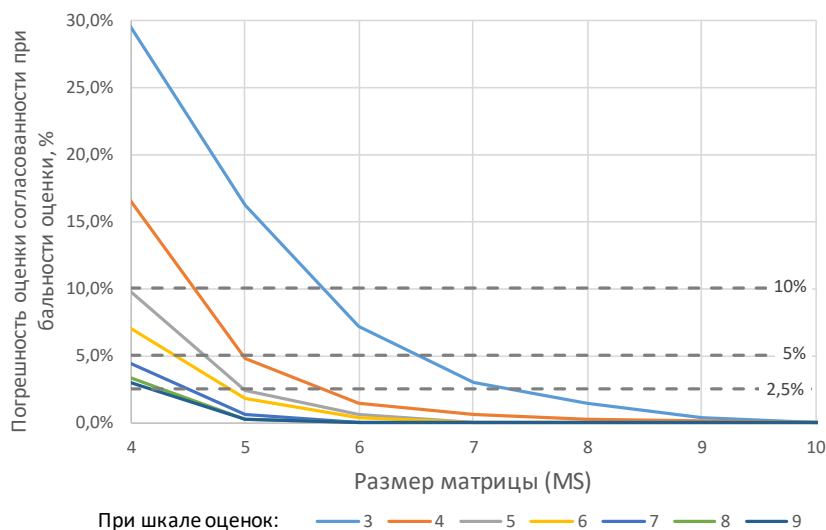


Рисунок 22 – ПОС парных суждений МАИ методом случайной согласованности для MS $4 \times 4 \dots 10 \times 10$ и 3...9-балльных шкал оценки

Проведенные исследования позволили дать следующие рекомендации к использованию МАИ при приемлемом уровне ПОС до 5%:

- для матриц малых размерностей (4×4 , 5×5) приемлемый уровень ПОС достигается при использовании 5-балльной шкалы;

- для матриц средних размерностей (до 7×7 включительно) приемлемый уровень ПОС достигается при использовании 4-балльной шкалы;
- для матриц высоких размерностей (8×8 и более) балльность шкалы не влияет на уровень ПОС;
- от использования матриц 3×3 следует, по возможности, отказываться, поскольку ни одна из систем $3 \dots 9$ баллов не дает приемлемого уровня ПОС.

Нелинейная динамика прироста погрешности на каждый балл упрощения шкалы позволяет определить целесообразную балльность 5 при приемлемом уровне ПОС до 10%. Таким образом организационно-математические сложности использования в СТЭ МАИ в классической постановке могут быть устранены использованием упрощенных процедур верификации согласованности оценок и рационализации применяемой шкалы сравнительной важности, что позволяет полнее использовать прикладной потенциал метода и активнее внедрять его в изыскательскую и управленческую практику на этапах ЖЦ ОС.

Для апробации совершенствованных положений МАИ и оценки сравнительной важности эксплуатационных состояний ПРК по степени влияния на СФС был выполнен опрос 10 профильных экспертов из числа главных инженеров и руководителей технических подразделений управляющих и проектных организаций гг. Белгорода и Анадры, организованный с использованием рекомендованных шкал сравнительной важности. Формализация процесса осуществлена в табличном онлайн-процессоре Яндекс.Таблицы, обеспечивающем комфортный доступ, автоматизацию верификационных процедур, сбор и анализ откликов респондентов. Оцениваемыми в составе содержательного наполнения СФС эксплуатационными состояниями ПРК являлись герметичность, долговечность, ремонтпригодность и работоспособность в трактовке этих технических определений, приведенных выше. Результаты иерархического сравнения эксплуатационных состояний ПРК [84] позволяют предложить ранговый ряд их влиятельной значимости для СФС, принимаемый как показатели (удельные веса) при свертки частных оценок в общую в алгоритм оценки СФС ПРК инструментами АСТД (Рисунок 23).

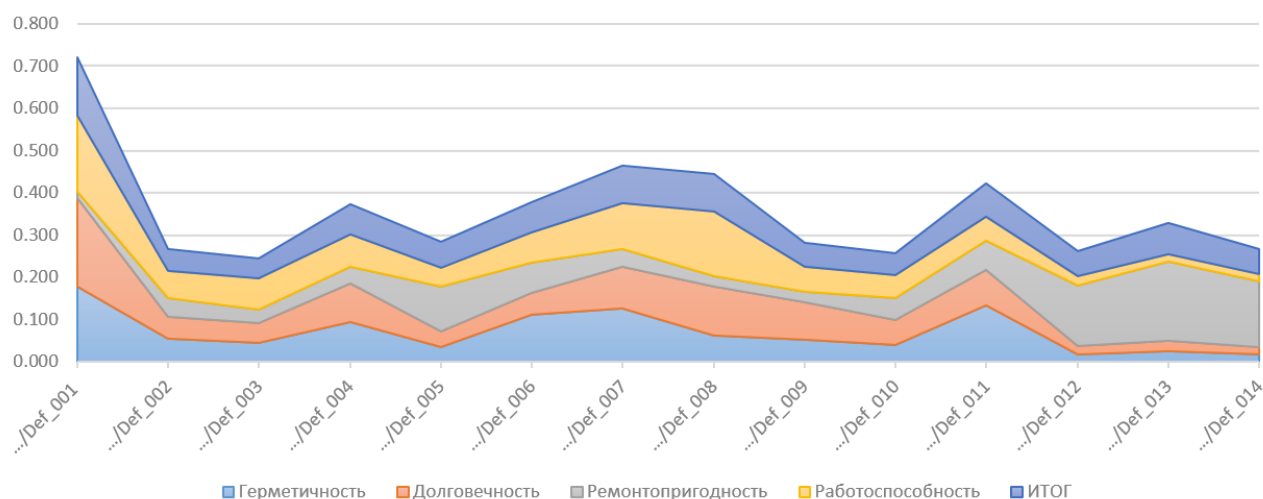


Рисунок 23 – Ранговый ряд влиятельной значимости дефектов на эксплуатационные состояния ПРК

С учетом взаимной значимости дефектов, обоснованно устанавливаемой экспертами в МАИ, предлагается следующее усовершенствованный подход к определению СФС ПРК на стадиях ЖЦ ОС:

$$\text{СФС} = \sum_{s=1}^k \sum_{i=1}^l \text{MnP_s/Def_i} \times \gamma[s][i], \quad (3)$$

- где
- l – число классифицированных дефектов (14);
 - i – номер текущего дефекта ($i=1 \dots l$);
 - k – количество учитываемых эксплуатационных состояний (MnP_s), входящих в состав СФС ($k=4$);
 - s – номер текущего MnP_s;
 - ... MnP_s/Def_i – частная оценка s-го MnP_s от i-го дефекта с учетом доли его распространения на площади ПРК;
 - $\gamma[s][i]$ – удельный вес (значимость) i-го дефектов .../Def_i во влиянии на MnP_s в общей оценке СФС ПРК, устанавливаемый МАИ в каждом конкретном случае / серии случаев экспертной оценки для определенного технического решения ПРК.

Направлением дальнейшего использования совершенствованной учетом фактической взаимной значимости дефектов методики оценки СФС ПРК становится внесение и периодическая актуализация оценок в ИМ ОС в части, используемой в цифровой эксплуатации ПРК. Актуализация ИМ в части подефектных долей СФС MnP_s/Def_i и периодическая корректировка удельных весов влияния дефектов $\gamma[s][i]$ исходя из наблюдаемого их фактического развития в условиях конкретного технического решения ПРК и ОС позволит количественно установить и прогнозировать перспективную динамику деградации СФС ПРК, являющуюся основой эффективного управления ее ЖЦ с позиции минимальной стоимости владения ОС.

3.4 Выводы по главе 3

1. Задачей СТЭ, включающей в свой состав процедуры и алгоритмы СТД является оценка текущего состояния ОС, традиционно даваемая с помощью качественных категорий состояния, нормативная трактовка которых достаточно обобщена и не позволяет универсально и с высокой детализацией использовать традиционные инструменты оценки этих характеристик для различных элементов ОС. Расширение методологического аппарата СТЭ в этой связи рационально строить на создании и апробации аппаратно-программных комплексов АСТД, обеспечивающих регулярные, высокоточные, сопоставимые и документируемые в цифровом виде результаты, полагаемые в основу качественно иной цифровой технологии оценки состояния ОС и алгоритмов цифрового управления его ЖЦ.

2. Использование категорий ТС и методики оценки ФИ в нормативной постановке, являясь сложившейся практикой производства СТЭ в доцифровую эпоху не вполне соответствует ключевым принципам становления и развития цифрового управления жизненным циклом ОС – универсальности, оперативной горизонтальной и вертикальной масштабируемости, основанности на цифровых форматах представления результатов СТЭ и приспособляемости к изменяющейся структуре ИМ ОС. Универсальным подходом к оценке диагностируемых в составе СТЭ состояний ОС предлагается сделать содержание и использование

понятие СФС ОС, рассматриваемое как универсальный и обобщенный категорийный контейнер, иерархически структурированный вводимыми в его состав эксплуатационными состояниями, относящимися к исследуемому ОС и его элементам. СФС допускает однообразное аналитическое определение показателей эксплуатационных состояний на основании цифрового результата СТЭ и количественную свертку оценок входящих состояний в интегральную оценку СФС оцениваемого ОС (элемента), что становится показателем эффективности принимаемых на ЖЦ ОС управленческих решений, позволяя их оптимизировать.

3. Эффективный алгоритм оценки СФС ПРК инструментами АСТД строится на частных оценках влияния на эксплуатационные состояния классифицированных дефектов, интеграции частных оценок в общую оценку СФС и интеграции СФС по участкам ПРК в СФС ПРК в целом. СФС ПРК выступает единым информирующим показателем текущего состояния ПРК в системах операционного мониторинга и критерием сравнительного ранжирования вариантов производства РВМ при необходимости рационализации лимитированных затрат, запланированных для технического обслуживания ОС. Основой алгоритмизации советования при принятии рациональных управленческих решений является аналитическая идеализация динамики изменения СФС, констатированной на определенном интервале набора исходных данных, и экстраполяция на прогнозируемый горизонт времени. Математический инструментарий диагностики и квалитметрии СФС открыт и гибок для детальных настроек качества получаемых оценок, обеспечивая оперативную адаптацию технологии АСТД ПРК к региональным и технологическим особенностям ОС.

4. Алгоритмы организации и производства экспертного оценивания входящих в состав параметров СФС рационально выстраивать на методологии МАИ, внося целесообразные упрощения в инструментарий выполняемой экспертом оценки сравнительной важности, обеспечивающий приемлемую для экспертного сообщества простоту и прозрачность использования, при сохранении требуемого уровня достоверности результатов оценивания стандартными верификационными процедурами.

4 НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ В СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ПЛОСКИХ РУЛОННЫХ КРОВЕЛЬ

4.1 Технологии нейросетевого анализа в строительной дефектоскопии

Автоматическое обнаружение дефектов элементов ОС на фотоизображениях является технически сложной задачей, поскольку на внешний вид дефектов и возможность их достоверной идентификации влияет масса сторонних факторов: характеристики среды, условия выполнения полетного задания носителем оборудования БАС, изменения свойств окружающих диагностируемые дефекты поверхностей. Любое программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс распознавания дефектов, обязательно включает три основных этапа [46]: предварительную обработку изображений, извлечение признаков и классификацию дефектов.

В связи с тем, что планируется обнаружение дефектов на фотоизображениях протяженных плоских элементов ПРК рациональным решением задачи является использование метода сегментации изображений с помощью модели ГСНС DeepLabV3+, которая может быть объединена с различными предварительно обученными моделями ГСНС в качестве базовых. Для повышения точности и эффективности распознавания были протестированы базовые компоненты ГСНС и проведен детальный анализ их производительности [26].

DeepLabV3+, реконструирующий архитектуру исходной ГСНС DeepLab, использует комплексное пространственное пирамидальное объединение (*ASPP*), с помощью которого возможно расширение поля зрения фотокамер без увеличения количества параметров или объема вычислений для сети. Размер выходного объекта потенциально значительно возрастает, что предпочтительно для эффективного решения задачи сегментации при снижении числа требуемых элементов фотопотока. Реализация ГСНС собственной разработки [35, 170] с использованием модели DeepLabV3+ осуществлена в кроссплатформенной среде python 3.5 (Рисунок 24).

Файл `segmentation_tool.py`

```

import sys
import os
from PyQt5 import QtGui
from PyQt5.QtWidgets import QPushButton, QHBoxLayout, QVBoxLayout, QMainWindow
from PyQt5.QtWidgets import QRadioButton, QGroupBox, QFileDialog, QLabel, QSlider,
QLineEdit, QProgressBar
from PyQt5.QtGui import QPixmap, QImage, QPainter, QColor, QCursor
from PyQt5.QtWidgets import QWidget, QApplication
from PyQt5.QtCore import Qt, QPoint, QObject, QThread
import numpy as np
import cv2
from skimage.measure import label, regionprops, find_contours
import PIL
from fpdf import FPDF
from segmentation_model import SegmentationModel
from distutils.dir_util import copy_tree

obj_names = [
    '1 - Впадины',
    '2 - Вздутие',
    '3 - Складка',
    '4 - Заплатки',
    '5 - Отслаивание ковра',
    '6 - Разрывы ковра',
    '7 - Отсутствие ковра',
    '8 - Грибок/мох',
    '9 - Растрескивание']

```

Рисунок 24 – Фрагмент кода ГСНС распознавания дефектов ПРК

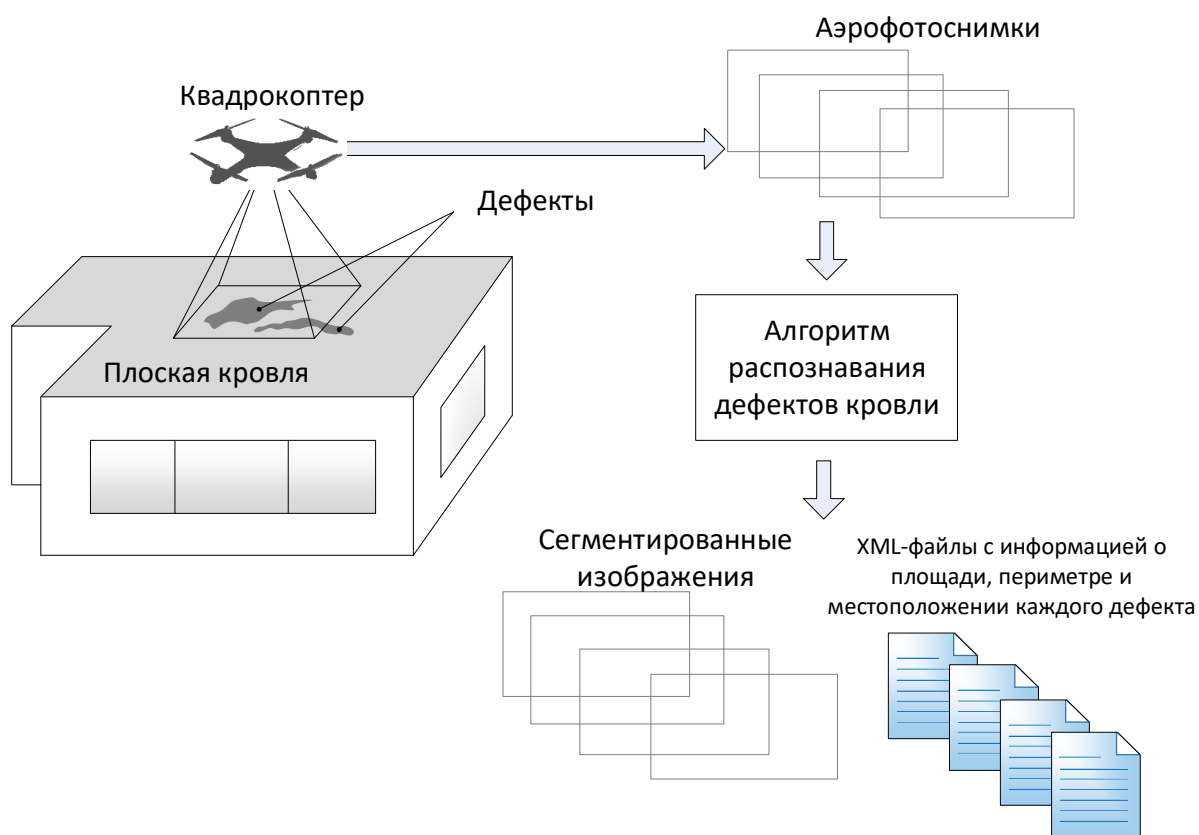


Рисунок 25 – Предлагаемый методический подход к организации и реализации процесса нейросетевого распознавания дефектов ПРК [112]

Таким образом, полученные выполнением маршрутного задания носителем оборудования БАС, локализованные (геотегированные) фотоснимки анализируются по классификатору выявляемых дефектов в обеспеченном вычислительными возможностями режиме реального времени или при камеральной обработке. Далее с помощью программы распознавания на них выявляются сегменты, содержащие дефекты, для каждого из которых определяется площадь и периметр найденной области, сохраняемые в *.xml-файлы; также в файл сохраняется и результат сегментации в виде полутонового изображения (Рисунок 25). Эти данные используются в дальнейшем при оценке СФС ПРК и выбора рационального состава РВМ.

Количественным параметром оценки качества работы реализованных алгоритмов сегментации является мера *Dice* предложенная и обоснованная работами [15, 36]:

$$Dice = \frac{2 \cdot (Y_{GT}, Y_P) + \varepsilon}{(Y_{GT}, Y_{GT}) + (Y_P, Y_P) + \varepsilon}, \quad (4)$$

где (Y_{GT}, Y_P) – скалярное произведение двух векторов – вектора Y_{GT} , содержащего истинную сегментацию изображения, представленного в виде одномерного массива, и вектора Y_P , содержащего результат сегментации с помощью применяемого алгоритма, представленный в виде одномерного массива. Каждый элемент массивов Y_{GT} и Y_P принимает значения в диапазоне $[0, 1]$, где 0 соответствует пикселю, не относящемуся к искомой области (дефекту), 1 соответствует пикселю, попадающему в область изображения с дефектом. Таким образом, величина (Y_{GT}, Y_P) эквивалентна площади пересечения двух областей;

(Y_{GT}, Y_{GT}) – величина, эквивалентная площади истинных областей, содержащих дефекты;

(Y_P, Y_P) – величина, эквивалентная площади областей с дефектами, найденными ГСНС;

ε – величина, равная единице (одному пикселю), необходимая для учета случая, когда на изображении нет ни истинных, ни найденных областей с дефектами.

Качество сегментации объектов определяется коэффициентом Дайса (статистический показатель, используемый для оценки сходства двух выборок) и индексом Джаккарда (*Intersection over Union (IoU)*, индекс, оценивающий степень пересечения между предсказанной и реальной областями сегментации). Индекс *IoU* оценивается по формуле:

$$IoU = \frac{S(A \cap B)}{S(A \cup B)}, \quad (5)$$

где A и B – предсказанная и реальная маска из обучающего набора данных (Рисунок 26).

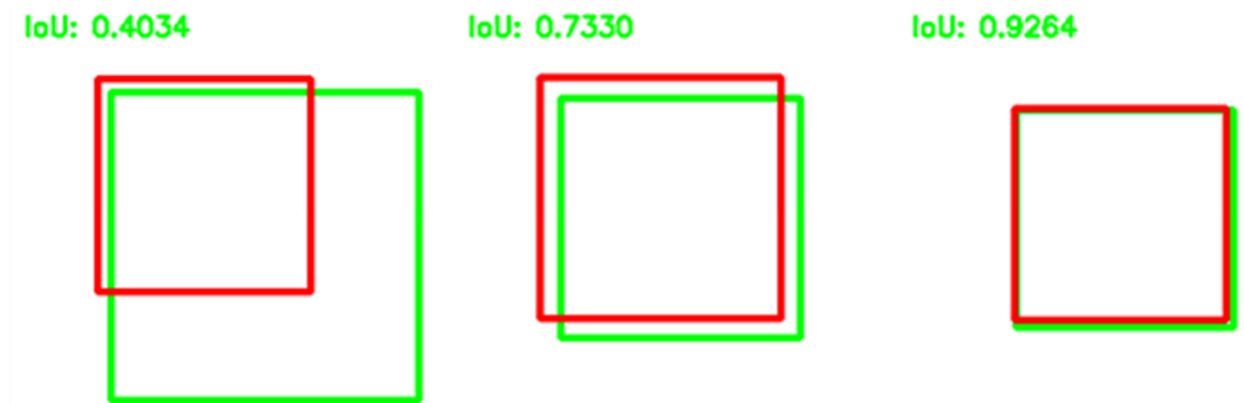


Рисунок 26 – Сопоставление реальной и предсказанной масок по индексу IoU

Коэффициент Дайса d с теми же обозначениями определяется формулой:

$$d = \frac{2 S(A \cap B)}{S(A) + S(B)}. \quad (6)$$

В качестве входных данных ГНСН используются изображения дефектов с размеченными при обучении бинарными масками [35]. Для увеличения объема выборки использованы следующие приемы аугментации:

- крупные изображения нарезаются на несколько мелких размера 512×512 пикселей;

- случайным образом применяются аффинные и перспективные преобразования;
- с вероятностью 50% изображение и его маска могут быть зеркально отражены по вертикали или горизонтали;
- с вероятностью 90% происходит изменение яркости или контрастности изображения;
- с вероятностью 50% к изображению применяется фильтр Гаусса для его размытия.

Все описанные выше преобразования применяются к изображениям в режиме реального времени, кратно увеличивая разнообразие обучающей выборки и реализуя более эффективный процесс обучения ГСНС.

Архитектура DeepLab V3+, рационализированной для эффективного решения задач семантической сегментации, использует следующее внутреннее устройство (Рисунок 27):

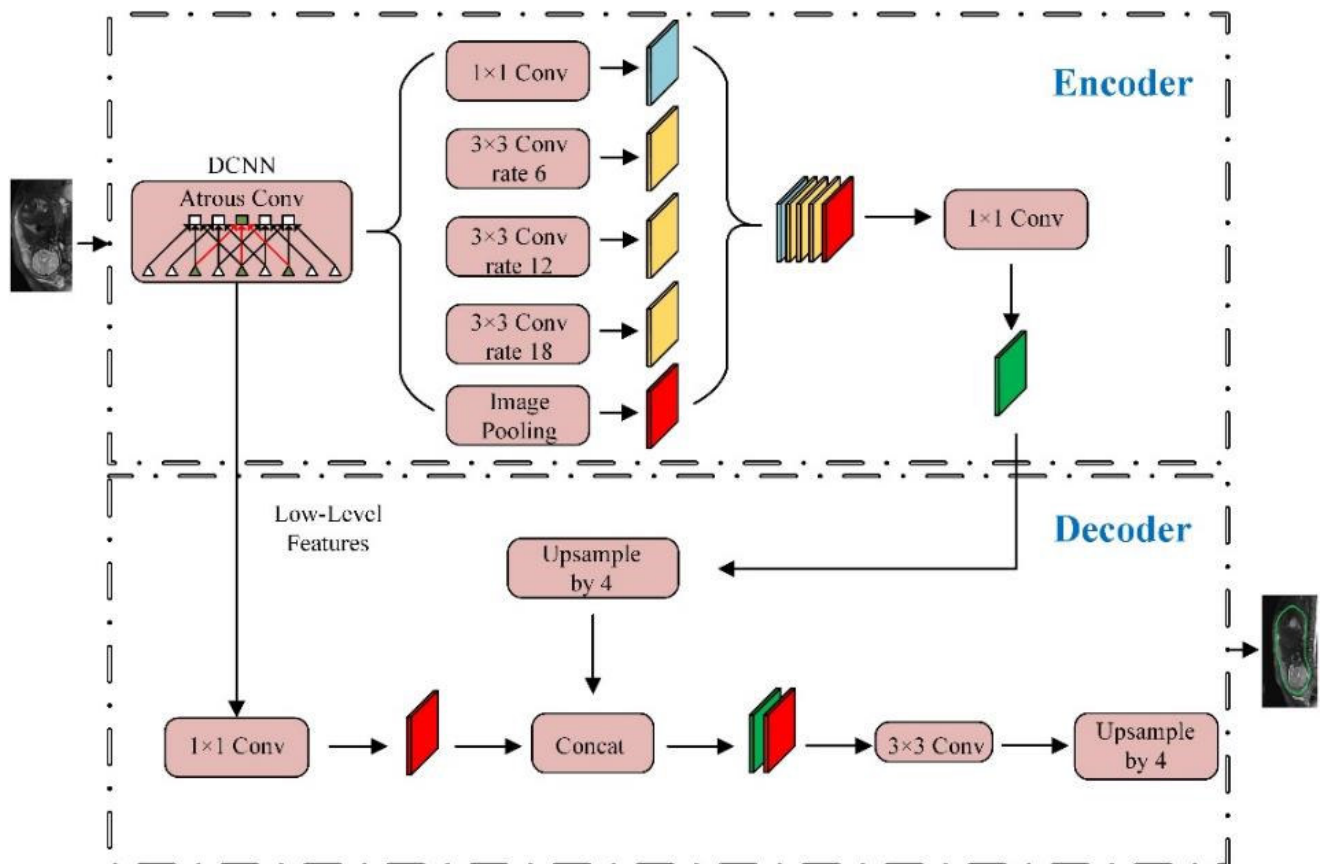


Рисунок 27 – Архитектура DeepLab V3+

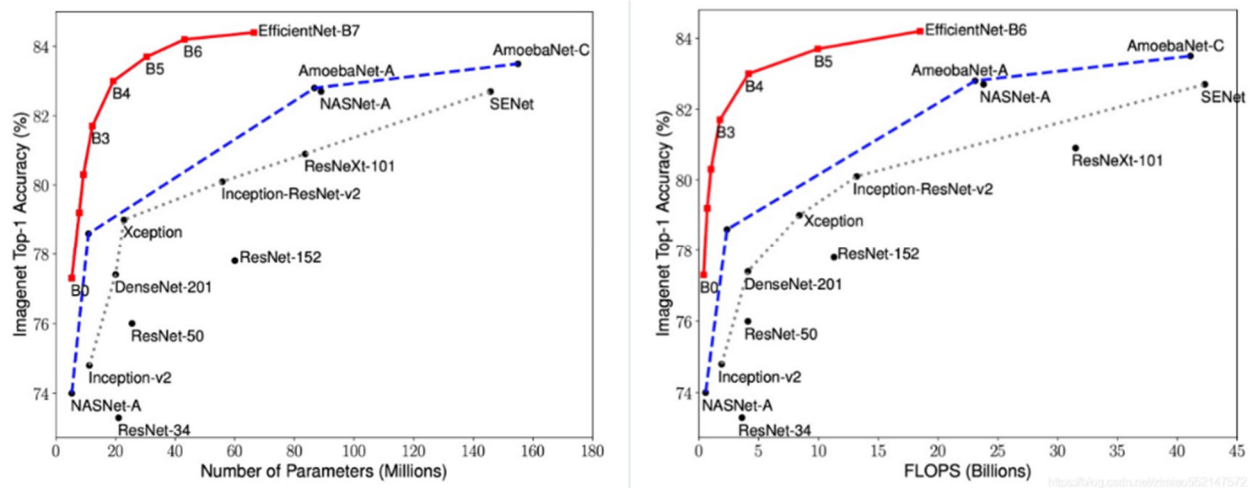


Рисунок 28 – Сравнение EfficientNet-BX с альтернативными алгоритмами

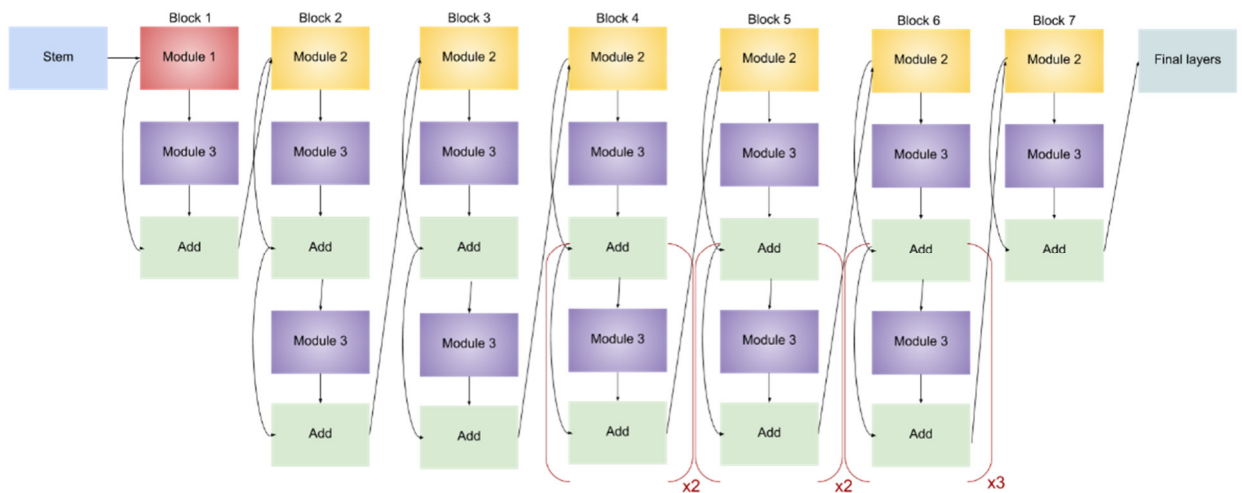


Рисунок 29 – Архитектура EfficientNet-BX

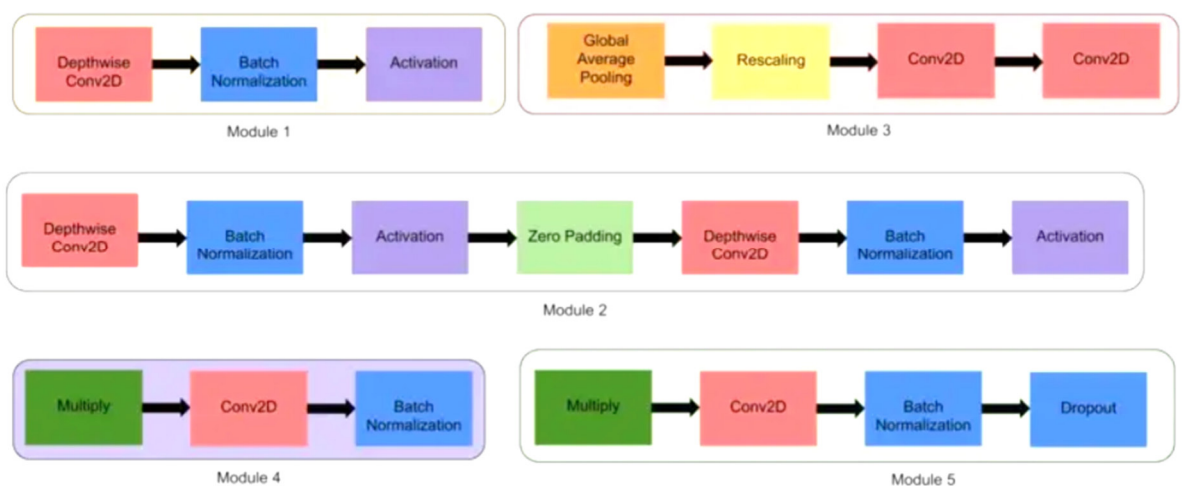


Рисунок 30 – Архитектура модулей EfficientNet-BX

Важной частью использованной архитектуры является выбор модуля извлечения признаков (*feature extractor*) в формате, поддерживаемом алгоритмами машинного обучения, из наборов данных, состоящих из изображений. Слишком большой по количеству параметров *feature extractor* обеспечивает высокую достоверность, а также увеличивает вычислительную сложность алгоритма в целом [87]. В работе в качестве *feature extractor* был выбран EfficientNet-BX (Рисунок 29, Рисунок 30), эффективность которого в сравнении с альтернативными алгоритмами установлена численными экспериментами (Рисунок 28).

Рациональным подходом при обнаружении дефектов ПРК является анализ бинаризованного одноканального изображения, получаемого на основе порогового RGB-HSV преобразования [16]. Порог преобразования в этом случае выбирается опытно-итерационно, учитывая оптические свойства анализируемой поверхности и условия ее освещенности, установившиеся в момент фотофиксации. Предлагаемый алгоритм сегментации изображения с дефектами на основе HSV-преобразования сводится к следующим основным этапам:

1. Сглаживание входного цветного изображения фильтром Гаусса для подавления шумов.
2. Дифференцированное HSV-преобразование сглаженного входного RGB изображения с установленными границами по $H_{\min}$, $H_{\max}$, $S_{\min}$, $S_{\max}$, $V_{\min}$ и $V_{\max}$.
3. Пороговая бинаризация (маскирование) исходящего одноканального изображения по белому 255 и черному 0 значениям от попадания пикселей исходного многоканального изображения в установленные HSV-границы (Рисунок 31).
4. Отыскание на полученном бинаризованном одноканальном изображении 8-связных областей использованием двухпроходного алгоритма [34].
5. Ранжирование найденных связных областей по пороговой величине площади области, отсеечение случайных и малозначимых значений, определение пиксельных, а с использованием заданного масштаба изображения и величины смазки фото – и геометрических параметров выявленного дефекта.

7. Архивация бинаризованного изображения *.jpg и актуализированной маски *.xml с организацией доступа в ИМ, при динамическом и сметном анализе результатов проведенной СТД.

$$V_{\max} = 162$$

$$V_{\max} = 130$$

$$V_{\max} = 109$$

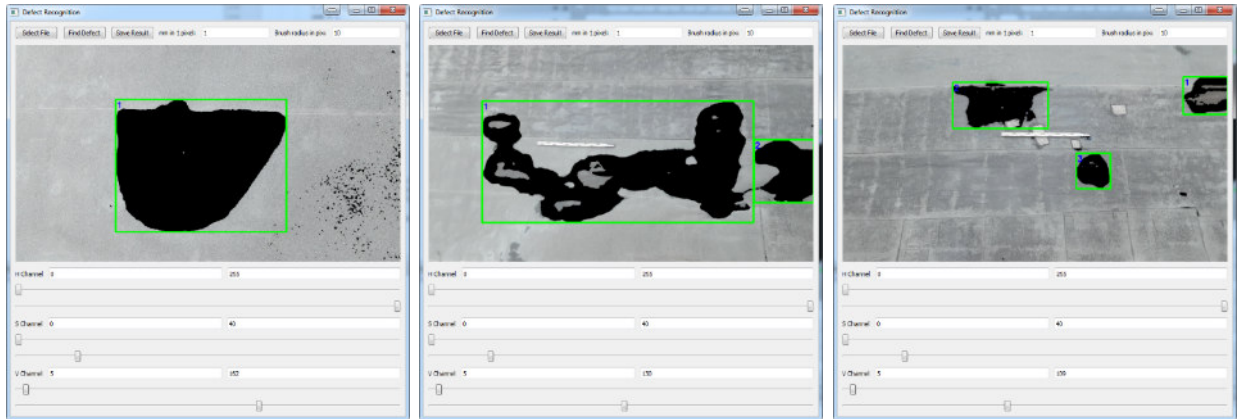


Рисунок 31 – Применение различных пороговых значений алгоритма HSV-преобразования

а

б

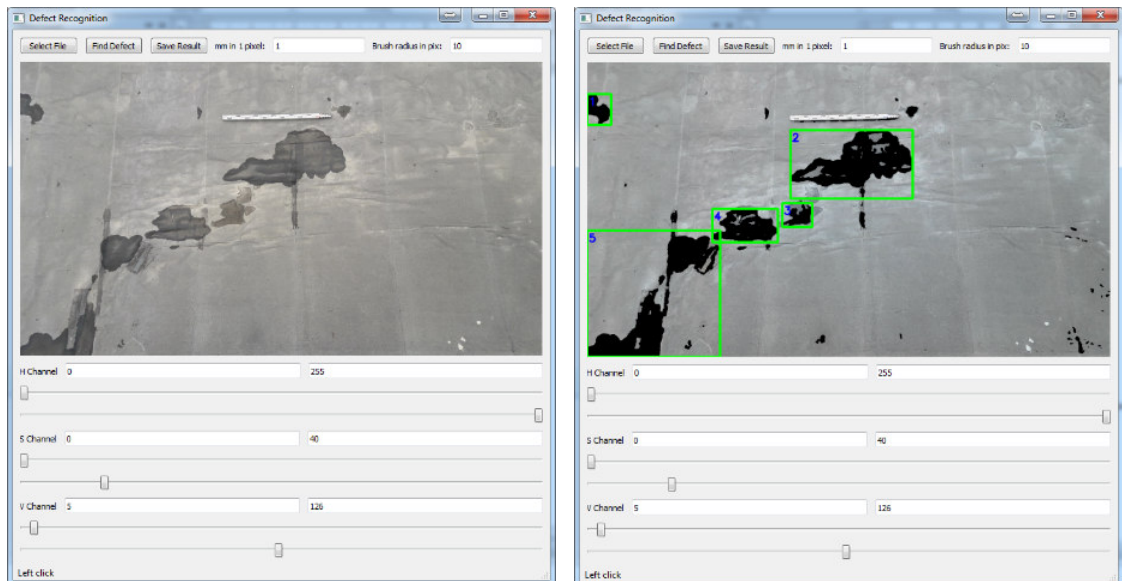


Рисунок 32 – Элементы интерфейса приложения для распознавания дефектов на основе HSV-преобразования: а — загруженное изображение, б — распознанные дефекты

Реализация описанного алгоритма в python 3.5 положена в основу авторского приложения (Рисунок 32), позволяющего работать с основными парамет-

рами алгоритма, отлаживать эмпирические характеристики распознавания, визуально анализировать результаты диагностики на загружаемых фотоснимках. Практически установленным недостатком алгоритма является необходимость дифференцированного назначения существенно отличающихся порогов яркости. Для преодоления этого недостатка исследованы возможности ГСНС, успешно зарекомендовавших себя в сходных задачах из других областей [15], выявлена необходимость корректировки обучающей выборки, содержащей пары (цветное изображение, сегментированное бинарное изображение), совершенствуемые вручную. Для подготовки такой выборки в приложение внесена опция ручного редактирования получаемого бинаризованного изображения.

ГСНС при работе с изображениями позволяют автоматически выявлять их текстурные особенности, что особенно эффективно для решаемой задачи сегментации дефектов. При выборе архитектуры ГСНС учитывались подходы, доказавшие свою эффективность на задаче сегментации изображений на обучающей выборке размеченных изображений PASCAL VOC [12], содержащей 21 различных тип пикселей. К таким подходам относится обучение полностью сверточных нейронных сетей (ПСНС) FCN [29], использованное в работе [27] для задач сегментации биомедицинских изображений. В основе этих архитектур лежат три разновидности операции свёртки [29]:

1) обычная операция свертки с ядром (*kernel*) размера 3×3 пк с шагом (*strides*) 1×1 пк, в результате которой из изображения размером 4×4 пк получается карта признаков размером 2×2 пк;

2) операция свертки с ядром размера 3×3 пк с шагом 1×1 пк, при которой исходное изображение дополнено нулевыми граничными пикселями (*padding*) 1×1 пк (по одному дополнительному пикселю с каждой стороны изображения), в результате которой из изображения размером 5×5 пк получается карта признаков того же размера 5×5 пк;

3) операция обратной свертки, когда из изображения меньшего размера, например, 3×3 пк получается изображение размером 5×5 пк. При этом в исходное изображение добавляются нулевые строки и столбцы (так называемая операция

upsampling с шагом 2×2 пк), и граничные пиксели (например, *padding* 1×1 пк). Ядро и шаг свертки составляют соответственно 3×3 пк и 1×1 пк.

Для решения задачи распознавания дефектов ПРК рассмотрены две архитектуры глубоких ПСНС, содержащих 13 и 17 сверточных слоев – FCN13 и FCN17 (Рисунок 33).

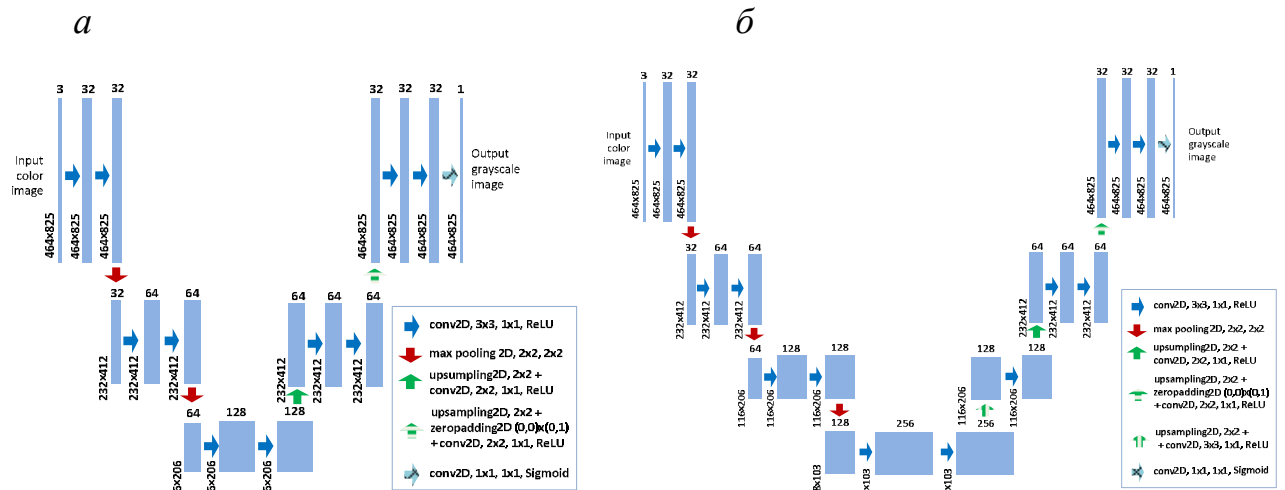


Рисунок 33 – Архитектура глубокой сверточной нейронной сети для сегментации изображений: *a* – с 13 сверточными слоями (FCN13); *б* – с 17 сверточными слоями (FCN17)

Практической реализацией представленных алгоритмов автоматизированного распознавания дефектов ПРК стала разработка инженерного приложения АСТД ПРК, обеспечивающего поликритериальную диагностику и количественную оценку классифицированных дефектов ПРК (Рисунок 34).

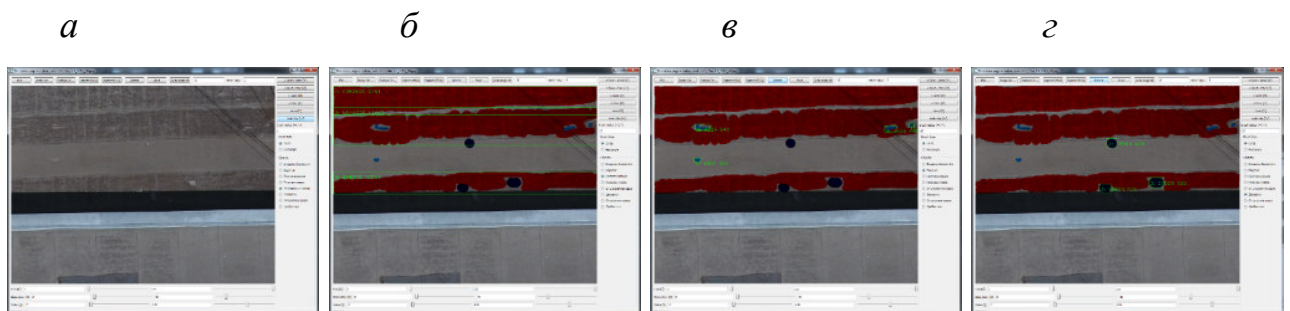
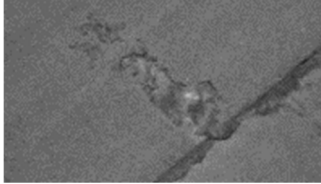
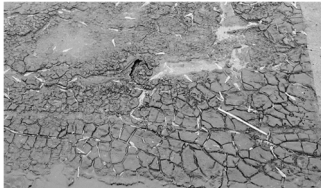


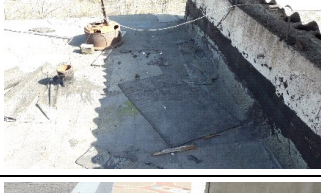
Рисунок 34 – Этапы работы приложения АСТД ПРК: *a* – исходное изображение; *б-г* – распознавание и количественное оценивание параметров дефектов ПРК

4.2 Обучение модели глубокой сверточной нейронной сети

Каталогизация дефектов ПРК осуществляется исходя из условий устройства и эксплуатации кровельных материалов [54, 97, 155]. Каталог дефектов, представленных на уровне отдельно вводимого иерархического класса ИМ (Таблица 10), включает воздействие на уровнях (слоях) ПРК: А – Подготовка, В – Пароизоляция, С – Утеплитель, D – Основание гидроизоляции, Е – Гидроизоляция, F – Эксплуатационный слой, G – Защитные элементы, I – Водосточные элементы. Уровень воздействия определяет приоритет дефекта в общей иерархии дефектов ПРК и объем РВМ по его устранению.

Таблица 10 – Каталогизация дефектов, применяемая при АСТД ПРК

Дефект	Иерархический класс ИМ	Пример диагностируемого изображения	Уровень воздействия
Отсутствие гидроизоляционного покрытия	CEн/PMn/CMa/Def /MnP/Def_1		D, E, F
Повреждение защитного слоя гидроизоляционного покрытия	CEн/PMn/CMa/Def /MnP/Def_2		E, F
Локальное повреждение (разрыв) гидроизоляционного покрытия	CEн/PMn/CMa/Def /MnP/Def_3		E, F
Раскрытие швов рулонного гидроизоляционного покрытия	CEн/PMn/CMa/Def /MnP/Def_4		D, E, F
Трещины гидроизоляционного покрытия	CEн/PMn/CMa/Def /MnP/Def_5		C, D, E, F

Дефект	Иерархический класс ИМ	Пример диагностируемого изображения	Уровень воздействия
Деструкция верхнего слоя гидроизоляционного покрытия	CEн/PMн/CMa/Def/MnP/Def_6		C, D, E, F
Складки гидроизоляционного покрытия	CEн/PMн/CMa/Def/MnP/Def_7		C, D, E, F
Вздутия гидроизоляционного покрытия	CEн/PMн/CMa/Def/MnP/Def_8		A, B, C, D, E, F
Впадины гидроизоляционного покрытия	CEн/PMн/CMa/Def/MnP/Def_9		A, B, C, D, E, F
Биоповреждения гидроизоляционного покрытия	CEн/PMн/CMa/Def/MnP/Def_10		E, F
Отслоение гидроизоляционного покрытия от вертикальных поверхностей	CEн/PMн/CMa/Def/MnP/Def_11		E, F, I
Отсутствие (повреждение) тонколистовой стальной отделки	CEн/PMн/CMa/Def/MnP/Def_12		F, I
Повреждение водоприемной воронки	CEн/PMн/CMa/Def/MnP/Def_13		F, I
Коррозионное повреждение тонколистовой стальной отделки	CEн/PMн/CMa/Def/MnP/Def_14		F, I

Высокая детализация и объем изображений навесного оборудования БАС, содержащих диагностируемые дефекты ПРК, обосновывает рациональность использования инструментов нейросетевого детектирования и квалиметрии. Для первичного обучения и проверки работоспособности ПСНС использовалось 35 изображений 464×825 пк с размеченными на них дефектами кровли, из них к обучающей выборке отнесены 33 изображения, к валидационной 2 изображения.

Для обучения и тестирования сети в задаче сегментации применялась функция потерь $Loss$, минимум которой должна обеспечить ГСНС (7):

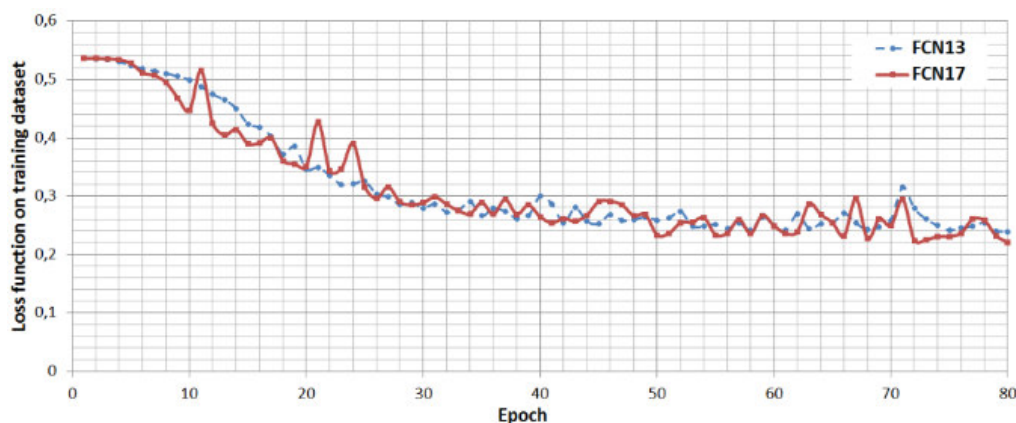
$$Loss = 1 - Dice. \quad (7)$$

Обучение ГСНС было выполнено с помощью оптимизатора градиентных алгоритмов обучения Adam [28], позволяющего управлять величиной коррекции весов на каждой итерации с коэффициентом скорости обучения 0,00001. Результаты обучения демонстрируют, что несмотря на относительно небольшой объем обучающей выборки ГСНС обучаются до приемлемого качества сегментации – $Loss$ для FCN17 достигает не более 0,22, для FCN13 – 0,24. Такие значения обеспечивают приемлемое качество распознавания, подтверждаемое в дальнейшем успешными примерами сегментации изображений при апробации алгоритма.

Подтверждающий вычислительный эксперимент проведен с использованием технологии NVidia CUDA в 64-х битной операционной системе Windows 7, установленной на ЭВМ с центральным процессором Intel Core i5 4570 (4 ядра) 3,2 ГГц, оперативной памятью 8 Гб и видеокартой NVIDIA GeForce GTX 960, имеющей графический процессор с частотой 1,2 ГГц и 1024 графических ядра (Shaders), 2 Гб встроенной памяти DDR5. Программная реализация ГСНС осуществлена с помощью библиотеки Keras 1.3 для интерпретатора python 3.5. Для тестирования выбраны веса, получившиеся на 73 эпохе сети FCN17, когда функция потерь на обучающей выборке составляет 0,224, а функция потерь на валидационной выборке 0,021. Проведенный численный эксперимент продемонстрировал возможность обучения ГСНС до приемлемого качества сегментации, что

обеспечивает применимость ГСНС в распознавании дефектов в АСТД ПРК (Рисунок 35).

а



б

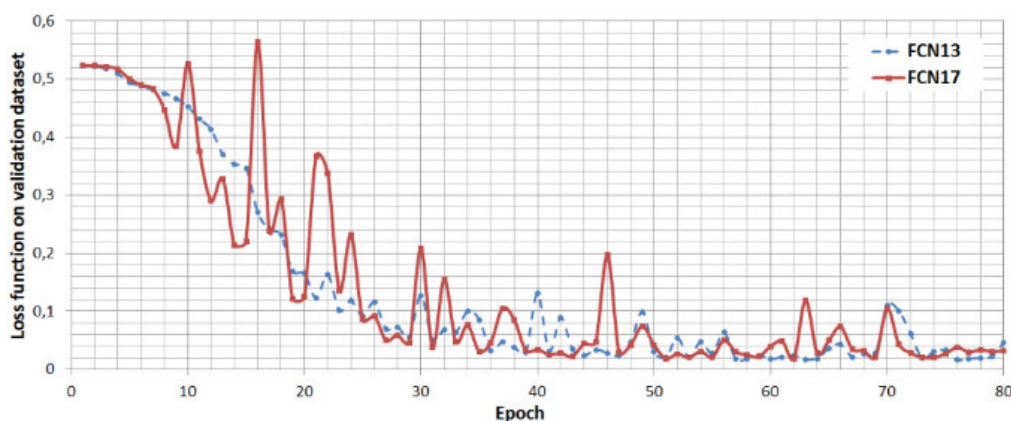


Рисунок 35 – Обучение ГСНС в течение 80 эпох, функция потерь *Loss*:

а – на обучающей выборке, *б* – на тестовой выборке

Для сравнения и выбора режимов эффективного обучения ГСНС было проведено обучение в течении 30 эпох с использованием оптимизатора Adam со скоростью обучения 0,0005 и экспоненциальным уменьшением скорости. Индекс *IoU* использовался в качестве показателя качества обучения. Размер партии составлял 4 изображения на каждой итерации обучения [142]. Обучение модели позволило достичь сходимости при точности $IoU = 0,58$ на валидационном наборе данных. Проведенная сегментация дефектов ПРК обученной ГСНС архитектуры FCN позволяет визуально оценить практически приемлемое качество планируемого цифрового результата АСТД (Рисунок 38) – исходные изображения, маски дефектов, полученные при разметке и маски дефектов, созданные ГСНС.

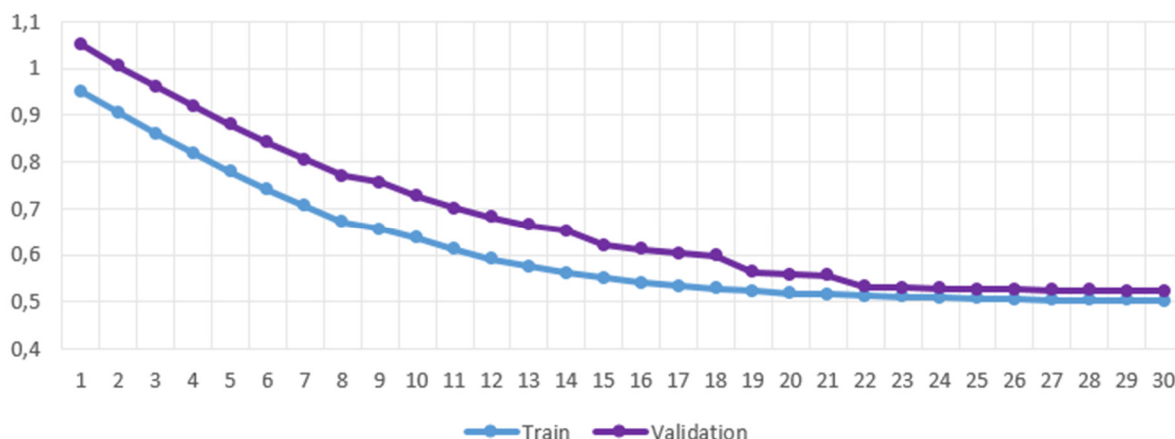


Рисунок 36 –Функция ошибки во время повторного обучения ГСНС

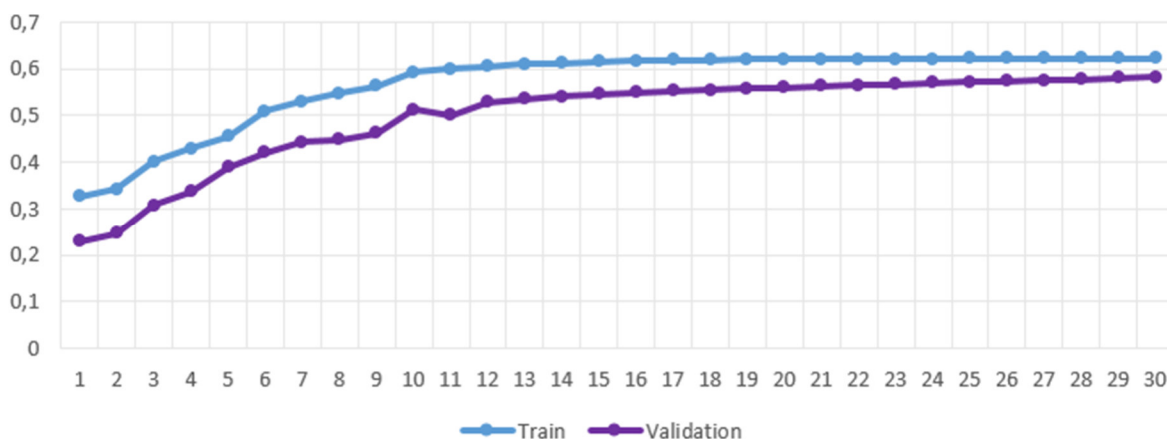


Рисунок 37 – Индекс качества обучения IoU во время повторного обучения ГСНС

Для приведения модели к состоянию предварительной готовности к апробации выполнено обучение на наборе из 19368 изображений, среди которых 8969 содержали по крайней мере одну область дефекта. Общее время обучения ГСНС на 80 эпохах в среднем составило менее 20 мин (Таблица 11), при скорости распознавания 5-6 кадров/сек, с точностью распознавания не менее 0,88 (Рисунок 39). Результат позволяет рекомендовать ГСНС к использованию при автоматизированном распознавании дефектов ПРК в режиме реального времени, без снижения качества и оперативности проведения СТД.

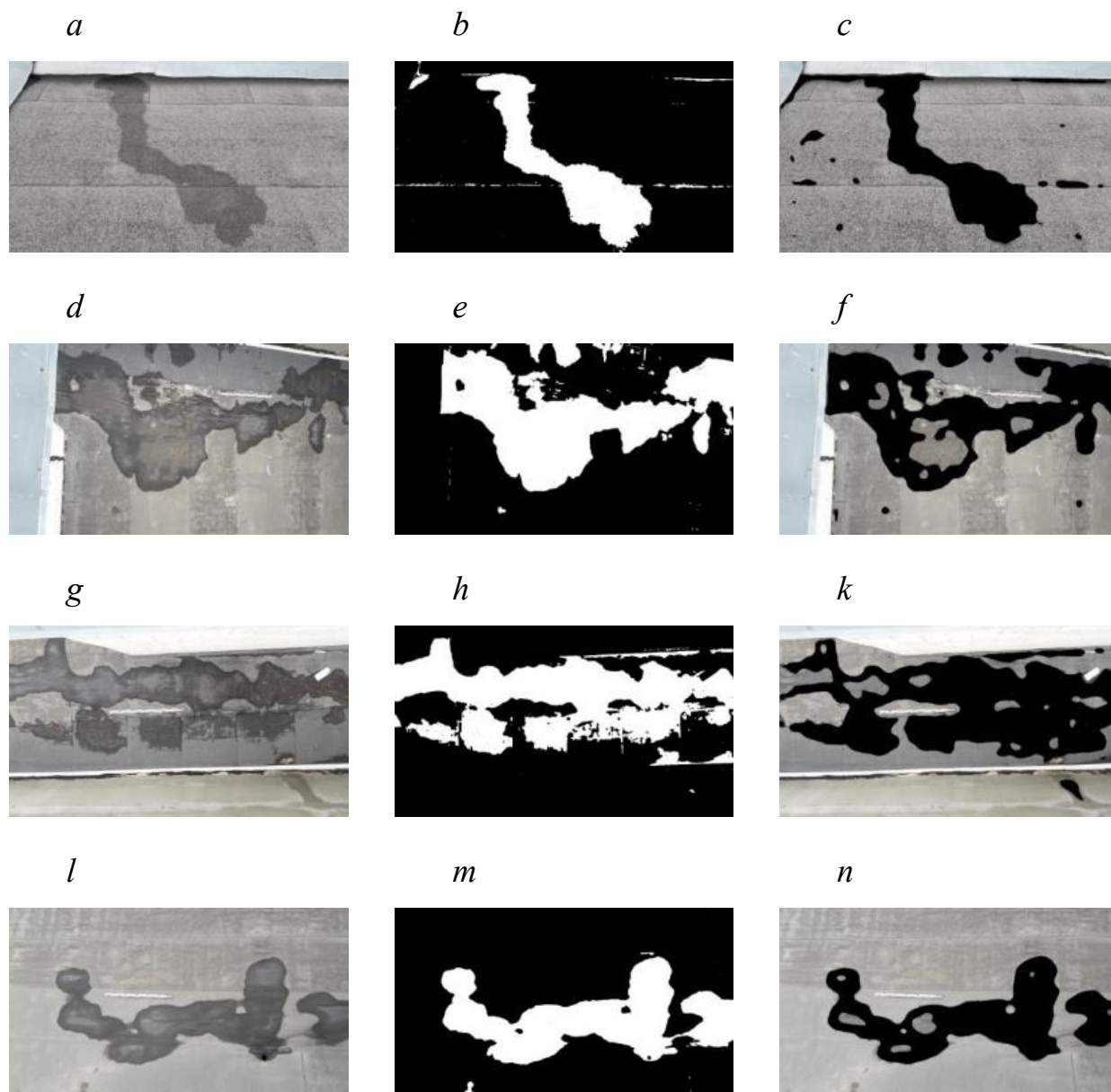


Рисунок 38 – Примеры распознавания дефектов ПРК с использованием обученной ГСНС: *a, d, g, l* — исходные изображения; *b, e, h, m* — подготовленные бинарные маски; *c, f, k, n* — результаты работы ГСНС архитектуры FCN

Таблица 11 – Результаты предапробационного обучения ГСНС

Архитектура нейронной сети	Время обучения на 80 эпохах, с	Среднее время сегментации изображения в режиме тестирования, с
FCN17	1270	0,177 (5,65 fps)
FCN13	1072	0,151 (6,62 fps)

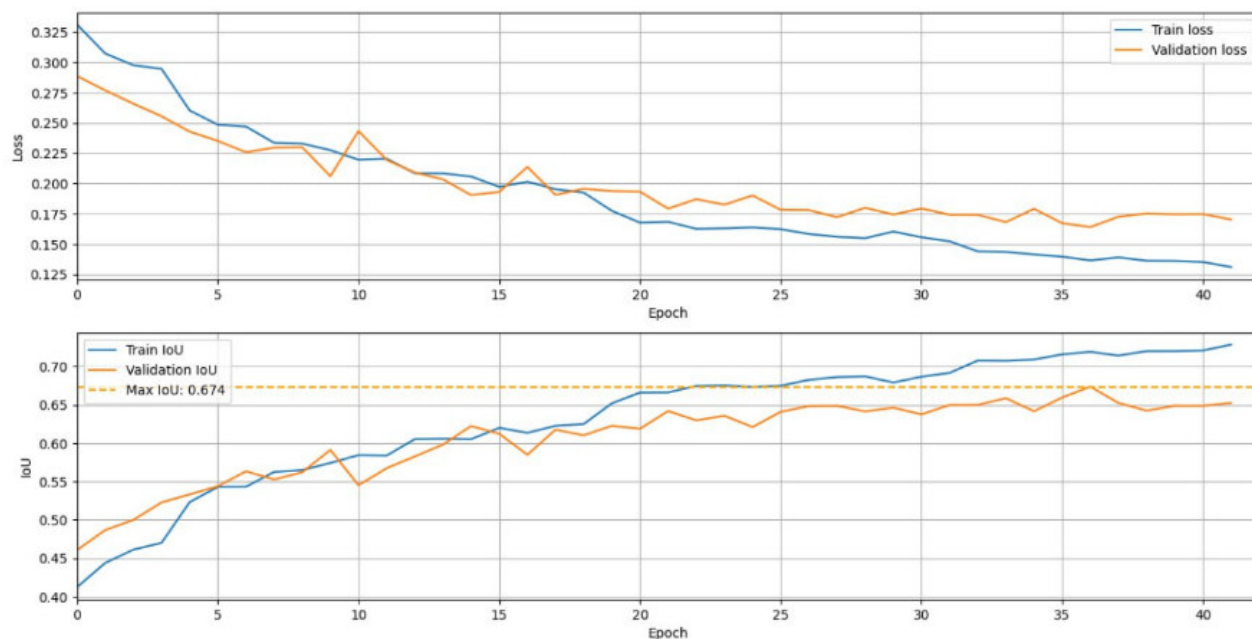


Рисунок 39 – Качество преапробационного обучения ГСНС

Обученная ГСНС позволяет осуществлять обнаружение дефектов кровли на фотоснимках или потоковом видео со скоростью до 7 fps, что обеспечивают бесперебойную, комфортную работу эксперта и достоверность результата в разрабатываемой среде АСТД ПРК.

4.3 Методология классификации дефектов плоских рулонных кровель

Документирование информации в ИМ технически реализуется прикладными инструментами работы с моделью (штатными средствами ТИМ), однако методологически регулируется отраслевыми регламентами. С 1.09.2024 г. вступил в действие реестр требований Минстроя РФ к проектной документации [136], одной из важнейших составляющих которого является Классификатор строительной информации (КСИ) [101, 102]. В КСИ содержатся практические указания к кодировке информации, относящейся к ИМ в строительстве, в связи с чем при перспективной интеграции АСТД ПРК в экспертную и проектно-сметную деятельность возникает необходимость предусмотреть соответствие выходных результатов СТД требованиям классификатора, а в случае отсутствия возможности – разработать рекомендации по его доработке.

Классификаторы являются важной частью систем управления ЖЦ ОС, так как позволяют устанавливать логические связи между этапами реализации строительного проекта. В этой связи задачами классификации становятся:

1. Стандартизация и унификация наименований и характеристик строительных объектов, элементов и материалов.
2. Установление однозначной трактовки и идентификации информации о физических объектах и связанных с ними процессах.
3. Установление прозрачной сквозной связи внутри динамических изменяемых ИМ ОС.

Решение этих задач включает объектные и параметрические подходы к классификации. Объектная классификация, определяющая физический объект по его внешним признакам, необходима на этапе реализации ОС, где ресурсом оперируют физически. Предметом параметрической классификации являются не сами объекты, а определяющие их свойства (позиции в спецификации), относящиеся к качеству, характеристикам, ограничениям в использовании ресурса. Параметрическая классификация ближе к проектной деятельности, так как содержащиеся в ней данные передаются между компонентами ИМ – разделами проектной документации в соответствии с Постановлением Правительства РФ №87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» [135].

Таблица 12 – Перечень классификаторов, используемых на территории РФ

Классификатор	Классификационная система
Перечни документов	IFC
Классификатор ОС	OMNICLASS
ЕСКД	UNICLASS
КСР	CCS
ФЕР	КСИ
СПДС	МССК
ОКПД2	Маркировка продукции
Инвентарные номера	Отраслевые классификаторы

В отечественной строительной отрасли встречается более 18 классификаторов и их видов, однако часть из них — не классификаторы, а классификационные системы (Таблица 12). Классификатор, в устоявшемся понимании, – систематизированный перечень объектов, продукции и товаров, каждому из которых присвоен определённый шифр или код, в то время как классификация – это набор понятий, систематизированный в соответствии с присущими им отличительными свойствами. Предметом классификатора являются физические объекты и процессы, в связи с чем к классификаторам относится и КСИ [72, 76, 77].

Таблица 13 – Сравнительный анализ классификационных систем, применимых к документированию цифрового результата АСТД на этапах ЖЦ ОС

Позиция	Uniclass	Omniclass	CCS	IFC
Интеграция с местной системой НПА и НТД	+	+	+	-
Интеграция с региональными производителями материалов и оборудования	+	+	+	-
Глубина системы кодирования	+	+	-	+
Применение на всех этапах жизненного цикла:	+/-	+/-	+/-	+/-
- прединвестиционная стадия	-	-	-	-
- проектирование	+	+	+	+
- строительство	+/-	+/-	+/-	+/-
- эксплуатация	+/-	+/-	+	+/-
- реконструкция и снос	нет данных			
Простота освоения	+/-	+/-	+	-
Однозначность определения классов	+	+	-	-
Глубина наполнения элементами	+/-	+/-	+	+/-

Рациональное кодирование информации для целей АСТД ПРК должно строиться на положительном опыте и зарекомендовавших себя лучших практиках классификации строительной информации, для чего рассматривается ряд

отечественных и зарубежных классификаторов, применяемых при решении задач цифрового документирования результатов проектной, в том числе изыскательской деятельности в строительстве (Таблица 13).

Унифицированная классификационная система Uniclass, предназначенная для всех секторов строительной отрасли Великобритании, базируется на стандарте ИСО 12006-2:2015. Система разбита на пятнадцать таблиц, в которых представлены различные категории информации, относящиеся к строительству зданий и сооружений [101]. Для кодирования элементов в системе используются буквенные и двузначные обозначения цифрами, каждый набор последовательностей букв и цифр уникален для каждого типа информации. Система Uniclass фасетная, состоящая из разных функциональных наборов, присваиваемых элементу (параметры материалов, производителей и т.д.). К плюсам Uniclass относятся интегрированность в единую систему производственных отношений Великобритании и адаптированность к единым европейским нормам, учёт особенностей работы местной строительной отрасли, упор на многомерность представления информации на этапе проектирования с возможностью однозначного определения объёмов и стоимости как товаров, так и услуг. В то же время значительными минусами Uniclass являются высокая сложность освоения и применения классификации на практике, перегруженная система кодирования элементов при назначении им нескольких элементов в проекте, недостаточность наполненности системы необходимыми для разных организаций классами и элементами. Стандарты проектирования и эксплуатации ОС используют классификатор для однозначного определения характеристик объекта в больших массивах данных. Комплексная североамериканская система классификации для строительной отрасли OmniClass включает ключевые элементы как для управления ЖЦ ОС (подсистема MasterFormat), так и для управления проектами (подсистема UniFormat) [101]. Классификационная система OmniClass благодаря входящим в нее классификаторам используется в ТИМ для планирования затрат, а также для структурирования бюджета и календарно-сетевого планирования, при этом, коды классификатора уже штатно входят в набор общих параметров ИМ на уровне ПО.

Более приспособленная для целей документирования результатов АСТД система OmniClass содержит достоинства и недостатки, близкие Uniclass. Комплексная система классификации Дании Cunesco Classification System (CCS) используется на всех этапах ЖЦ ОС в строительной отрасли страны. Машиночитаемый формат в модели трансформируется в человекочитаемые идентификаторы, используемые в традиционном документообороте и при сверке строительных баз данных между собой. Построенная на стандарте ИСО 81346 система CCS существенно сокращена, базируясь на нескольких основных аспектах норматива и формируя систему максимальной простой идентификации. К достоинствам CCS относятся сквозная интеграция классификации материалов, товаров и услуг со всем строительным комплексом страны, простота и доступность классификации строительных элементов без системных коллизий, простая система машиночитаемого кодирования строительной информации и интеграция с принятыми в стране ПО ТИМ. Недостатками CCS являются малая глубина кодирования и небольшое количество элементов, описанное в базовой классификации. Открытый международный стандарт представления данных в формате Industry Foundation Classes (IFC), упрощающем взаимодействие в строительном производстве, ставит главной целью обеспечение передачи цифровых данных между пользователями и программными комплексами с сохранением информации о передаваемых объектах, используя иерархическую структуру связей классов и подклассов. К достоинствам IFC следует отнести интуитивно понятную иерархическую взаимосвязь элементов ИМ, возможность передачи файлов в среде общих данных ПО ТИМ. Недостатками IFC следует считать не всегда корректно определяемый класс того или иного объекта в модели и функциональную ограниченность классов в информационном и геометрическом представлении элементов ИМ.

Все зарубежные классификационные системы интегрированы большинством мировых вендоров в ПО ТИМ, обеспечивающее стандартизированную интероперабельность и мультиформатность обмена данными в консолидированной ИМ (Рисунок 40).

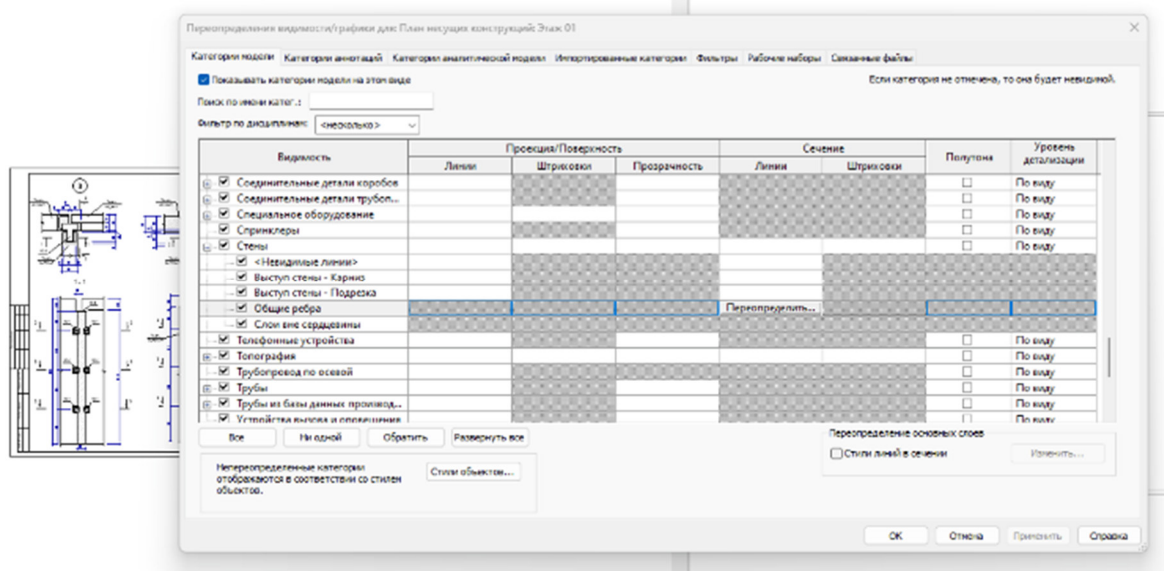


Рисунок 40 – Организация работы с классификаторами штатными инструментами ПО ТИМ

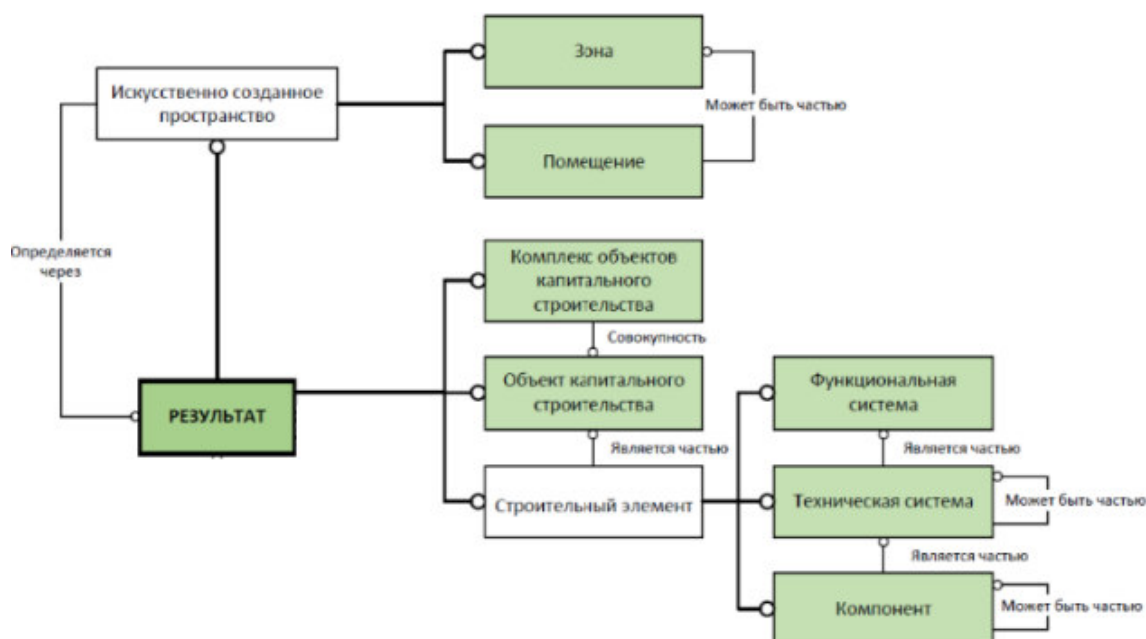


Рисунок 41 – Структуры КСИ для классификации элемента ОС

Отечественный классификатор строительной информации КСИ был разработан на принципах ИСО 81346 и ИСО 12006-2 для целей Главгосэкспертизы относительно недавно [101, 102] и еще не получил широкого распространения ни в российском ПО ТИМ, ни в нормах, регулирующих управление ЖЦ ОС. К задачам КСИ относится обеспечение единого способа представления и интерпретации данных при их извлечении в различных информационных системах,

создание единой системы машиночитаемого кодирования информации и автоматизированная проверка цифровых ИМ. В КСИ существует 21 таблица с более чем двадцатью двумя тысячами позиций, система кодирования которых построена на аспектах и их взаимосвязях друг с другом: функциональном (отображение информации о назначении объекта), техническом (отображение информации о структуре и устройстве объекта), местоположении (отображение информации о пространственном положении или месте установки), типе (отображение информации о группе объекта), пользователе (отображение информации об участниках проекта, оперирующих объектом) (Рисунок 41).

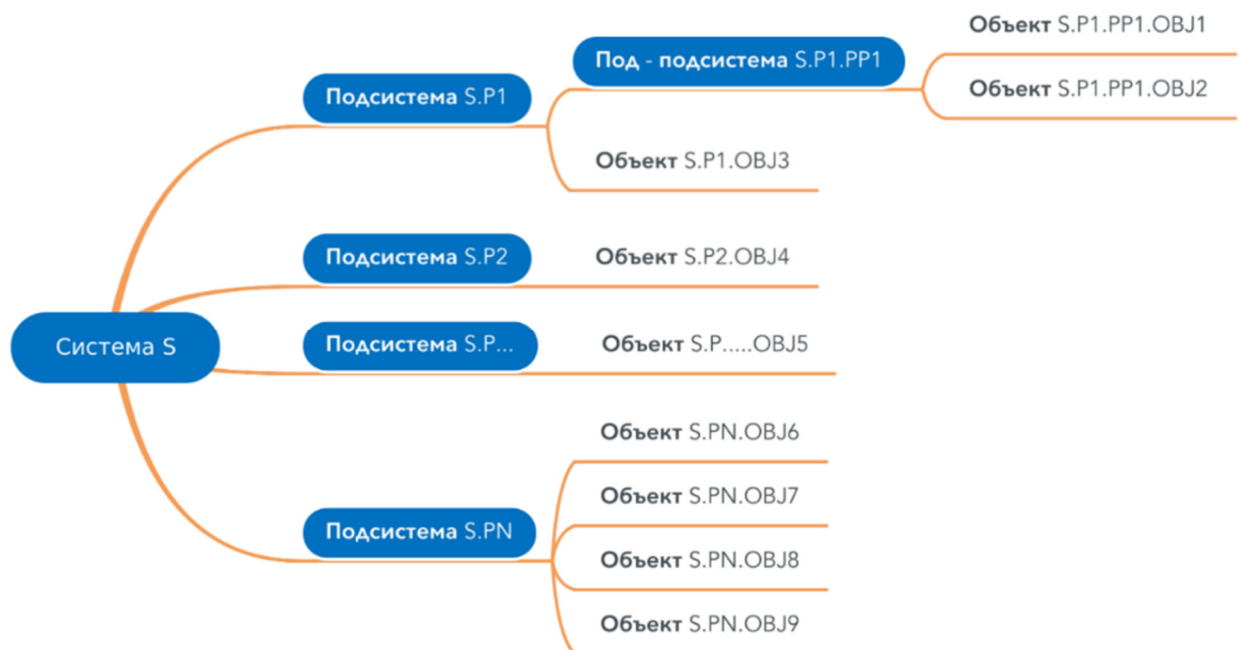


Рисунок 42 – Пример древовидной структуры представления системы

Процесс структурирования системы КСИ выполняется двумя различными способами [98] – сверху-вниз (определение узлов верхнего уровня и последующая их декомпозиция за счёт добавления узлов нижних уровней) и снизу-вверх (определение узлов нижнего уровня и последующее их объединение в группы – системы более верхнего уровня). В результате структурирования формируется древовидная структура представления системы (Рисунок 42), отображающая выделенные в рамках системы/подсистемы объекты и связи между ними. Кодовые обозначения (S, S.P1.PP1.OBJ1 и т.д.), выступающие в качестве уникальных идентификаторов, позволяют воссоздавать структуру представления системы,

используя информацию, закодированную в идентификаторах объектов, например, S.P1.PP1.OBJ1 обозначает, что в проекте используется система S, содержащая подсистему P1, в которую входит подсистема PP1, содержащая объект OBJ1.

Примером описания элемента ОС (Таблица 14) может стать классификация балки как элемента системы «Конструкции балочных перекрытий» ИМ: Балка (<Com>ULE035) выполнена из двутаврового профиля (<Prp>XPG_0009), марка стали С345 (<Prp>MPM_0048), предел огнестойкости R30 (<Prp>XPF_0007).

Таблица 14 – Атрибутивный состав элемента ЦИМ «несущая балка»

Наименование атрибута	Значение атрибута
КСИ Код класса #XNKC0001	ULE
КСИ Наименование класса #XNKC0002	Балка
КСИ Класс строительной информации #XNKC0003	Com
КСИ Составной код #XNKC0004	<Com>
КСИ Код продукта #XNKP0001	-ULE035
КСИ Код продукта многоуровневый #XNKP0002	-D01.AE01.BE01.ULE035
КСИ Код типа класса #XNKT0001	%ULE01
КСИ Наименование типа класса #XNKT0002	ГБ покрытия, тип 1
Профиль сечения #XPG_0009	двутавр
Марка стали #C345	C345
Предел огнестойкости #XPF_0007	R30
Длина #XPG_0003	18000[мм]
Высота #XPG_0002	800[мм]
...	...

Учитывая методологические преимущества и перспективы применения КСИ в отечественных нормах, регулирующих управление ЖЦ ОС, предлагается осуществить классификацию дефектов ПРК, диагностируемых в составе АСТД, в структурном шаблоне, комплементарном положениям КСИ, допускающем как текущий документооборот в формате классификатора, так и перспективное расширение классифицируемых элементов и отраслевой мультидисциплинарности цифровой СТЭ. Классифицирование в иерархической записи стандарта КСИ позволяет формализовать процедуры детектирования и документирования дефектов ПРК в составе развиваемой технологии и строящихся на основе результатов АСТД ИМ (Таблица 15). Предлагается следующий общий подход к построению иерархического классификационного обозначения для дефектов ПРК:

$$CEn / PMn / CMa / Def / MnP_s / Def_i, \quad (8)$$

где CEn – текущий ОС;

PMn – иерархический класс ИМ «Этап ЖЦ ОС»;

CMa – ресурс ИМ «Элементы ОС»;

Def – иерархический класс ИМ «Дефекты»;

MnP_s – иерархический класс «Эксплуатационное состояние»

Def_i – идентификатор каталогизированного дефекта ПРК.

Таблица 15 – Предлагаемая классификация диагностируемых дефектов ПРК

Дефект	Иерархическая классификация	Краткое описание
Отсутствие водоизоляционного ковра	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_1	Полное или частичное на большой площади отсутствие рулонного ковра
Отсутствие защитного слоя	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_2	Отсутствие защитного слоя гравия
Механическое повреждение рулонного ковра (пробоины)	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_3	Пробоины в толще рулонного ковра
Расслоение швов полотен	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_4	Зазоры между слоями кровельного материала в местах стыков
Растрескивание водоизоляционного ковра	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_5	Разрывы рулонного ковра
Разрушение кровельного слоя материала	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_6	Хаотично расположенные нитевидные трещины
Сползание рулонного ковра складками	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_7	Складки рулонного материала вдоль уклона
Вздутие водоизоляционного ковра	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_8	Выпуклые деформации рулонного ковра
Впадины водоизоляционного ковра	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_9	Образование зон застоя, скопление воды / грязи в углублениях
Биологическое повреждение	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_10	Гниение материалов кровли и их механическое повреждение корневой системой растений
Отслоение рулонного ковра от вертикальных поверхностей	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_11	Отсутствие крепления к вертикальным конструкциям, перегибы кровельного материала
Отсутствие элементов из оцинкованной стали	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_12	Локальное или полное отсутствие элементов парапета из оцинкованной стали
Отсутствие крышек элементов организованного водостока	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_13	Отсутствие крышек элементов организованного водостока
Коррозия металлических элементов	CEn/PMn/CMa/Def/MnP/Def_14	Коррозионные повреждения на поверхности стальных элементов кровли

Предложенная классификация располагает возможностями к горизонтальному и вертикальному расширению, составляя вводимую в среду общих данных ветку ресурса ИМ «Элементы ОС» (Таблица 15). Каталогизированные дефекты

атрибутируются элементам ОС с геотегированием в локальной системе пространственных координат элемента. Дефекты ПРК, помимо идентификатора, относящего дефект к тому или иному каталогизированному виду, содержат табличную информацию об установленных сегментацией количественных характеристиках, дате и времени съемки дефекта, технических характеристиках среды, влияющих на качество АСТД. Дополнение существующего КСИ данными о типовых дефектах элементов ОС позволит осуществить бесшовную интеграцию АСТД в практику цифровых изысканий и управления ЖЦ ОС, в том числе в документации, подлежащей рассмотрению Главгосэкспертизы.

4.4 Выводы по главе 4

1. В соответствии с задачами на теоретическом этапе исследования было проведено ранжирование дефектов ПРК, позволяющее оценить степень их влияния на СФС. Каталогизированный перечень дефектов ПРК позволяет проводить дальнейшее обучение ГСНС их автоматизированному детектированию и оценке технических параметров. Сформированный каталог дефектов располагает возможностями перспективного горизонтального расширения при развитии измерительного оборудования и выявлении новых значимых параметров СФС ПРК.

2. В качестве основного алгоритма решения задачи сегментации принята ПСНС, обеспечивающая инвариантность алгоритма к условиям производства АСТД и типологии обследуемых ПРК. Разработанное в процессе исследования ПО, автоматизирующее процесс детектирования и количественной оценки параметров дефектов ПРК протестировано на наборе данных, состоящем из фотографий дефектов и их бинарных масок. Предложенный подход к обучению ПСНС архитектуры FCN показывает практически значимые результаты сегментации изображений из обучающей и тестовой выборок, что позволяет выделять области не только типовых дефектов ПРК, но и, в перспективе, большинства визуально выраженных дефектов прочих элементов ОС с приемлемым качеством.

3. Проведено обучение модели ПСНС на 20 тыс. изображений реальных дефектов ПРК, показавшее точность распознавания до 0,88 на валидационных

данных. Минимальная точность ($> 0,76$) получена на менее визуально выраженных дефектах (вздутия и впадины), максимальная – на трещинах и разрывах. Принятая и обученная модель ПНС демонстрирует эффективность использования при решении задач детектирования дефектов и повреждений ПРК, а дальнейшее практическое использование и связанное с этим расширение обучающей выборки позволит сети обучаться в процессе производства АСТД, улучшая качество цифрового результата экспертиз.

4. Разработанное инженерное приложение для обучения ПНС целесообразно к использованию в широкой цифровой экспертной практике для автоматизации СТД рассмотренных и аналогичных по технологии распознавания и трудоемкости классическими методами дефектов элементов ОС. Оно представляет собой динамически актуализируемый, кроссплатформенный, объективный доступный информационный ресурс, существенно расширяющий текущие и перспективные возможности АСТД, снижающий издержки на ее производство и повышающий результативность основанных на результатах экспертиз технико-экономических оценок текущего и прогнозируемого СФС ПРК, полагаемых в основу принятия эффективных управленческих решений на этапах ЖЦ ОС.

5. Для бесшовной интеграции технологии АСТД, цифровые результаты которой используются, в том числе, в составе проектной документации на капитальный ремонт и реконструкцию ОС, в существующую практику экспертной, изыскательской и проектной ТИМ-деятельности предлагается документировать их в разработанном комплементарном КСИ формате. Формализованный результат АСТД совместим с форматами представления информации федеральной государственной информационной системы ценообразования в строительстве (ФГИС ЦС) и КСИ государственной информационной системы обеспечения градостроительной деятельности Российской Федерации (ГИСОГД РФ), что позволяет максимально оперативно внедрять предлагаемую технологию в текущую практику оценки натуральной ресурсоемкости и сметной стоимости производства РВМ на этапах ЖЦ ОС.

5 УПРАВЛЕНИИ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТОСКОПИЕЙ ПЛОСКИХ РУЛОННЫХ КРОВЕЛЬ

5.1 Практические аспекты реализации технологии производства автоматизированной строительно-технической дефектоскопии плоских рулонных кровель

Разработанное ранее инженерное приложение для обучения ПСНС целесообразно к использованию в широкой цифровой экспертной практике АСТД дефектов ПРК, обеспечивая динамически актуализируемый, кроссплатформенный, объективный доступный информационный ресурс, существенно расширяющей текущие и перспективные возможности СТЭ, снижающий издержки на ее производство, и повышающий эффективность управления ЖЦ ОС.

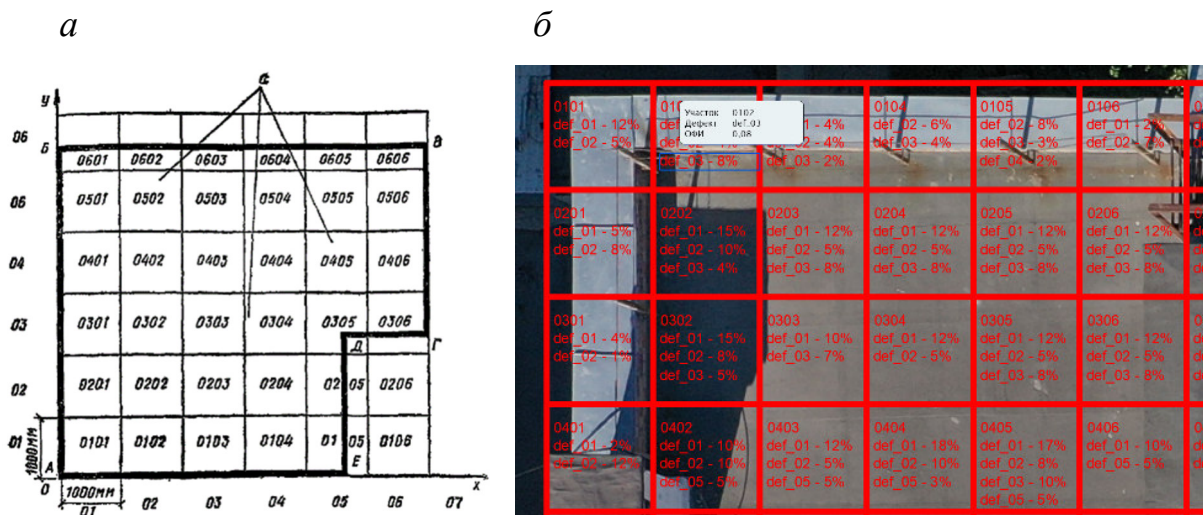


Рисунок 43 – Пример карты дефектов ПРК, выполненной по рекомендациям действующей нормативной документации [107] (а) и по методике АСТД (б): А-Е – границы контуров обследуемой ПРК; 0101-0606 – шифр участка, def_nn – идентификационный номер дефекта, записанный с учетом его иерархической классификации, n% – количественная оценка текущего параметра дефекта на площади исследуемого участка

В процессе проведения СТД ПРК классическими методами строительный эксперт проводит фотофиксацию выявленных дефектов и повреждений, составляет дефектную ведомость и карту (схему) дефектов. Отдельные нормативные документы [107] рекомендуют вносить в карту дефектов данные о количестве выявленных дефектов и процентном соотношении площади выявленных дефектов с площадью неповрежденных участков кровли (Рисунок 43).

Аппаратно-программный комплекс АСТД включает следующее рекомендуемое на текущий момент измерительное, диагностическое и позиционирующее оборудование – квадрокоптер DJI Matrice 300/350 RTK, оснащенный RTK-модулем, многофункциональной видео и тепловизионной камерой DJI Zenmuse H30T и лидаром DJI Zenmuse L2, графическая станция для развертывания, обучающего и анализирующего пользовательского ПО.

Ключевым фактором качества результата предлагаемой АСТД ПРК является повторяемость условий диагностирования, обеспечиваемая программируемой траекторией движения носителя диагностического оборудования БАС и полной автономностью исполнения им полетного задания. Разработку и введение полетного задания, обоснованность которого существенно влияет на качество наблюдений дефектов и результаты экспертизы, рационально строить в несколько ключевых этапов:

- 1) задание масштаба фотографирования, при заданной высоте полета над объектом визирования;
- 2) задание продольного и поперечного базиса фотографирования, значений продольного и поперечного визуального перекрытия;
- 3) задание интервала фотографирования, основанного на продольных базисах, по паспортной крейсерской скорости носителя в режиме максимальной пространственной устойчивости;
- 4) задание величины смаза для пикселя фото-видео фрагмента, основанную на технических характеристиках носителя и фотооборудования.

Обследуемые ОС должны удовлетворять следующим условиям:

- обладать ПРК;

- поверхность ПРК открыта для бесконтактного визуального осмотра;
- перепад высот ПРК не превышает 3 м на 25 м длины здания;
- на поверхности ПРК не должны быть установлены источники излучения, в том числе антенны сотовой связи и иное оборудование, усиливающее сигналы сотовой связи;
- по периметру ОС не должны быть помех БАС на высоте до 15 м над поверхностью ПРК;
- функциональные ограничения БАС по силе ветра и наружной температуре;
- ограничение нахождения людей на поверхности ПРК во время осуществления АСТД;
- рациональный перепад наружной и внутренней температур ОС от 15°C для эффективного использования тепловизионной камеры.

Полетное задание БАС строится на ряде параметров фотосъемки, зависящих от технических характеристик оборудования и снимаемого объекта. При известной высоте полета над объектом H_ϕ масштаб фотографирования M_ϕ определяется как:

$$M_\phi = \frac{H_\phi}{3,61} \quad (9)$$

Размеры фотоснимка по осям L_x и L_y (мм) могут быть определены как:

$$L_x = 4,686 M_\phi; L_y = 6,248 M_\phi. \quad (10)$$

Переход от размеров снимка к реальным расстояниям на местности P_x и P_y осуществляется следующим образом:

$$P_x = 0,8 L_x; P_y = 0,6 L_y. \quad (11)$$

Используя требуемое значение продольного и поперечного перекрытия, устанавливаются продольные и поперечные базисы фотографирования B_x и B_y :

$$B_x = L_x - P_x; B_y = L_y - P_y. \quad (12)$$

Получив продольные базисы и задав крейсерскую скорость полета БАС W (не более 15 км/ч), можно рассчитать интервалы фотографирования (м), задаваемые в полетном задании:

$$t_{\text{и}} = B_x \times \frac{3.6}{15}. \quad (13)$$

Располагая крейсерской скоростью и выдержкой фотокамерой, определяют величину смаза для одного пикселя $\delta_{\text{смаз}}$:

$$\delta_{\text{смаз}} = \frac{W}{3.6} \times \frac{1}{500} \quad (14)$$

Полученные технические параметры полетного задания, относящиеся к навесному оборудованию и процедуре фотосъемки, документируются в рекомендуемой табличной форме (Таблица 16).

Таблица 16 – Технические параметры полетного задания
(для одного из возможных наборов навесного оборудования БАС)

Параметры камеры	
Размер матрицы по осям x/y (px)	3000/4000
Размер матрицы по осям x/y (мм)	4,69/6,25
Размер диагонали матрицы (мм)	7,81
Диафрагменное число	2,8
Размер пикселя (мм)	0,0016
Физическое фокусное расстояние (мм)	3,61
Угол поля зрения по осям x/y/диагонали	65,967/81,742/94,493
Параметры съемки	
Размер пикселя на местности (мм)	50
Максимальная высота полета $H_{\text{ф}}$ (м)	
Масштаб фотографирования $M_{\text{ф}}$	
Выдержка (с)	0,002
Величина смаза $\delta_{\text{смаз}}$ (мм)	
Интервал фотографирования $t_{\text{и}}$ (с)	
Навигационные параметры	
Длина L_x /ширина L_y квадрата (м)	
Требуемое продольное/поперечное перекрытие (%)	80/60
Продольное P_x /поперечное P_y перекрытие (м)	
Базис фотографирования B_y (м)	
Расстояние между маршрутами B_y (м)	
Крейсерская скорость БАС W (км/ч)	

Формирование полетного задания сопровождается рядом технических операций с навесным оборудованием и БАС – подключение питания к БАС и пульту управления, подготовка БАС к полету (разблокирование камеры, установка пропеллеров, калибровка компаса), ввод параметров полетного задания в обслуживающем БАС ПО. Построение маршрута для одного из использованного при апробации технологии БАС DJI Phantom 4 производится в программном продукте LITCHI for DJI Phantom [28] в устанавливаемом приложении для Windows, Android и IOS или в клиентской браузерной версии (Рисунок 44). Планировщик маршрута представляет из себя надстройку для карт Google.maps, в удобном визуальном режиме позволяющую локализовать ОС с исследуемой ПРК, установить границы снимаемого участка, установить точки осуществления взлета и посадки БАС. Первую точку полетного маршрута рекомендуется устанавливать на некотором расстоянии за границей снимаемого участка (примерно в половину базиса съемки). Установка точек в приложении сопровождается появлением панели настроек точки, предоставляющей доступ к техническим параметрам полета, высоте и курсу, выставляемым в соответствии с расчетными значениями оборудования опытным путем для обеспечения ортогональности получаемых снимков маршруту. Вторую и последующие точки маршрута рекомендуется выносить на небольшое расстояние за контур снимаемого объекта, обеспечивая гарантированное покрытие снимками элементов периметра ПРК.

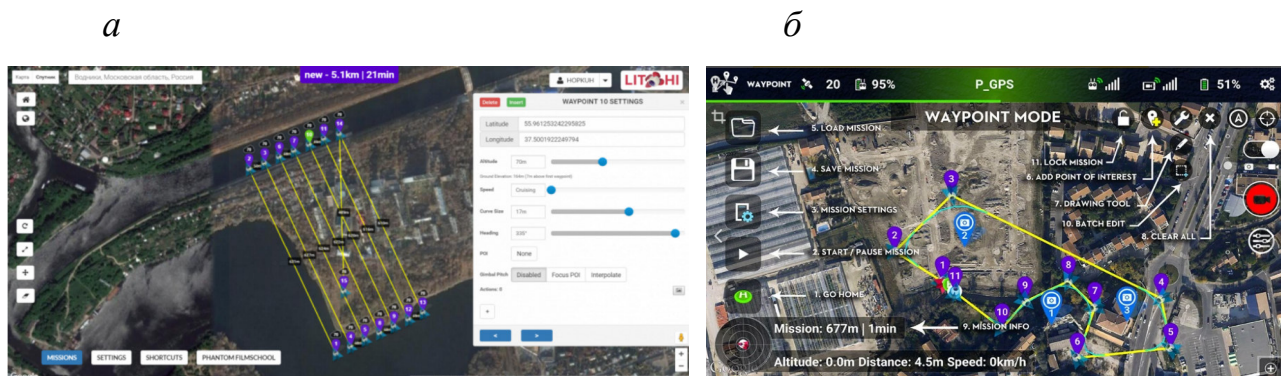


Рисунок 44 – Интерфейс и штатные инструменты приложения для управления полетным заданием БАС LITCHI for DJI Phantom: *а* – в десктопном приложении; *б* – в приложения для мобильных устройств

По мере построения маршрута в приложении отображается его суммарное расстояние и прогнозируемое время выполнения, устанавливаемое по крейсерской скорости БАС, что позволяет контролировать параметры устанавливаемого курса и оценить его целесообразность для целей АСТД. Построение маршрута завершается установкой завершающей точки полета, рекомендуемой располагаться рядом с точкой взлета, так как возможная потеря сигнала фиксирует БАС в текущем положении и завершение полета не должно происходить с риском потери визуальной связи с оборудованием. Суммарное полетное время оценивается на основании аккумуляторной емкости источника энергии БАС и погодных условий осуществления съемки, в большинстве случаев практического использования не должно превышать 20 минут. Запроектированное полетное задание сохраняется в базу приложения, обеспечивая возможность его периодического автоматического выполнения с дифференцированной выгрузкой результатов для последующего сравнения и прогнозирования.

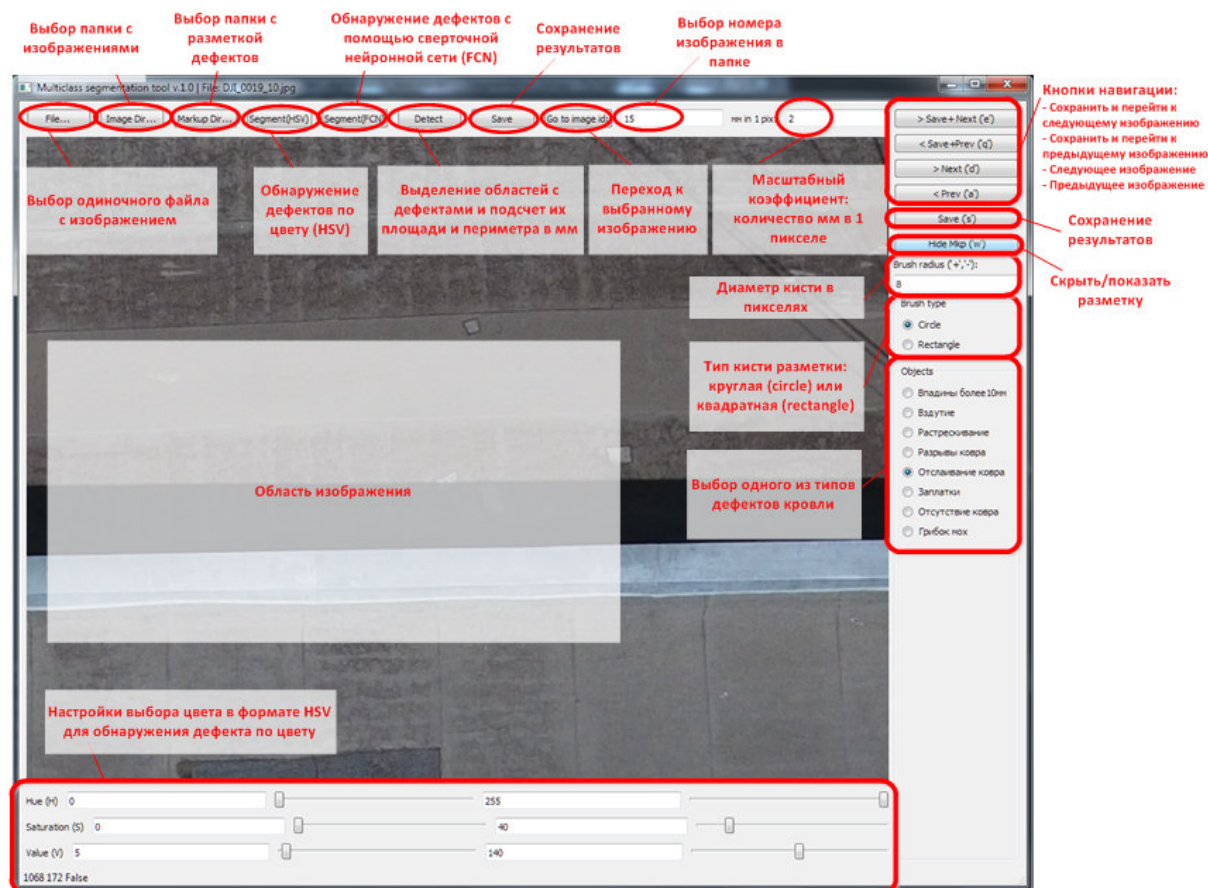


Рисунок 45 – Штатные инструменты приложения АСТД ПРК, принимающего, анализирующего и документирующего цифровой результат

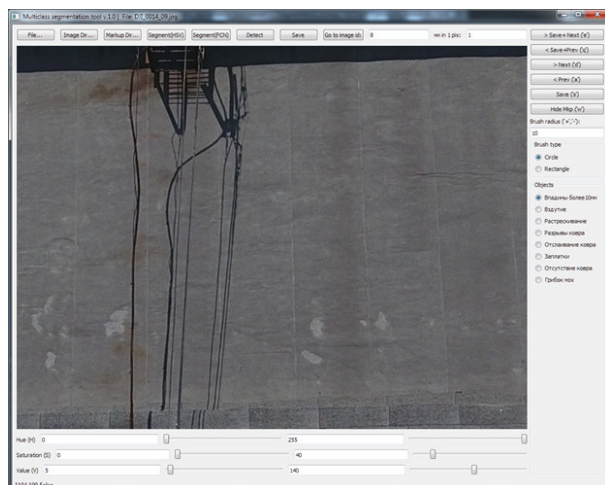
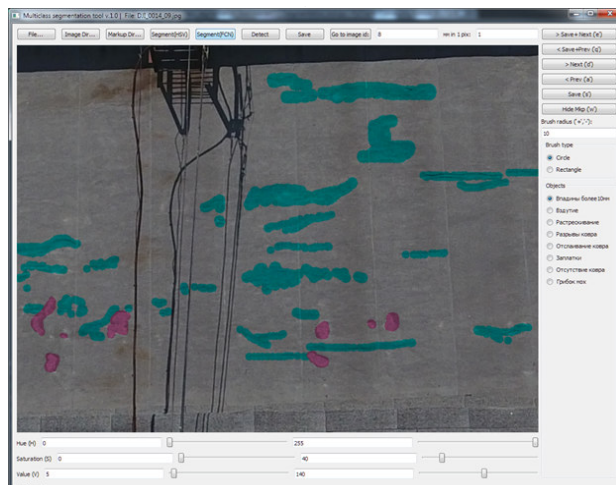
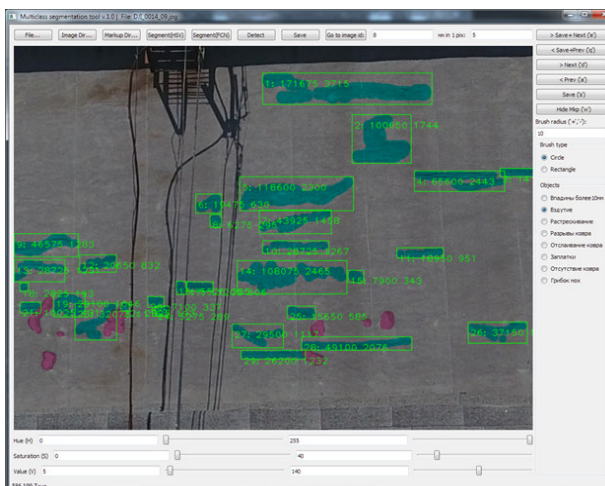
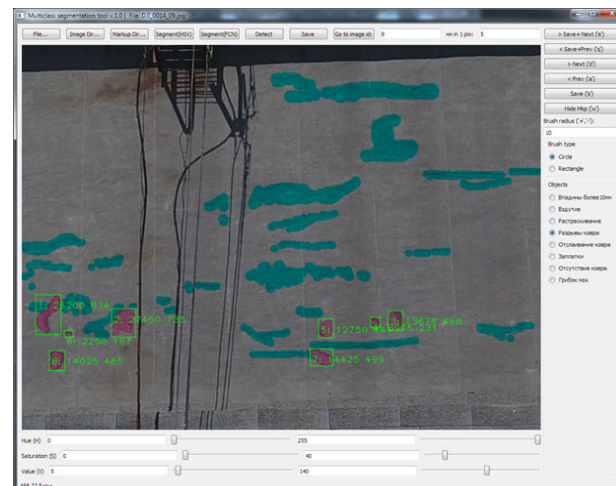
a*б**в**г*

Рисунок 46 – Этапность работы в приложении АСТД ПРК: *a* – ввод исходных фотоизображений в приложении АСТД ПРК; *б* – сегментация дефектов ГСНС; *в-г* – квалиметрия классифицированных дефектов ПРК, вывод в ИМ

Цифровой результат АСТД ПРК, полученный выполнением БАС полетного задания, принимается, анализируется и документируется в разработанном ПО, имеющем элементы пользовательского интерфейса, обеспечивающие реализацию всех этапов работы с цифровым результатом (Рисунок 45). Основными этапами процедуры распознавания дефектов на полученных навесным оборудованием БАС изображениях, реализуемыми приложением АСТД ПРК, являются загрузка изображения, автоматическая разметка ГСНС с сегментацией дефектов, квалиметрия размеченных и сегментированных дефектов (определение типа,

площади, периметра, объемных характеристик), сохранение результатов в комплементарном КСИ формате цифрового прототипа дефекта для внесения в ИМ ОС (Рисунок 46). Результат определения площади и периметра для каждого из дефектов отображается как с помощью графического интерфейса, так и сохраняется в файл.

Для корректного пересчета размеров из пикселей изображения в натурные миллиметры применяется масштабный коэффициент, определяемый на основе характеристик съемки ПРК с помощью БАС (высоты полета, размера изображения, получаемого бортовой камерой). С целью внесения поправки на оптические особенности отдельных камер или адаптации альтернативного рекомендованному оборудования в приложении АСТД ПРК возможно задание масштабного коэффициента для произвольного пересчета площади и периметра найденного дефекта из единиц изображения в единицы длины (Рисунок 47). Кроме этого, в приложении имеется встроенная возможность корректировки автосегментации дефектов сложного контура в плане и сопутствующего дообучения ПСНС, для чего разметка снимка производится специальной кистью переменного размера.

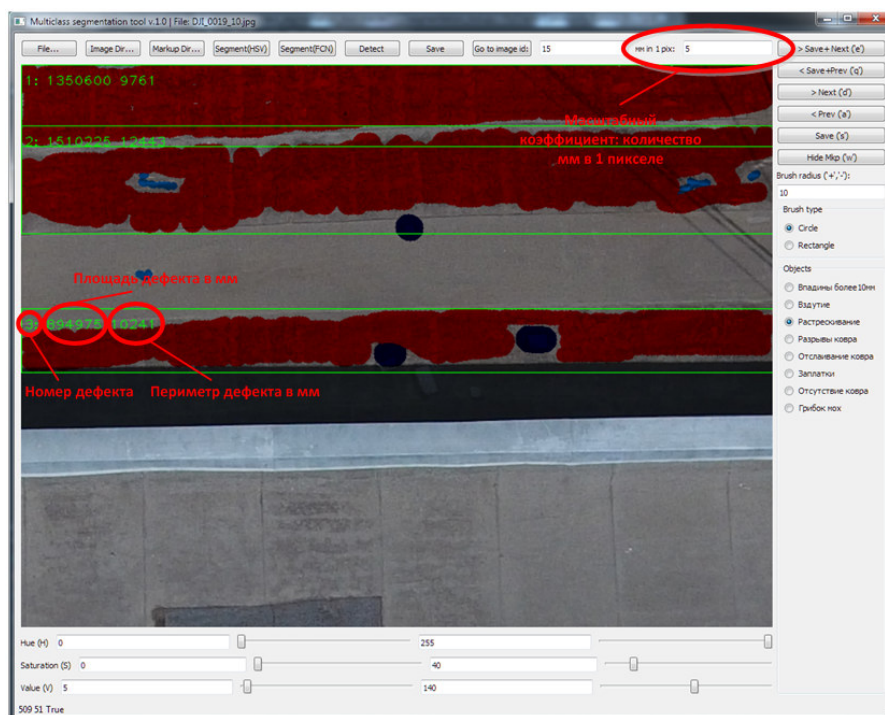


Рисунок 47 – Штатные инструменты приложения АСТД ПРК по настройке характеристик найденных дефектов и масштабного коэффициента

Результаты АСТД ПРК, полученные навесным оборудованием БАС и сформированные приложением документируются в цифровую модель дефекта в ИМ ОС, выносятся для традиционного документооборота в стандартные формы приложений к отчету о проведенной СТЭ – материалы фотофиксации с указанием выявленных дефектов и повреждений, дефектную ведомость, схемы расположения дефектов и могут быть отформатированы в традиционные офисные табличные форматы *.csv, *.xml, *.xls для самостоятельного использования или кроссплатформенного обмена информацией в среде общих данных ИМ.

5.2 Параметрическое моделирование результатов автоматизированной строительно-технической дефектоскопии плоских рулонных кровель

Для внедрения результатов исследования в управление ЖЦ ОС в аспекте совершенствования цифровых инструментов СТЭ лабораторией информационного моделирования в строительстве БГТУ им. В.Г. Шухова был разработан стандарт организации на производство АСТД ПРК, применяемый в том числе при апробации результатов исследования на ОС индустриального партнера (приложение Б).

Основные теоретические положения АСТД ПРК апробированы в рамках научного проекта №18-47-310009 «Научно-теоретические основы автоматизации аэрофотодефектоскопии в строительно-технической экспертизе зданий и сооружений», финансируемого федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский фонд фундаментальных исследований» совместно с субъектами Российской Федерации в 2018 г.; научных проектов №Пф-10/22 «Разработка и совершенствование технологий информационного моделирования в строительстве для решения актуальных задач строительного инжиниринга, цифрового образования и управления недвижимостью», №СП2-2/2-2024 «Технологическое и кадровое обеспечение технологии совершенствования информационной модели здания для управления его техническим состоянием», №СП1-1/2-2024 «Цифровой инжиниринг оборудования и беспилотных систем в промышленности и АПК» программы развития БГТУ им. В.Г. Шухова «Приоритет 2030»

на 2021-2030 гг.; научных проектов №FZWN-2023-0009 «Разработка научно-технических решений адаптивного управления и модернизации автономных мобильных транспортных средств серийного производства для эффективного мониторинга окружающей среды», №FZWN-2023-0011 «Разработка научно-технических решений адаптивного управления и модернизации автономных мобильных транспортных средств серийного производства для эффективного мониторинга окружающей среды», финансируемых в рамках договоров о предоставлении средств юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю на безвозмездной и безвозвратной основе в форме гранта, источником финансового обеспечения которых полностью или частично является субсидия, предоставленная из федерального бюджета.

Технология АСТД ПРК прошла нормативную апробацию в органах государственного управления ЖКФ в составе методического обеспечения при внедрении аппаратно-программного комплекса обнаружения дефектов кровель зданий и сооружений (аэродефектообследование) в Министерстве строительства Белгородской области. Апробация практических результатов исследования проходила на 11 эксплуатируемых объектах капитального строительства на территории кампуса БГТУ им. В.Г. Шухова, 7 эксплуатируемых муниципальных объектах капитального строительства г. Белгорода и Белгородской области, а также 11 объектах капитального строительства г. Самары: главный учебный корпус, учебные корпуса №№1-6, комбинат питания, общежития №№1-2 БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, Костюкова, 46); МБОУ «Лицей №10» (Белгород, Мокроусова, 11а); ОГКУ «Государственный архив Белгородской области (Белгород, Мокроусова, 14); ГБОУ «Белгородская коррекционная общеобразовательная школа-интернат №23» (Белгород, Будённого, 4); Детская поликлиника №1 ОГБУЗ «Детская областная клиническая больница» (Белгород, Попова, 24); ОГБУЗ «Городская поликлиника №6» (Белгород, Костюкова, 16); ОГБУЗ «Корочанская центральная районная больница» (Короча, Интернациональная, 70); ОГБУЗ «Шебекинская центральная районная больница» (Шебекино, Ленина, 46); МКД (Самара, Волжское шоссе, 115; Волжское шоссе, 117; Волжское шоссе,

121; Московское шоссе, 1; Московское шоссе 1а; Силина 14; Силина 15; Силина 17; Ташкентская 206; Ташкентская 208; Ташкентская 210).

Рассмотрим практику информационного моделирования при апробации технологии АСТД ПРК при выполнении СТЭ учебного корпуса №1 БГТУ им. В.Г. Шухова. Мониторинг технического состояния ПРК ОС проводился ежеквартально в ручном режиме с 2019 по 2021 гг. и, после внедрения АСТД ПРК, еженедельно с 2021 по 2023 гг. ОС эксплуатируется с 1974 г., степень воздействия на элементы здания внешних нагрузок следует считать полной, капитальный ремонт ПРК выполнен в 2015 г. Результатом каждого этапа мониторинга являлось заключение о техническом состоянии ПРК, составляемое автоматизированной системой с констатацией изменений геометрических параметров выявленных при первичном обследовании дефектов и прогнозированием их развития в среде общих данных ИМ ОС.

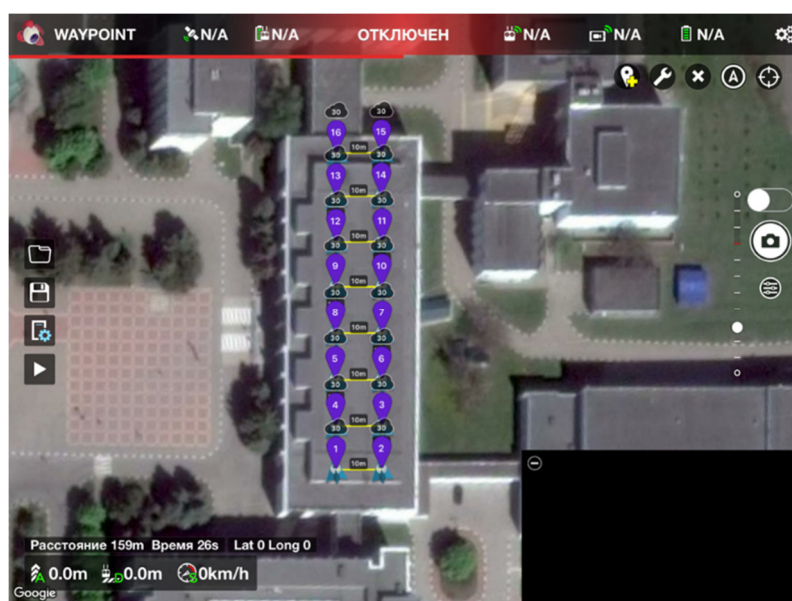


Рисунок 48 – Полетное задание БАС для объекта апробации технологии (УК №1 БГТУ им. В.Г. Шухова)

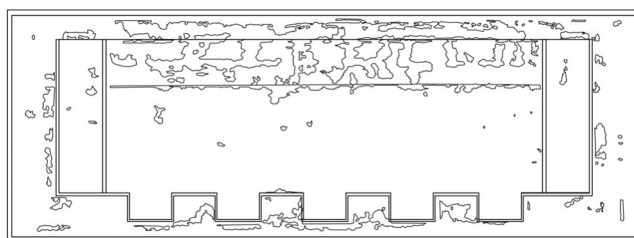


Рисунок 49 Результаты этапов АСТД ПРК: а – фотофиксации дефектов ПРК объекта апробации; б – сегментирования и нанесение цифровых моделей дефектов в ИМ ОС (дефекты ... /Def_8, ... /Def_9)

В рамках АСТД ПРК выполнялись следующие задачи:

- первичный визуальный осмотр ПРК (рекогносцировка), комплектование оборудования, составление полетного задания БАС (Рисунок 48);
- облет плоской рулонной кровли здания с применением БАС DJI Phantom 4 PRO с сплошной фотофиксацией поверхности кровли (Рисунок 49, а);
- автоматизированный анализ результатов фотофиксации в приложении АСТД ПРК (Рисунок 49, б);
- первичное формирование и периодическая автоматическая актуализация цифровых моделей установленных дефектов ПРК в ИМ ОС;
- оценка текущего и перспективного СФС ПРК, автоматическое формирование дефектной ведомости в заключении об обследовании ПРК, определение ресурсоемкости и выбор рационального состава РВМ.

В процессе СТД ПРК, выполненных визуально и в предлагаемой автоматизированной технологии установлены как отдельные технологические ошибки в устройстве кровли, так и нарушение разуклонки, приведшей к застою воды и появлению дефектов рулонного покрытия: локальных повреждений (дефект ...Def_3), трещин (дефект ...Def_5), вздутий (дефект ...Def_8) и вмятин (дефект ...Def_9), отслоения гидроизоляционного покрытия от вертикальных поверхностей (дефект ...Def_11), с приемлемым для планового проведения РВМ состоянием ПРК. Количественные результаты СТЭ, используемые в дальнейшем в параметрическом моделировании дефектов ПРК в ИМ ОС документировались в шаблонном табличном представлении (Таблица 17).

На основании полученных частных оценок дефектов и общей оценки СФС кровли были составлены и в 2023 г. проведены рациональные РВМ, включавшие фрагментарный ремонт и замену участков покрытий с ремонтом внутренних слоев ПРК для участков, содержащих соответствующую принятому критерию оценку дефектов по параметру .../Par_4. Стоимость РВМ актуализировалась до момента принятия собственником решения об их производстве, при этом рацио-

нальный состав и объемы работ изменялись по мере развития дефектов и автоматизированной переоценки их совокупного влияния на СФС ПРК в процессе эксплуатации ОС.

Таблица 17 – Пример дефектной ведомости АСТД ПРК на дату обследования

ID дефекта	Значение диагностируемого параметра дефекта			
	.../Par 1	.../Par 2	.../Par 3	.../Par 4
Def 3 / Локальное повреждение (разрыв) гидроизоляционного покрытия				
R Def 3 1	25,84	—	—	1
R Def 3 2	11,72	—	—	1
R Def 3 3	12,08	—	—	2
R Def 3 4	7,02	—	—	1
...				
Среднее	14,42	—	—	1
Def 5 / Трещины гидроизоляционного покрытия				
R Def 5 1	18,52	—	—	1
R Def 5 2	7,34	—	—	1
R Def 5 3	11,08	—	—	1
R Def 5 4	12,11	—	—	1
...				
Среднее	10,18	—	—	1
Def 8 / Вздутия гидроизоляционного покрытия				
R Def 8 1	—	21,4	2	1
R Def 8 2	—	8,35	1	1
R Def 8 3	—	18,62	2	1
R Def 8 4	—	16,21	2	1
...				
Среднее	—	19,04	1	1
Def 9 / Впадины гидроизоляционного покрытия				
R Def 9 1	—	13,72	1	1
R Def 9 2	—	18,94	2	2
R Def 9 3	—	11,43	1	1
R Def 9 4	—	19,21	1	2
...				
Среднее	—	10,84	1	1
Def 11 / Отслоение гидроизоляционного покрытия от вертикальных поверхностей				
R Def 11 1	2,56	—	1	—
R Def 11 2	3,14	—	1	—
R Def 11 3	8,11	—	1	—
R Def 11 4	5,08	—	1	—
...				
Среднее	5,24	—	1	—

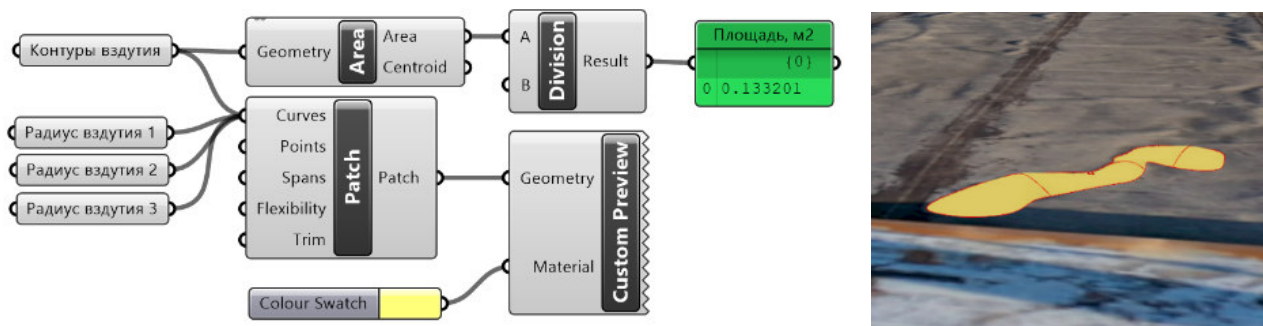


Рисунок 50 – Параметрическая модель Rhino+Grasshopper, формирующая пространственное представления дефекта ПРК (дефект .../Def_8)

Для автоматизированной количественной оценки параметров распознаваемых дефектов ПРК в среде визуального программирования Rhino+Grasshopper была разработана параметрическая модель (Рисунок 50), формирующая пространственное представления дефекта ПРК при внесении цифрового прототипа дефекта в ИМ ОС.

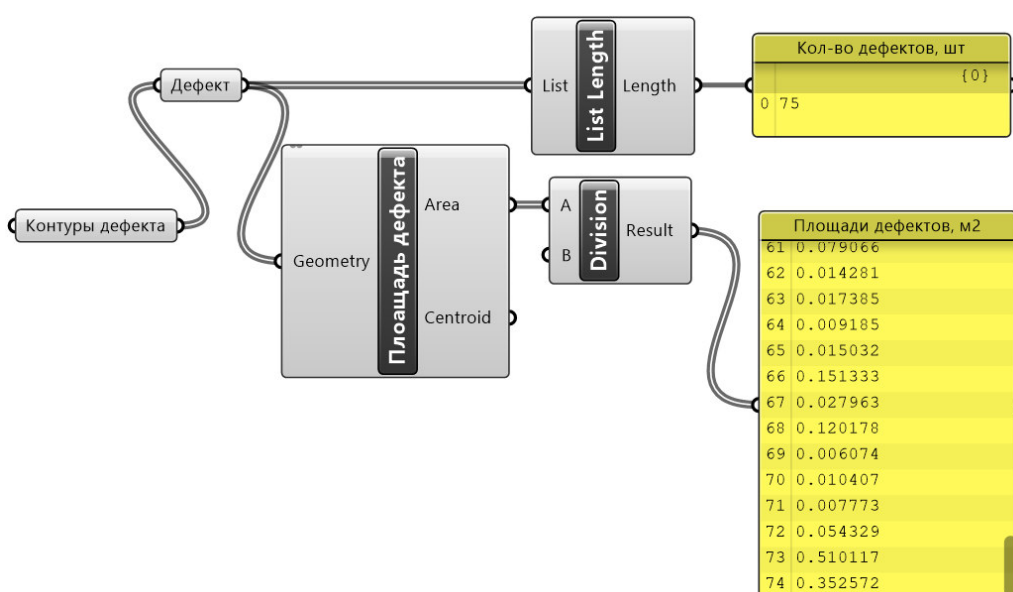


Рисунок 51 – Параметрическая модель Rhino+Grasshopper, документирующая количественные параметры геотегированного дефекта ПРК (дефект .../Def_8)

Параметрической моделью Rhino+Grasshopper создавалось как пространственное представления дефекта для визуального контроля текущего СФС ПРК, так и процедура документирования параметров геотегированного дефекта с привязкой к дате и времени съемки (Рисунок 51), обеспечивающая возможность ретроспективного анализа развития дефекта и прогнозирование СФС ПРК.

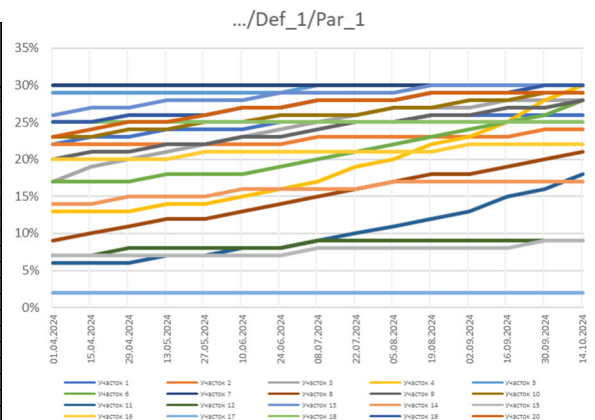
5.3 Апробация технологии управления жизненным циклом объекта строительства производством автоматизированной строительно-технической дефектоскопии плоских рулонных кровель

Эффективное управление ЖЦ ОС с использованием предлагаемой технологии АСТД ПРК строится на основе периодического автоматизированного обследования дефектов ПРК, детектирования и квалиметрии параметров установленных ГСНС дефектов, ретроспективного анализа и интерполяции динамики изменения СФС в течении установленного периода времени (базы прогнозирования), экстраполяции текущего СФС на установленный принимающим решение лицом прогнозный период (до 12 месяцев), оптимизации состава РВМ на основании минимального изменения СФС ПРК на горизонте планирования или на максимальном улучшении СФС при фиксированных ресурсах на РВМ.

Рассмотрим аналитические возможности принятия рациональных управленческих решений в ЖЦ ОС с использованием АСТД ПРК на примере изысканий, проведенных в 2024 гг. для ПРК крупнопанельного девятиэтажного многоквартирного жилого дома в Самаре (Силина, 17), возведенного в 1980 г. ПРК объекта капитально ремонтировалась в 2012 г., т.е. находилась на момент проведения изысканий в эксплуатации более 10 лет, что позволяет считать СФС исследуемого элемента здания представительным для демонстрации работоспособности технологии.

Частные оценки $.../MnP_s$ ПРК исследуемого объекта определялись проведением АСТД на 20 участках кровли дважды в месяц в период 01/04/2024–26/06/2024 г. с прогнозированием на 14/10/2024 г., диагностика параметрам дефектов $.../Def_i$ (этап 1) осуществлялась с различным уровнем дискретизации, в соответствии с текущими задачами исследования, возможностями исследовательского оборудования и фактическим состоянием элемента ОС (Рисунок 18, этап 1). Заказчиком изысканий выступала управляющая МКД компания, заинтересованная в расширении перечня инструментов рационализации управления объектов на этапе его эксплуатации, и собственники, получившие прозрачный и интуитивно понятный инструмент мониторинга состояния одного из элементов.

...	Def_1	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024	Динамика
...	Par_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1%
Участок 1	22%	23%	23%	24%	24%	24%	25%	25%	25%	25%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	замедляющаяся
Участок 2	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	24%	24%	ускоряющаяся
Участок 3	17%	19%	20%	21%	21%	22%	23%	24%	25%	26%	27%	27%	27%	28%	28%	28%	замедляющаяся
Участок 4	13%	13%	13%	14%	14%	15%	16%	17%	19%	20%	22%	23%	25%	25%	28%	30%	ускоряющаяся
Участок 5	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	линейная
Участок 6	17%	17%	17%	18%	18%	18%	19%	20%	21%	22%	23%	24%	25%	26%	28%	28%	ускоряющаяся
Участок 7	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	ускоряющаяся
Участок 8	9%	10%	11%	12%	12%	13%	14%	15%	16%	17%	18%	18%	19%	20%	21%	21%	линейная
Участок 9	20%	21%	21%	22%	22%	23%	23%	24%	25%	25%	26%	26%	27%	27%	27%	28%	линейная
Участок 10	23%	23%	24%	24%	25%	25%	26%	26%	26%	27%	27%	28%	28%	28%	29%	29%	линейная
Участок 11	6%	6%	6%	7%	7%	8%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	15%	16%	18%	18%	ускоряющаяся
Участок 12	7%	7%	7%	8%	8%	8%	8%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	замедляющаяся
Участок 13	26%	27%	27%	28%	28%	28%	29%	29%	29%	29%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	замедляющаяся
Участок 14	14%	14%	15%	15%	15%	16%	16%	16%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	замедляющаяся
Участок 15	20%	20%	20%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	22%	22%	22%	22%	ускоряющаяся
Участок 16	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	30%	линейная
Участок 17	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	ускоряющаяся
Участок 18	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	линейная
Участок 19	25%	25%	26%	26%	26%	27%	27%	28%	28%	28%	28%	29%	29%	29%	30%	30%	линейная
Участок 20	23%	24%	25%	25%	26%	27%	27%	28%	28%	28%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	замедляющаяся



...Def_1	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024	Динамика
...Par_2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1%
Участок 1	20%	20%	20%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	22%	22%	22%	ускоряющаяся
Участок 2	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	ускоряющаяся
Участок 3	16%	16%	16%	16%	16%	16%	16%	16%	17%	17%	17%	17%	18%	18%	18%	ускоряющаяся
Участок 4	13%	13%	13%	13%	13%	14%	14%	14%	15%	15%	15%	16%	16%	18%	19%	ускоряющаяся
Участок 5	28%	28%	28%	28%	28%	28%	28%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	29%	линейная
Участок 6	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	19%	19%	19%	19%	20%	20%	21%	21%	ускоряющаяся
Участок 7	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	31%	ускоряющаяся
Участок 8	9%	9%	9%	9%	9%	9%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	11%	11%	11%	линейная
Участок 9	18%	18%	18%	19%	19%	19%	19%	19%	20%	20%	20%	20%	20%	21%	21%	линейная
Участок 10	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	23%	23%	23%	23%	линейная
Участок 11	6%	6%	6%	6%	6%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	8%	8%	8%	ускоряющаяся
Участок 12	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	26%	замедляющаяся
Участок 13	28%	28%	28%	28%	28%	28%	28%	28%	28%	28%	28%	28%	28%	28%	28%	линейная
Участок 14	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	линейная
Участок 15	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	7%	ускоряющаяся
Участок 16	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	22%	линейная
Участок 17	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	ускоряющаяся
Участок 18	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	26%	26%	26%	26%	26%	линейная
Участок 19	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	28%	28%	28%	28%	линейная
Участок 20	24%	24%	24%	24%	24%	24%	24%	24%	24%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	ускоряющаяся

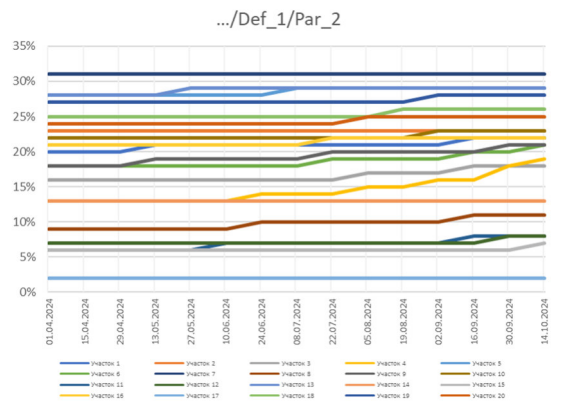
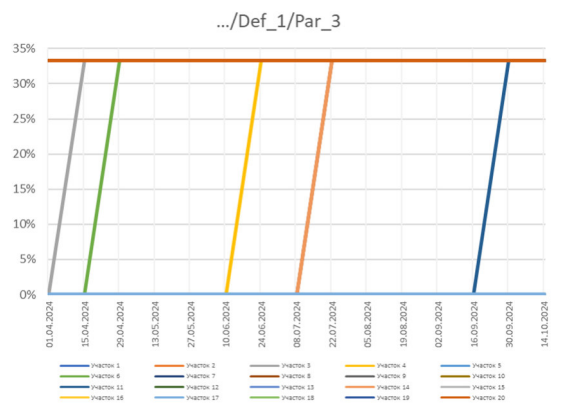
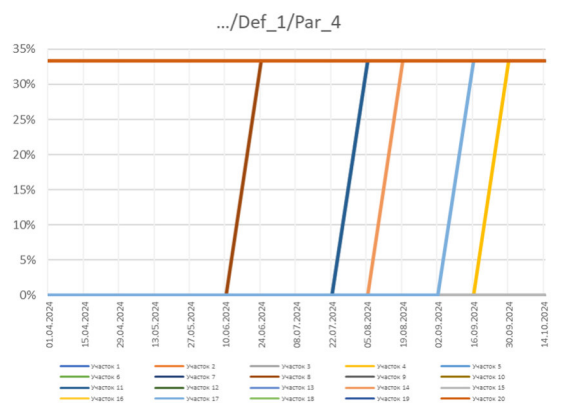
[illegible][illegible]

Рисунок 52 – Частные оценки .../MnP_s ПРК по параметрам .../Par_1–.../Par_4 дефектов .../Def_1 в период 01/04/2024–26/06/2024 г. с прогнозированием на 14/10/2024 г. (слева – табличное представление; справа – графическое представление)

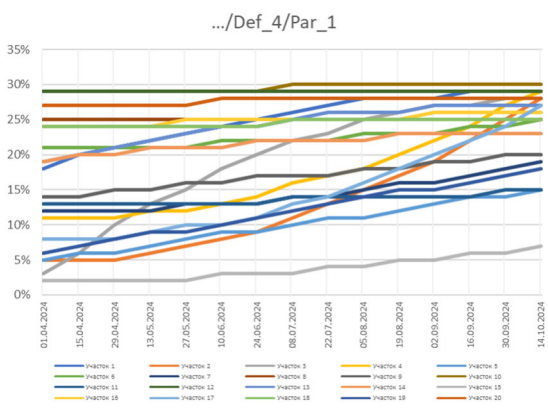
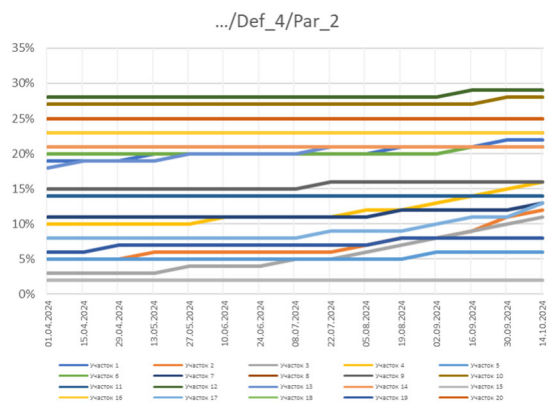
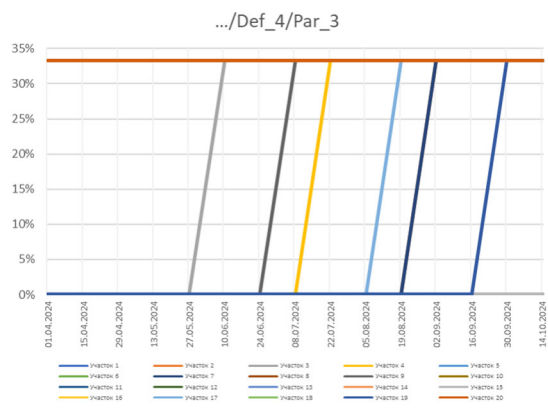
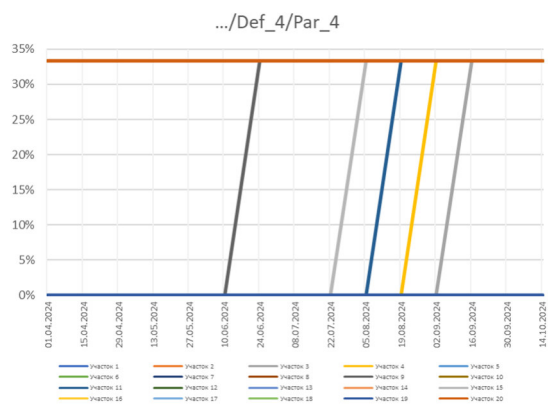
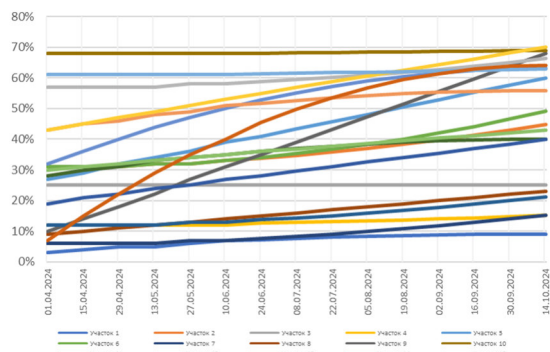
[illegible][illegible][illegible][illegible]

Рисунок 53 – Частные оценки .../MnP_s ПРК по параметрам .../Par_1–.../Par_4 дефектов .../Def_4 в период 01/04/2024–26/06/2024 г. с прогнозированием на 14/10/2024 г. (слева – табличное представление; справа – графическое представление)

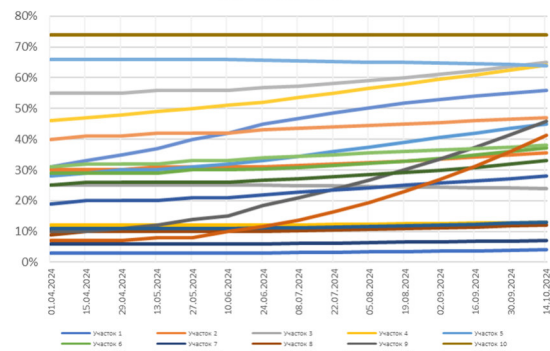
.../Def_7	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024	Динамика
.../Par_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1%
Участок 1	3%	4%	5%	5%	6%	7%	7%	8%	8%	8%	9%	9%	9%	9%	9%	замедляющаяся
Участок 2	31%	31%	31%	32%	32%	33%	34%	34%	35%	36%	37%	38%	40%	41%	43%	ускоряющаяся
Участок 3	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	замедляющаяся
Участок 4	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	13%	13%	13%	13%	14%	14%	15%	15%	ускоряющаяся
Участок 5	27%	29%	32%	34%	36%	39%	41%	43%	46%	48%	51%	53%	55%	58%	60%	линейная
Участок 6	31%	31%	31%	32%	32%	33%	34%	35%	37%	38%	40%	42%	44%	47%	49%	ускоряющаяся
Участок 7	6%	6%	6%	6%	7%	7%	8%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%	ускоряющаяся
Участок 8	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%	16%	17%	18%	19%	20%	21%	22%	23%	линейная
Участок 9	10%	14%	18%	22%	27%	31%	35%	39%	43%	47%	52%	56%	60%	64%	68%	линейная
Участок 10	68%	68%	68%	68%	68%	68%	68%	68%	68%	68%	68%	69%	69%	69%	69%	линейная
Участок 11	12%	12%	12%	12%	13%	13%	14%	14%	15%	16%	17%	18%	19%	20%	21%	ускоряющаяся
Участок 12	28%	30%	31%	33%	34%	35%	36%	37%	38%	38%	39%	39%	40%	40%	40%	замедляющаяся
Участок 13	32%	36%	40%	44%	47%	50%	53%	55%	57%	59%	60%	62%	62%	63%	63%	замедляющаяся
Участок 14	43%	45%	46%	48%	49%	51%	52%	53%	54%	55%	55%	56%	56%	56%	56%	замедляющаяся
Участок 15	57%	57%	57%	57%	58%	58%	59%	59%	60%	61%	62%	63%	64%	65%	66%	ускоряющаяся
Участок 16	43%	45%	47%	49%	51%	53%	55%	57%	59%	61%	63%	64%	66%	68%	70%	линейная
Участок 17	61%	61%	61%	61%	61%	61%	62%	62%	62%	62%	62%	63%	63%	63%	63%	ускоряющаяся
Участок 18	30%	31%	32%	33%	34%	35%	36%	37%	38%	39%	40%	40%	41%	42%	43%	линейная
Участок 19	19%	21%	22%	24%	25%	27%	28%	30%	31%	33%	34%	36%	37%	38%	40%	линейная
Участок 20	7%	15%	22%	29%	35%	40%	45%	50%	54%	57%	59%	61%	63%	64%	64%	замедляющаяся

.../Def_7/Par_1



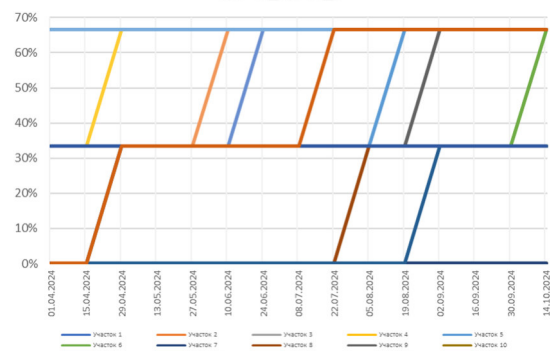
.../Def_7	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024	Динамика
.../Par_2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1%
Участок 1	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	4%	4%	4%	4%	ускоряющаяся
Участок 2	30%	30%	30%	31%	31%	31%	31%	31%	32%	32%	33%	33%	34%	35%	36%	линейная
Участок 3	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	24%	24%	24%	24%	линейная
Участок 4	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	13%	13%	13%	13%	13%	ускоряющаяся
Участок 5	28%	29%	30%	30%	31%	32%	33%	35%	36%	38%	39%	41%	42%	44%	45%	линейная
Участок 6	29%	29%	29%	29%	30%	30%	30%	31%	31%	32%	33%	34%	35%	36%	37%	ускоряющаяся
Участок 7	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	7%	7%	7%	7%	7%	ускоряющаяся
Участок 8	9%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	11%	11%	11%	11%	12%	12%	12%	12%	линейная
Участок 9	10%	10%	11%	12%	14%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	34%	37%	42%	46%	ускоряющаяся
Участок 10	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%	линейная
Участок 11	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	12%	12%	12%	12%	13%	13%	ускоряющаяся
Участок 12	25%	26%	26%	26%	26%	26%	27%	27%	28%	28%	29%	30%	31%	32%	33%	ускоряющаяся
Участок 13	31%	33%	35%	37%	40%	42%	45%	47%	49%	50%	52%	53%	54%	55%	56%	замедляющаяся
Участок 14	40%	41%	41%	42%	42%	43%	44%	45%	45%	46%	46%	47%	47%	47%	47%	линейная
Участок 15	55%	55%	55%	56%	56%	56%	57%	57%	58%	59%	60%	61%	62%	64%	65%	ускоряющаяся
Участок 16	46%	47%	48%	49%	50%	51%	52%	54%	55%	57%	58%	61%	62%	64%	65%	линейная
Участок 17	66%	66%	66%	66%	66%	66%	66%	65%	65%	65%	65%	65%	64%	64%	64%	ускоряющаяся
Участок 18	31%	32%	32%	32%	33%	33%	34%	35%	35%	36%	37%	37%	38%	38%	38%	линейная
Участок 19	19%	20%	20%	20%	21%	21%	22%	23%	24%	24%	25%	26%	27%	27%	28%	линейная
Участок 20	7%	7%	7%	8%	8%	10%	12%	14%	16%	19%	23%	27%	31%	36%	41%	ускоряющаяся

.../Def_7/Par_2



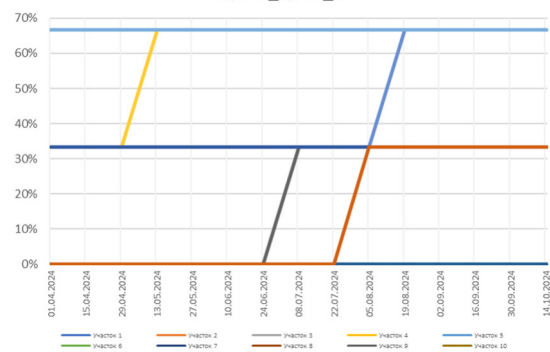
.../Def_7	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024	Динамика
.../Par_3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	33%
Участок 1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	замедляющаяся
Участок 2	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 3	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	замедляющаяся
Участок 4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	ускоряющаяся
Участок 5	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 6	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	ускоряющаяся
Участок 8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 9	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 10	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	линейная
Участок 11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 12	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	замедляющаяся
Участок 13	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	замедляющаяся
Участок 14	33%	33%	33%	33%	33%	33%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	замедляющаяся
Участок 15	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	ускоряющаяся
Участок 16	33%	33%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	линейная
Участок 17	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	ускоряющаяся
Участок 18	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 19	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 20	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	замедляющаяся

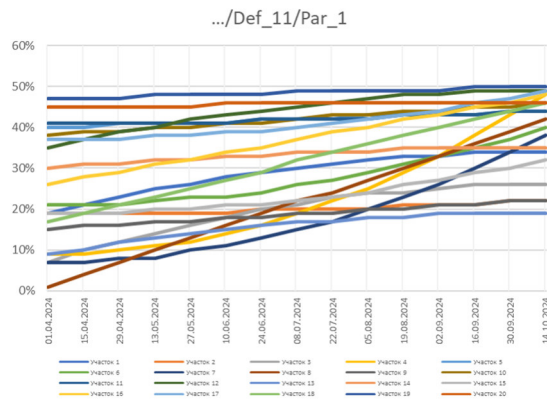
.../Def_7/Par_3



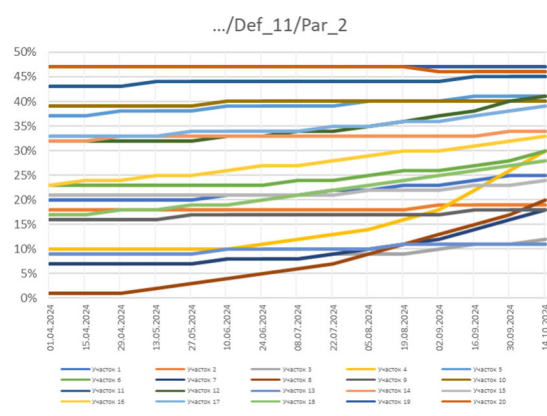
.../Def_7	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024	Динамика
.../Par_4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	33%
Участок 1	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	ускоряющаяся
Участок 2	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 3	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	ускоряющаяся
Участок 5	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 6	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	линейная
Участок 8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	линейная
Участок 9	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 10	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	линейная
Участок 11	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	ускоряющаяся
Участок 12	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 13	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	замедляющаяся
Участок 14	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 15	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	ускоряющаяся
Участок 16	33%	33%	33%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	линейная
Участок 17	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	ускоряющаяся
Участок 18	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 19	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 20	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	замедляющаяся

.../Def_7/Par_4

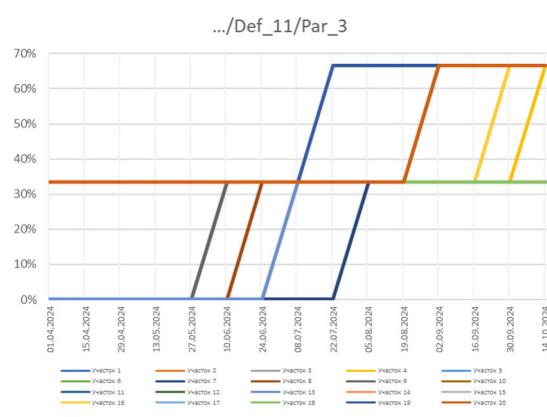


[illegible]

...	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024	Динамика
.../Def_11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1%
Участок 1	20%	20%	20%	20%	20%	21%	21%	21%	22%	22%	23%	23%	24%	25%	25%	ускоряющаяся
Участок 2	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	18%	19%	19%	19%	19%	ускоряющаяся
Участок 3	7%	7%	7%	7%	7%	8%	8%	8%	9%	9%	9%	10%	11%	11%	12%	ускоряющаяся
Участок 4	10%	10%	10%	10%	10%	10%	11%	12%	13%	14%	16%	18%	22%	26%	30%	ускоряющаяся
Участок 5	37%	37%	38%	38%	38%	39%	39%	39%	40%	40%	40%	40%	41%	41%	41%	линейная
Участок 6	23%	23%	23%	23%	23%	23%	24%	24%	24%	25%	26%	26%	27%	28%	30%	ускоряющаяся
Участок 7	7%	7%	7%	7%	7%	8%	8%	8%	9%	10%	11%	12%	14%	16%	18%	ускоряющаяся
Участок 8	1%	1%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	9%	11%	13%	15%	17%	20%	линейная
Участок 9	16%	16%	16%	16%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	18%	18%	18%	линейная
Участок 10	39%	39%	39%	39%	39%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	линейная
Участок 11	43%	43%	44%	44%	44%	44%	44%	44%	44%	44%	44%	44%	45%	45%	45%	ускоряющаяся
Участок 12	32%	32%	32%	32%	32%	33%	33%	34%	34%	35%	36%	37%	38%	40%	41%	ускоряющаяся
Участок 13	9%	9%	9%	9%	9%	10%	10%	10%	10%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	замедляющаяся
Участок 14	32%	32%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	34%	34%	линейная
Участок 15	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	21%	22%	22%	22%	22%	23%	23%	24%	ускоряющаяся
Участок 16	23%	24%	24%	25%	25%	26%	27%	27%	28%	29%	30%	30%	31%	32%	33%	линейная
Участок 17	33%	33%	33%	33%	34%	34%	34%	35%	35%	36%	36%	37%	38%	39%	39%	ускоряющаяся
Участок 18	17%	17%	18%	18%	19%	19%	20%	21%	22%	23%	24%	25%	26%	27%	28%	линейная
Участок 19	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	линейная
Участок 20	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	47%	46%	46%	46%	ускоряющаяся



.../Def_11	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024	Динамика
.../Par_3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	33%
Участок 1	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	замедляющаяся
Участок 2	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 3	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	замедляющаяся
Участок 4	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 5	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 6	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 7	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 9	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 10	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 11	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 12	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	67%	67%	67%	67%	замедляющаяся
Участок 13	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	замедляющаяся
Участок 14	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	замедляющаяся
Участок 15	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 16	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	67%	линейная
Участок 17	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 18	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 19	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	линейная
Участок 20	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	67%	67%	67%	67%	замедляющаяся



...	Def 11	01.06.2024	15.06.2024	29.06.2024	13.07.2024	27.07.2024	10.08.2024	24.08.2024	08.09.2024	22.09.2024	06.10.2024	19.10.2024	02.11.2024	16.11.2024	30.11.2024	14.12.2024	Динамика
...	Par 4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	33%
Участок 1		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 2		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 3		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	ускоряющаяся
Участок 4		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 5		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 6		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 7		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	ускоряющаяся
Участок 8		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	линейная
Участок 9		0%	0%	0%	0%	0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 10		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 11		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 12		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 13		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	замедляющаяся
Участок 14		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 15		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 16		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 17		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	ускоряющаяся
Участок 18		0%	0%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	линейная
Участок 19		33%	33%	33%	33%	33%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	67%	линейная
Участок 20		33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	67%	67%	ускоряющаяся

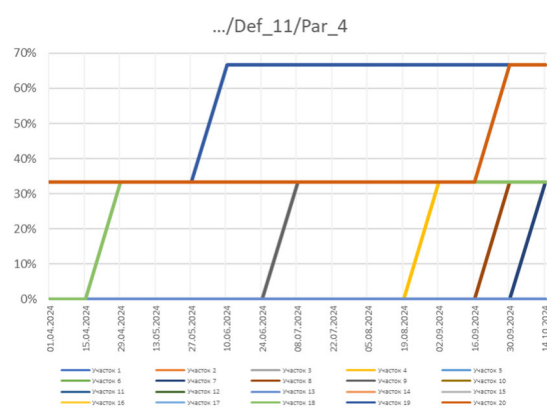
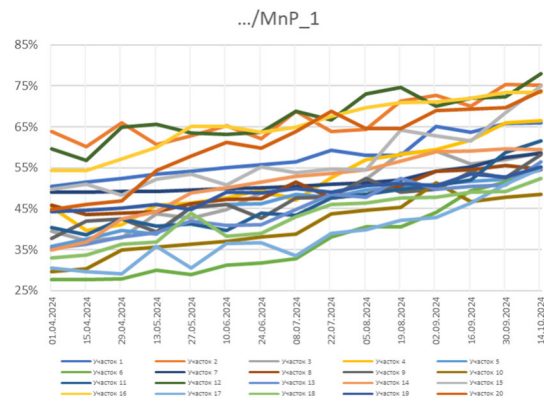
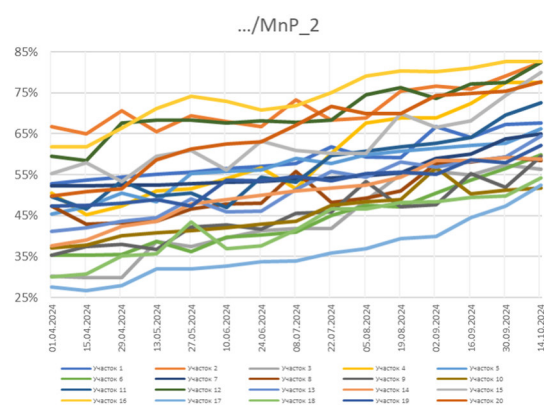


Рисунок 55 – Частные оценки .../MnP_s ПРК по параметрам .../Par_1–.../Par_4 дефектов .../Def_11 в период 01/04/2024–26/06/2024 г. с прогнозированием на 14/10/2024 г. (слева – табличное представление; справа – графическое представление)

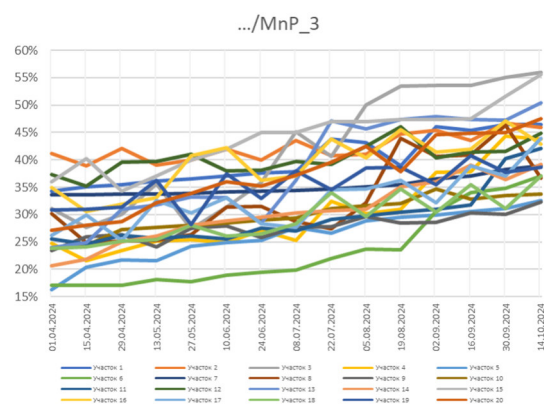
.../MnP_1	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024
Участок 1	50%	51%	52%	53%	54%	55%	56%	56%	59%	58%	58%	65%	64%	66%	66%
Участок 2	64%	60%	66%	61%	63%	65%	62%	69%	64%	64%	71%	73%	70%	75%	75%
Участок 3	39%	37%	38%	44%	43%	45%	49%	48%	48%	52%	59%	59%	56%	57%	59%
Участок 4	45%	40%	41%	46%	46%	48%	50%	47%	53%	57%	58%	59%	62%	66%	67%
Участок 5	36%	38%	40%	39%	45%	46%	46%	48%	48%	49%	50%	51%	52%	52%	55%
Участок 6	28%	28%	28%	30%	29%	31%	32%	33%	38%	41%	40%	44%	49%	51%	55%
Участок 7	49%	49%	49%	49%	49%	50%	50%	50%	51%	51%	52%	54%	55%	58%	59%
Участок 8	46%	43%	44%	44%	46%	47%	47%	51%	48%	49%	51%	54%	54%	56%	55%
Участок 9	38%	42%	43%	39%	45%	46%	43%	48%	48%	52%	49%	50%	54%	53%	58%
Участок 10	30%	30%	35%	36%	36%	37%	38%	39%	44%	45%	45%	51%	47%	48%	48%
Участок 11	40%	39%	42%	41%	41%	40%	44%	43%	48%	48%	50%	51%	52%	59%	62%
Участок 12	60%	57%	65%	66%	64%	63%	64%	69%	67%	73%	75%	70%	72%	72%	78%
Участок 13	35%	36%	38%	39%	42%	41%	41%	45%	48%	48%	52%	50%	50%	51%	56%
Участок 14	35%	37%	42%	44%	49%	50%	52%	53%	54%	54%	57%	59%	59%	60%	59%
Участок 15	50%	51%	48%	52%	53%	51%	55%	54%	55%	55%	64%	63%	62%	68%	75%
Участок 16	54%	57%	60%	65%	65%	64%	65%	67%	70%	71%	71%	72%	73%	73%	73%
Участок 17	30%	30%	29%	36%	30%	37%	37%	33%	39%	40%	42%	43%	46%	51%	55%
Участок 18	33%	34%	36%	37%	44%	38%	39%	43%	46%	46%	48%	48%	49%	49%	52%
Участок 19	44%	45%	45%	46%	45%	49%	49%	50%	49%	51%	51%	51%	53%	53%	55%
Участок 20	45%	46%	47%	54%	58%	61%	60%	64%	69%	65%	65%	69%	69%	70%	74%



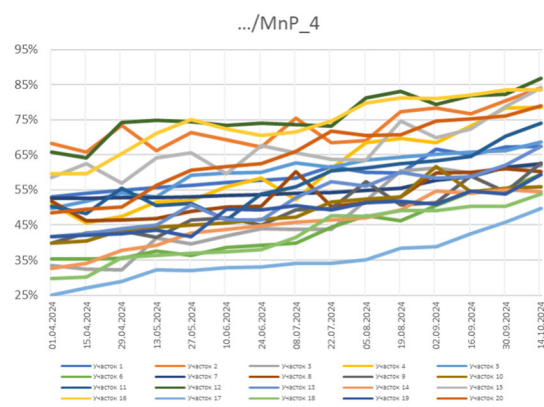
.../MnP_2	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024
Участок 1	53%	54%	54%	55%	56%	56%	57%	58%	62%	59%	59%	67%	64%	67%	68%
Участок 2	67%	65%	71%	65%	69%	68%	67%	73%	68%	69%	75%	77%	76%	79%	83%
Участок 3	30%	30%	30%	39%	37%	40%	41%	42%	42%	49%	55%	56%	55%	57%	56%
Участок 4	50%	45%	47%	51%	52%	54%	57%	52%	60%	68%	69%	69%	72%	77%	78%
Участок 5	45%	47%	51%	48%	55%	56%	56%	59%	58%	60%	61%	61%	62%	63%	66%
Участок 6	35%	35%	36%	39%	36%	40%	40%	41%	45%	48%	47%	50%	54%	56%	60%
Участок 7	52%	52%	52%	53%	53%	53%	54%	54%	55%	55%	59%	60%	64%	64%	65%
Участок 8	47%	43%	43%	44%	47%	48%	48%	56%	48%	49%	51%	58%	58%	59%	58%
Участок 9	35%	37%	38%	37%	42%	43%	42%	45%	46%	53%	47%	48%	55%	52%	60%
Участок 10	37%	38%	40%	41%	41%	42%	43%	44%	48%	48%	49%	57%	50%	51%	52%
Участок 11	50%	47%	54%	50%	51%	47%	54%	53%	60%	61%	62%	63%	64%	70%	73%
Участок 12	60%	59%	68%	68%	68%	68%	68%	68%	68%	75%	76%	74%	77%	78%	83%
Участок 13	41%	42%	44%	44%	49%	46%	46%	51%	56%	54%	58%	57%	58%	59%	65%
Участок 14	38%	39%	42%	44%	48%	49%	50%	51%	52%	52%	54%	58%	58%	59%	59%
Участок 15	55%	58%	53%	60%	61%	56%	63%	61%	60%	60%	70%	67%	68%	74%	80%
Участок 16	62%	62%	66%	71%	74%	73%	71%	72%	75%	79%	80%	80%	81%	83%	83%
Участок 17	28%	27%	28%	32%	32%	33%	34%	34%	36%	37%	39%	40%	45%	47%	52%
Участок 18	30%	31%	35%	36%	43%	37%	38%	42%	47%	47%	48%	48%	49%	50%	54%
Участок 19	47%	48%	48%	49%	47%	54%	53%	55%	54%	55%	56%	55%	59%	58%	62%
Участок 20	50%	51%	52%	59%	61%	62%	63%	67%	72%	70%	70%	74%	75%	75%	78%



.../MnP_3	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024
Участок 1	34%	35%	35%	36%	37%	37%	38%	38%	44%	43%	39%	46%	45%	46%	46%
Участок 2	41%	39%	42%	39%	40%	42%	40%	44%	41%	41%	45%	45%	44%	47%	46%
Участок 3	31%	28%	30%	36%	27%	31%	36%	45%	41%	50%	53%	54%	54%	55%	56%
Участок 4	25%	22%	23%	25%	25%	25%	27%	25%	32%	30%	31%	38%	38%	44%	44%
Участок 5	16%	20%	22%	22%	24%	25%	25%	28%	27%	29%	29%	30%	31%	31%	33%
Участок 6	17%	17%	17%	18%	18%	19%	19%	20%	22%	24%	24%	31%	34%	35%	37%
Участок 7	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	34%	35%	35%	35%	37%	37%	38%	39%
Участок 8	30%	25%	25%	25%	26%	31%	31%	29%	27%	32%	44%	41%	41%	46%	37%
Участок 9	23%	26%	26%	24%	28%	28%	26%	28%	28%	30%	28%	29%	30%	30%	32%
Участок 10	24%	24%	27%	28%	28%	28%	29%	29%	31%	32%	32%	35%	33%	33%	34%
Участок 11	25%	25%	26%	26%	26%	26%	27%	27%	29%	30%	30%	31%	32%	40%	42%
Участок 12	37%	35%	40%	40%	41%	38%	38%	40%	39%	42%	46%	40%	41%	42%	45%
Участок 13	24%	25%	31%	32%	33%	33%	29%	36%	47%	46%	47%	48%	47%	47%	50%
Участок 14	21%	22%	25%	26%	28%	29%	30%	30%	31%	31%	35%	36%	39%	39%	39%
Участок 15	36%	40%	34%	37%	40%	42%	45%	45%	47%	47%	47%	48%	48%	52%	56%
Участок 16	35%	31%	32%	33%	41%	42%	36%	37%	44%	40%	46%	41%	42%	47%	43%
Участок 17	26%	30%	25%	33%	30%	33%	28%	28%	35%	35%	36%	32%	39%	37%	44%
Участок 18	24%	24%	25%	25%	28%	26%	26%	28%	34%	30%	35%	30%	35%	31%	37%
Участок 19	31%	31%	31%	36%	28%	37%	33%	38%	35%	38%	39%	35%	41%	38%	39%
Участок 20	27%	28%	29%	32%	34%	36%	35%	37%	40%	43%	38%	45%	45%	45%	47%



.../MnP_4	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024
Участок 1	53%	54%	55%	56%	56%	57%	58%	58%	62%	60%	60%	67%	65%	67%	68%
Участок 2	68%	66%	73%	66%	71%	69%	67%	75%	69%	69%	77%	78%	77%	80%	84%
Участок 3	34%	32%	32%	41%	40%	42%	44%	44%	44%	52%	60%	61%	60%	61%	62%
Участок 4	51%	46%	47%	52%	52%	56%	58%	52%	61%	68%	70%	68%	73%	78%	79%
Участок 5	50%	52%	54%	53%	59%	60%	60%	63%	62%	64%	64%	65%	66%	66%	69%
Участок 6	35%	35%	35%	38%	36%	39%	39%	40%	44%	48%	46%	51%	54%	55%	59%
Участок 7	53%	53%	53%	53%	53%	53%	54%	54%	54%	55%	55%	58%	59%	61%	63%
Участок 8	52%	46%	47%	47%	49%	50%	50%	60%	50%	51%	53%	60%	60%	61%	60%
Участок 9	40%	43%	43%	41%	46%	47%	45%	49%	50%	57%	51%	51%	59%	55%	63%
Участок 10	40%	40%	44%	44%	45%	46%	47%	47%	52%	52%	53%	62%	54%	55%	56%
Участок 11	50%	48%	55%	51%	51%	46%	54%	56%	60%	61%	62%	63%	65%	70%	74%
Участок 12	66%	64%	74%	75%	74%	73%	74%	74%	73%	81%	83%	79%	82%	82%	87%
Участок 13	42%	42%	44%	45%	51%	46%	46%	53%	57%	56%	60%	58%	59%	62%	68%
Участок 14	33%	34%	38%	39%	43%	44%	45%	46%	46%	47%	49%	55%	54%	55%	54%
Участок 15	59%	63%	57%	64%	66%	60%	68%	66%	64%	64%	75%	70%	72%	79%	84%
Участок 16	60%	60%	65%	71%	75%	72%	70%	72%	75%	80%	81%	81%	82%	83%	83%
Участок 17	25%	27%	29%	32%	32%	33%	33%	34%	34%	35%	38%	39%	42%	46%	50%
Участок 18	30%	30%	36%	36%	37%	37%	38%	41%	48%	48%	49%	49%	50%	50%	54%
Участок 19	42%	42%	43%	44%	42%	50%	49%	50%	49%	51%	52%	51%	55%	54%	59%
Участок 20	48%	49%	50%	56%	61%	62%	62%	66%	72%	71%	71%	75%	75%	76%	79%



СФС	01.04.2024	15.04.2024	29.04.2024	13.05.2024	27.05.2024	10.06.2024	24.06.2024	08.07.2024	22.07.2024	05.08.2024	19.08.2024	02.09.2024	16.09.2024	30.09.2024	14.10.2024
Участок 1	50%	51%	52%	53%	53%	54%	55%	55%	59%	60%	61%	63%	64%	65%	65%
Участок 2	63%	61%	61%	61%	64%	65%	67%	69%	69%	70%	71%	72%	73%	75%	76%
Участок 3	33%	35%	36%	41%	39%	43%	45%	45%	45%	51%	54%	55%	56%	57%	58%
Участок 4	42%	42%	42%	45%	47%	49%	50%	52%	55%	60%	61%	62%	68%	70%	70%
Участок 5	40%	42%	43%	43%	49%	50%	50%	52%	52%	54%	54%	55%	56%	56%	59%
Участок 6	30%	30%	31%	33%	33%	34%	34%	35%	40%	42%	45%	50%	50%	52%	55%
Участок 7	49%	49%	49%	49%	50%	50%	50%	51%	50%	59%	65%	71%	71%	71%	72%
Участок 8	42%	42%	43%	43%	45%	47%	47%	49%	50%	50%	52%	55%	56%	57%	55%
Участок 9	36%	40%	40%	38%	43%	44%	42%	46%	46%	52%	47%	48%	53%	51%	57%
Участок 10	34%	34%	38%	38%	39%	40%	41%	41%	46%	46%	47%	54%	48%	49%	50%
Участок 11	44%	42%	47%	44%	45%	42%	47%	47%	52%	53%	54%	55%	56%	62%	66%
Участок 12	59%	57%	60%	60%	65%	65%	65%	67%	66%	73%	75%	71%	73%	73%	78%
Участок 13	37%	38%	40%	41%	45%	43%	42%	48%	52%	51%	55%	54%	54%	56%	61%
Участок 14	33%	35%	39%	41%	45%	46%	47%	48%	49%	52%	55%	55%	54%	56%	56%
Участок 15	52%	55%	50%	56%	58%	53%	59%	57%	57%	67%	64%	65%	71%	71%	77%
Участок 16	55%	55%	59%	63%	67%	67%	64%	66%	69%	72%	73%	73%	74%	76%	75%
Участок 17	29%	28%	27%	34%	33%	34%	34%	35%	36%	37%	40%	40%	44%	47%	52%
Участок 18	30%	31%	35%	35%	43%	36%	37%	41%	45%	45%	47%	47%	48%	48%	52%
Участок 19	43%	43%	44%	45%	43%	49%	48%	50%	49%	51%	51%	50%	54%	53%	56%
Участок 20	45%	46%	47%	54%	57%	59%	59%	62%	67%	65%	65%	69%	70%	70%	73%
СРЕДНЕЕ	42%	43%	44%	46%	48%	48%	49%	51%	53%	55%	57%	58%	59%	61%	63%

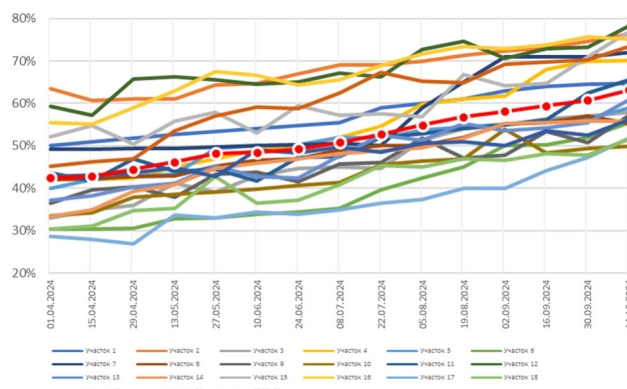


Рисунок 57 – Общая оценка СФС ПРК объекта апробации в период 01/04/2024–26/06/2024 г. с прогнозированием на 14/10/2024 г.

Наиболее значимыми дефектами ПРК исследуемого объекта выявлены отсутствие гидроизоляционного покрытия .../Def_1 (Рисунок 52), раскрытие швов рулонного гидроизоляционного покрытия .../Def_4 (Рисунок 53), складки гидроизоляционного покрытия .../Def_7 (Рисунок 54) и отслоение гидроизоляционного покрытия от вертикальных поверхностей .../Def_11 (Рисунок 55), для которых были выполнены частные оценки влияния дефектов на эксплуатационные состояния СФС в табличном и графическом представлении для использования, соответственно, в аналитической части исследования и в составе информирующей и советующей систем управления ЖЦ ОС.

На основании частных оценок i дефектов с учетом полученных ранее экспертно удельных весов (значимостей) дефектов $\gamma[s][i]$ на том же базовом и прогнозном промежутках времени строились оценки s эксплуатационных состояний .../MnP_ s ПРК (Рисунок 18, этап 2) в табличном и графическом представлении (Рисунок 56). Используя варьируемые удельные веса $\delta[s]$ эксплуатационных состояний в СФС (для апробации были распределены по правилу Фишберна) управляющий ОС получил текущую и прогнозируемую оценку СФС (Рисунок 57) дифференцированно на каждом исследуемом участке ПРК и с учетом относительных размеров участков на всей площадке кровли (Рисунок 18, этап 3).

Полученная общая оценка СФС ПРК позволила оперативно сформировать детальное представление о характере и распределении дефектов, а с прогнозом

их развития — о предполагаемом состоянии ПРК в достоверно экстраполируемый промежуток времени в будущем (при апробации технологии такой промежуток оценен автором в 12 месяцев). Текущие оценки СФС ПРК позволили обеспечить информацией развиваемые на базе технологии АСТД методики информирования управляющего ОС, а прогнозные — сведениями о рациональном составе РВМ и выделяемых на это лимитированных ресурсов, что было особенно важно при планировании бюджета технической эксплуатации зданий гражданского назначения, и в перспективе — муниципальных объектов, находящихся на государственном балансе.

Рационализация мероприятий по восстановлению ПРК реализуется решением следующей оптимизационной задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{СФС} = f(t) \Rightarrow \min; \\ t = 0 \dots \text{ЖЦ}; \\ |R[t]| = \text{var}, \end{array} \right. \quad (15)$$

где $|R[t]|$ — матрица управляющих воздействий (проектных решений, порядка и перечня ремонтируемых участков ПРК), варьируемых в пределах предполагаемых альтернативных вариантов РВМ (разрабатывается в составе типовых технологических карт на производство РВМ ПРК собственником ОС).

Так, в частности, апробация методики на примере МКД в Самаре (Силина. 17) позволила внести изменения в планы управляющей компании по проведению текущего ремонта ПРК предложением рационального состава РВМ и предварительной оценкой затрат, осуществленной по прогнозируемым параметрам развития СФС при вариантном проектировании РВМ (Таблица 18), что позволило снизить стоимость РВМ по отношению к запланированным нормативным расходам на текущий ремонт на 23%, уменьшить площадь ремонтируемой ПРК актуализацией ее фактического и прогнозного состояния на 23%, сократить сроки производства РВМ за счет рационального снижения объемов ремонтируемой ПРК на 58%.

Проведенный в последовавший за производством РВМ промежуток времени 6 месяцев мониторинг СФС установил практически стабилизировавшееся состояние ПРК, оценка изменений за полгода не превысила 4%. Последнее обстоятельство обеспечено за счет приоритетного устранения наиболее значимых дефектов на ключевых участках ПРК, подтвержденного значительным замедление процесса деградации ПРК и позволившим прогнозно увеличить межремонтный промежуток для обследуемой кровли с 10 нормативных [53] до 15 предполагаемых лет, способствуя дополнительному снижению ресурсоемкости ее нормальной эксплуатации.

Таблица 18 – Техничко-экономические показатели этапа проведения ремонтно-восстановительных мероприятий ПРК по ул. Силина, 17 в г. Самаре (01-20 октября 2024 г.), обследованной в период 01/04/2024–26/06/2024 г.

Вариант производства РВМ	Площадь ремонтной ПРК, м ²	Стоимость ремонтной ПРК, млн. руб.	Сроки ремонта ПРК, раб. дн.	Диагностируемое СФС после проведения РВМ	
				через 1 месяц	через 6 месяцев
Плановый	750	2,38	30	—	—
Предложенный	520 ▼23%	1,94 ▼23%	19 ▼58%	25%	26% ▲4%

Примеры апробации и рассмотренные детальные аспекты реализации предлагаемой технологии АСТД ПРК, заключающейся в регулярной полностью автоматизированной дефектоскопии элемента ОС, оценке его СФС и практическом аналитическом и визуальном представлении результатов СТЭ на текущую и прогнозную дату позволяют собственнику ОС принимать технически обоснованные, организационно-экономически эффективные и минимально ресурсоемкие управленческие решения на этапах жизненного ЖЦ ОС с перспективой совершенствования и развития технологии на иные элементы ОС, методически бесшовно интегрируемые в консолидированную ИМ ОС при комплексном обследовании и оптимизации его технического и функционального состояния.

5.4 Выводы по главе 5

1. Инженерное приложение АТСД ПРК практически полезно для обучения ПСНС и целесообразно к использованию в широкой цифровой экспертной практике, при этом формируется динамически актуализируемый, кроссплатформенный, объективный доступный информационный ресурс о текущем и прогнозном состоянии ПРК, существенно расширяющей текущие и перспективные возможности СТЭ, снижающий издержки на ее производство, и повышающий эффективность управленческих решений на этапах ЖЦ ОС. Ключевым аппаратным фактором качества результата предлагаемой АСТД ПРК является повторяемость условий диагностирования, обеспечиваемая программируемой траекторией движения носителя диагностического оборудования БАС и полной автономностью исполнения им полетного задания, обоснованность которого существенно влияет на качество сегментации дефектов и количественные результаты СТЭ.

2. Рекомендованное к использованию в АСТД ПРК аппаратно-программное обеспечение позволяет своевременно, периодически и минимально ресурсоемко осуществлять текущие обследования элемента ОС, выявлять и диагностировать классифицированные дефекты, количественно оценивать их развитие и влияние на состояние ПРК по набору установленных параметров, определять текущее и формировать прогнозное в практически значимой перспективе СФС ПРК. Результаты АСТД ПРК, полученные навесным оборудованием БАС и сформированные приложением документируются в цифровую модель дефекта в ИМ ОС, выносятся для традиционного документооборота в стандартные формы приложений к отчету о проведенной СТЭ и могут быть отформатированы в традиционные офисные табличные форматы для самостоятельного использования или кроссплатформенного обмена информацией в среде общих данных ИМ ОС.

3. Апробация технологии АСТД ПРК в органах государственного управления ЖКФ г. Белгорода и Белгородской области, на эксплуатируемых объектах капитального строительства на территории кампуса БГТУ им. В.Г. Шухова, муниципальных объектах капитального строительства гг. Белгорода и Самары под-

тверждает целесообразность разработки и внедрения инструментов эффективного управления ЖЦ ОС на основе периодического автоматизированного обследования элементов ОС, детектирования и квалиметрии параметров установленных ПСНС дефектов, ретроспективного анализа и интерполяции динамики изменения СФС элементов ОС в течении установленного периода времени, экстраполяции текущего СФС на установленный принимающим решение лицом прогнозный период. Технология позволяет оптимизировать состав РВМ на основании минимального изменения СФС элемента на горизонте планирования или максимального улучшения СФС элемента при фиксированных ресурсах, выделяемых на его эксплуатацию и содержание.

4. Направлением дальнейшего использования совершенствованной учетом фактического и прогнозируемого СФС методики АСТД ПРК становится внесение и периодическая актуализация оценок в ИМ, используемую в эксплуатации ОС на протяжении всего ЖЦ ОС. Расширенная использованием схожих технологий АСТД в отношении иных элементов ОС, периодически актуализируемая ИМ ОС позволит сформировать единую инструментальную и документирующую систему управленческого советования, обеспечивающую эффективное цифровое управление ЖЦ ОС по критерию минимизации ресурсозатрат на изыскания и проведение РВМ, снижающих стоимость владения ОС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Предложен и апробирован термин и алгоритм оценки СФС ПРК, дополняющий используемые понятия ФИ и ТС при производстве СТЭ. Оценка СФС всего ОС как совокупности отдельных конструктивных и функциональных элементов позволяет прогнозировать динамику деструктивных процессов, выражающихся в появлении и развитии дефектов, сравнительно оценивать варианты реализации этапов ЖЦ ОС с ситуативным или целенаправленным поддержанием нормативного СФС.

Дополнены теоретические представления о дефектах элементов ОС как иерархическом классе ИМ, обеспечивающем динамический массив данных о показателях, влияющих на оценку состояния ОС в режиме высокой детализации объекта исследования. Введено структурное описание, апробирован и представлен к использованию иерархический класс ИМ ОС, формализующий описание и аналитическое содержание дефектов, диагностируемых в АСТД ПРК. Выполнено научно-методическое обоснование, осуществлена программная реализация и произведена апробация методики обучения ПСНС, обеспечивающие повышение достоверности АСТД ПРК до 50%.

Предложена и обоснована технология производства АСТД ПРК с использованием БАС и нейросетевых инструментов диагностики дефектов, снижающая ресурсоемкость и сроки производства СТЭ до 5 раз. Представлена технология получения, документирования и архивации цифрового результата АСТД ПРК, дополняющая существующие регламенты СТЭ достоверностью оценки СФС ОС и эффективностью принимаемых управленческих решений по его поддержанию. Разработан и предложен усовершенствованный состав аппаратно-программного обеспечения производства АСТД, позволяющий выполнять произвольно-периодическое обследование и автоматизированную количественную оценку параметров дефектов ПРК в режиме реального времени, документирование результатов, детализированную актуализацию ИМ ОС, обеспечивающую эффективное управления СФС ПРК на этапах ЖЦ ОС.

Предложены математические алгоритмы совершенствования ИМ ОС, расширяющие инструментарий эффективного цифрового управления ЖЦ ОС. Представлены научно-методические подходы к моделированию элемента ОС в составе консолидированной ИМ ОС, обеспечивающей синтез оптимальных управленческих решений в технической эксплуатации здания. Предложена и апробирована методика оценки сравнительной эффективности РВМ по поддержанию СФС ПРК, обеспечивающая рационализацию лимитированных затрат на техническую эксплуатацию ОС и сниженную ресурсоемкость его ЖЦ.

В составе разработанного аппаратно-программного обеспечения и информационного модельного оснащения выполнена АСТД ПРК ряда объектов гражданской недвижимости гг. Белгорода и Самары, позволившая предложить рациональный состав и порядок проведения РВМ текущего ремонта ПРК, что позволило снизить стоимость владения ПРК для собственника ОС на 20%.

Полученные результаты могут быть **рекомендованы** для внедрения в практику экспертной деятельности проектных и изыскательских организаций при производстве строительно-технических экспертиз; для использования в деятельности организаций, осуществляющих техническую эксплуатацию и управление ОС; в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении разработки и обучения нейронных сетей с учетом обширного набора данных о дефектах иных элементов ОС, их параметрах, получаемых в том числе с использованием новых источников информации (тепловизионных, мульти- и гиперспектральных камер, лидаров, контактных датчиков, радиолокаторов и пр.), а также создания комплексных систем эффективного управления ЖЦ ОС в отношении его основных конструктивных и функциональных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 30% застройщиков в стране применяют технологии информационного моделирования // Минстрой России: [сайт]. –2025. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/30-zastroyschikov-v-strane-primenyayut-tekhnologii-informatsionnogo-modelirovaniya/> (дата обращения: 22.01.2025).

2. Activation functions in Neural Networks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/activation-functions-neural-networks/> (дата обращения: 10.05.2023).

3. Application of information modeling tools to create the element base of wall panels of the typical series “Arctic” / M.Yu. Ryazanov, L.D. Panteleenko, A.V. Smetana, A.V. Dolzhenko // International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of the BSTU V.G. Shukhova: Conference materials, Belgorod, April 30, 2021. – Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2021. – Pp. 3794-3801. – EDN: RRIREW.

4. ARCHICAD Training Series Part 2. Conceptual design in ARCHICAD architect [Электронный ресурс]. URL: <http://www.graphisoft.ru/learning/trainingmaterials/training-series/volume-2.html> (дата обращения: 10.11.22).

5. ARCHICAD: RE-OPENING. GDL language: programming for solving architect's problems [Электронный ресурс]. URL: <https://ardexpert.ru/article/10209> (дата обращения: 10.11.22).

6. Benedek, C. Building Extraction and Change Detection in Multitemporal Aerial and Satellite Images in a Joint Stochastic Approach / C. Benedek, X. Descombes, J. Zerubia // RR-7143. – INRIA, 2009.

7. Binda, L. Diagnosis of historic masonry structures using Non-Destructive techniques / L. Binda, L. Cantini, C. Tedeschi // RILEM Bookseries. – 2012. – Vol. 6. – Pp. 1089-1102.

8. Computer Vision Annotation Tool / Инструмент аннотации компьютерного зрения [Электронный ресурс] URL: <https://cvat.org/> (дата обращения: 24.04.2022).

9. CVAT Leading Data Annotation Platform [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cvat.ai/> (дата обращения: 24.04.2022).

10. Cvetkovska, M. Artificial Neural Networks and Fuzzy Neural Networks for Solving Civil Engineering Problems / M. Cvetkovska // Tehnicki Vjesnik-technical Gazette. – 2014. – No. 21(6). – Pp. 1353–1359.

11. Dumoulin, V. A guide to convolution arithmetic for deep learning / V. Dumoulin, F. Visin. – 2016. – arXiv:1603.07285v1.

12. Everingham, M. The PASCAL Visual Object Classes Challenge / M. Everingham, L. Van Gool, C. K. I. Williams, J. Winn, A. Zisserman // International Journal

of Computer Vision. – 2011. – Vol. 88(2). – Pp. 303-338. – DOI:10.1007/s11263-009-0275-4.

13. Gokon, H. Mapping of building damage of the 2011 Tohoku earthquake tsunami in Miyagi prefecture / H. Gokon, S. Koshimura // Coastal Engineering Journal. – 2012. – Vol. 54(1). – Pp. 58-63.

14. Gombos, A.D. Detection of roof boundaries using lidar data and aerial photography / A.D. Gombos // University of Kentucky Master's Theses. – 2010.

15. He, Y. Deep Learning Tutorial for Kaggle Ultrasound Nerve Segmentation competition, using Keras. Xi'an Jiaotong University. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/yihui-he/u-net> (дата обращения: 20.09.2022).

16. Kingma, D.P. Adam: A Method for Stochastic / D.P. Kingma, J. Ba // Optimization 3rd International Conference for Learning Representations. – San Diego, 2015. – arXiv:1412.6980.

17. Kremcheev, E.A. Metrological Support of Monitoring Systems Based on Unmanned Aerial Vehicles / E.A. Kremcheev, A.S. Danilov, Yu.D. Smirnov // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 235. – Pp. 96-105. – DOI: 10.31897/PMI.2019.1.96. – EDN: WABBWQ

18. LeCun, Y. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature. – 2015. – Vol. 521(7553). – Pp. 436-444. – DOI:10.1038/nature14539.

19. Merabet, Y.E. Building Roof Segmentation from Aerial Images Using a Line-and Region-Based Watershed Segmentation Technique / Y.E. Merabet, C. Meurie, Y. Ruichek, A. Sbihi, R. Touahni // Sensors (Basel). – 2015. – Vol. 15(2). – Pp. 3172-3203. – DOI:10.3390/s150203172.

20. Morgenthal, G. Quality assessment of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based visual inspection of structures / G. Morgenthal, N. Hallermann // Advances in Structural Engineering. – 2014. – Vol. 17(3). – Pp. 289-302.

21. Object Detection with Deep Neural Networks for Reinforcement Learning in the Task of Autonomous Vehicles Path Planning at the Intersection / D.A. Yudin, A. Krishtopik, I. Belkin [et al.] // Optical Memory and Neural Networks. – 2019. – Vol. 28, No. 4. – P. 283-295. – DOI: 10.3103/S1060992X19040118. – EDN: UCHGBP.

22. Obolewicz, Jerzy & Baryłka, Adam. Life cycle engineering of a construction object / J. Obolewicz, A. Baryłka // *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych*. – 2021. – Pp. 11-20. – DOI: 10.37105/iboa.115.
23. Puttemans, S. Detection of photovoltaic installations in rgb aerial imaging: a comparative study / S. Puttemans, W. Van Ranst, T. Goedeme. – 2015.
24. Reference Guide GDL / Graphisoft, a Nemetschek company. – 2019. – 700 p.
25. Rezanov, A. Deep Neural Networks for Orthophoto-Based Vehicle Localization / A. Rezanov, D. Yudin // *Studies in Computational Intelligence*. – 2021. – Vol. 925 SCI. – Pp. 167-174. – DOI: 10.1007/978-3-030-60577-3_19. – EDN: TOBLCF.
26. Road Image Segmentation using Unmanned Aerial Vehicle Images and DeepLab V3+ Semantic Segmentation Model / M.N. Mahmud, M.K. Osman, A.P. Ismail et al. // *Proceedings - 2021 11th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2021: Conference materials, Penang, August 27-28, 2021*. – Penang, 2021. – Pp. 176-181.
27. Ronneberger, O. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*. – Springer, 2015. – LNCS 9351. – Pp. 234-241.
28. Roof Defect Segmentation on Aerial Images Using Neural Networks / D.A. Yudin, V. Adeshkin, A.V. Dolzhenko [et al.] // *Studies in Computational Intelligence*. – 2021. – Vol. 925 SCI. – Pp. 175-183. – DOI: 10.1007/978-3-030-60577-3_20. – EDN: OPHRID.
29. Shelhamer, E. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation / E. Shelhamer, J. Long, T. Darrell // *PAMI*. – 2016. – arXiv:1605.06211.
30. Stewart, M.G. Reliability safety assessment of corroding reinforced concrete structures based on visual inspection information / M.G. Stewart // *ACI Structural Journal*. – 2010. – Vol. 107(6). – Pp. 671-679.

31. Stockton, G.B. Using infrared thermography in flat and low-sloped roofing systems / G.B. Stockton // Journal of the National Institute of building sciences. – 2014. – Pp. 16-19.
32. Tenžera, D. Visual inspection in evaluation of bridge condition / D. Tenžera, G. Puž, J. Radiæ // Gradjevinar. – 2012. – Vol. 64(9). – Pp. 717-726.
33. Vargas, R. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Select and Prioritize Projects in a Portfolio / R. Vargas // Russian Project Management Conference (Русская конференция Управление проектами). – Moscow, Russia Federation, 2010. – URL:<https://rvarg.as/2y/>
34. Vizilter, Y.V. Processing and analysis of images in machine vision tasks: lecture course and practice / Y.V. Vizilter, S.Y. Zheltov, A.V. Bondarenko, M.V. Ososkov, A.V. Morzhin // Fizmatkniga. – 2010. – 672 p.
35. Yudin, D. Software for roof defects recognition on aerial photographs / D. Yudin, A. Naumov, A. Dolzhenko // Journal of Physics: Conference Series. – Tomsk, 2018. – P. 032152.
36. Yudin, D.A. Segmentation of sintering images using texture analysis based on self-organized maps / D.A. Yudin, V.Z. Magergut // Information technologies. – 2013. – Vol. 5. – Pp. 65-70.
37. Zheleznov, M. A lifecycle management system for capital construction facilities based on a digital cloud platform implementing information modeling methods and technologies / M. Zheleznov // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 281. – P. 04007.
38. Zheleznov, M. Development of the information modeling (BIM) concept using Big Data technologies for the implementation of the life cycle management system for capital construction of transport infrastructure / M. Zheleznov // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 281. – P. 04010.
39. Анализ объективности применения BIM-технологий в строительстве / С.Г. Шеина, В.Я. Мищенко, Ю.Д. Сергеев [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2024. – №4(112). – С. 354-367.

40. Афанасьев, А.А. Реконструкция жилых зданий. Часть I. Технологии восстановления эксплуатационной надежности жилых зданий / А.А. Афанасьев, Е.П. Матвеев. – Санкт-Петербург: Сфера, 2008.

41. Барабаш, М.С. Принципы параметрического моделирования строительных объектов / М.С. Барабаш, Е.И. Киевская // Современное строительство и архитектура. – 2016. – №1(01). – С. 16-22. – DOI: 10.18454/mca.2016.01.4. – EDN: VVYVLB

42. Бардакова, Ю.И. Автоматизация элементов проектной деятельности в ПК ARCHICAD параметрическим моделированием в среде GDL / Ю.И. Бардакова // Образование. Наука. Производство: материалы XIII Международного молодежного форума, Белгород, 8-9 октября 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 610-616. – EDN: OPNZUE.

43. Башков, В.С. Оценка функционального (морального) устаревания зданий и сооружений // Ценообразование и сметное нормирование в строительстве. – 2006. – №1.

44. Белкин, Р.С. Ленинская теория отражения и методологические проблемы советской криминалистики / Р.С. Белкин. – Москва, 1970.

45. Бойко, М.Д. Техническое обслуживание и ремонт зданий и сооружений: справочное пособие / М.Д. Бойко, А.И. Мураховский, В.З. Величкин и др. – Москва: Стройиздат, 1993.

46. Бородин, А.В. Применение сверточных нейронных сетей для решения задачи распознавания изображений / А.В. Бородин, А.А. Крыловецкий // Сборник студенческих научных работ факультета компьютерных наук ВГУ / Воронежский государственный университет. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2024. – Выпуск 12.

47. Брунов, П.Е. Экономические аспекты оценки износа зданий в системе управления недвижимостью: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук: 08.00.05. – Москва, 2004. – 139 с. – EDN NMUSTH.

48. Вагнер, Е.А. Применение современных эффективных методов и технических средств при проведении экспертизы ремонтно-строительных работ / Е.А. Вагнер, П.Д. Матишова, И.Ю. Зильберова // Наука молодых - будущее России: сборник научных статей 8-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 12–13 декабря 2023 года. – Курск: Университетская книга, 2023. – С. 34-36.

49. Васильев, А.А. Анализ существующей оценки физического износа конструкций зданий и сооружений / А.А. Васильев // OPEN INNOVATION: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 23 апреля 2019 года. – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 36-38. – EDN ZCYIVN.

50. Винберг, А.И. Общая характеристика методов экспертного исследования / А.И. Винберг, А.Р. Шляхов // Общее учение о методах судебной экспертизы: сборник научных трудов. – Москва: ВНИИСЭ, 1977. – Выпуск 28. – С. 54-94.

51. ВСН 53-86 Правила оценки физического износа жилых зданий: ведомственные строительные нормы: дата введения 1987-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Госстрой СССР, 1987.

52. ВСН 57-88(р) Положение по техническому обследованию жилых зданий: ведомственные строительные нормы. М: ФГУП ЦПП, 2006. - 92 с.

53. ВСН 58-88 (р). Положение об организации и проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания зданий, объектов коммунального и социально-культурного назначения: ведомственные строительные нормы: дата введения 1989-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Госстрой СССР, 1989.

54. Выявление и классификация дефектов строительных конструкций по установленным критериям эксплуатационного износа / В.Я. Мищенко, С.Г. Шеина, Ю.Д. Сергеев [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2024. – №2(110). – С. 520-535.

55. Гафаров, Ф.М. Искусственные нейронные сети и приложения: учебное пособие / Ф.М. Гафаров, А.Ф. Галимянов. – Казань: Издательство Казанского университета, 2018. – 121 с.

56. Гиря, Л.В. Искусственный интеллект при управлении объектами капитального строительства / Л.В. Гиря, В.М. Колесников // Строительство и архитектура – 2024: Материалы международной научно-практической конференции факультета промышленного и гражданского строительства, Ростов-на-Дону, 17–19 апреля 2024 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2024. – С. 41-43.

57. Гиря, Л.В. Методы оценки физического износа зданий и сооружений при их оценке / Л.В. Гиря, А.А. Гарькавский // Строительство и архитектура – 2022: материалы международной научно-практической конференции факультета промышленного и гражданского строительства, Ростов-на-Дону, 19–21 апреля 2022 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2022.

58. Гнам, П.А. Анализ методик технического обследования объектов с целью определения их физического износа / П.А. Гнам // AlfaBuild. – 2019. – №4(11). – С. 7-22. – EDN RQVYXK.

59. Гнам, П.А. Оценка износа и функциональных характеристик зданий при проведении капитального ремонта / П.А. Гнам // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы V Международной научно-практической конференции: в 2 частях, Комсомольск-на-Амуре, 29–30 ноября 2017 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2018. – С. 498-507. – EDN TFSSVS.

60. Горбанева, Е.П. Отечественный и зарубежный опыт разработки и внедрения инструментов информатизации строительной отрасли / Е.П. Горбанева, И.А. Косовцева // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: Материалы VI Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 19–21 апреля 2023 года / Под общей редакцией А.А. Семенова. – Санкт-

Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 3-12. – DOI 10.23968/BIMAC.2023.001. – EDN JWRRVQ.

61. Горбанева, Е.П. Развитие информационного моделирования в строительной отрасли / Е.П. Горбанева, И.А. Косовцева // Технологии, машины и оборудование для проектирования, строительства объектов АПК: сборник научных статей Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров, Курск, 15 марта 2023 года. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова, 2023. – С. 182-188. – EDN NPJCHW.

62. Гордеева, О.Г. Расчетно-экспериментальные методы экспресс-оценки физического износа и остаточного ресурса зданий и сооружений: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.26.02. – Новогорск: Академия гражданской защиты МЧС России, 2002.

63. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: межгосударственный стандарт: дата введения 2013-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 35 с.

64. ГОСТ 15467-79 (СТ СЭВ 3519-81). Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 26.01.1979 №244: дата введения 1979-07-01.

65. ГОСТ 17624-2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: межгосударственный стандарт: дата введения 2014-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

66. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности: межгосударственный стандарт: дата введения 2012-09-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 15 с.

67. ГОСТ 21.201-2011. СПДС. Условные графические изображения элементов зданий, сооружений и конструкций: межгосударственный стандарт: дата введения 2013-05-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 24 с.

68. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований: межгосударственный стандарт: дата введения 2015-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 23 с.

69. ГОСТ 28570-90. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций: межгосударственный стандарт: дата введения 2013-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 32 с.

70. ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния: межгосударственный стандарт: дата введения 2024-05-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2024. – 104 с.

71. ГОСТ 4.200-78. Система показателей качества продукции. Строительство. Основные положения: межгосударственный стандарт: утвержден Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 25.10.1978 №208: дата введения 1979-07-01.

72. ГОСТ Р 10.0.05-2019. Структура информации об объектах строительства. Часть 2: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2019-09-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 25 с.

73. ГОСТ Р 21.1101-2013. СПДС. Основные требования к проектной и рабочей документации: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2014-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 70 с.

74. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2011-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 104 с.

75. ГОСТ Р 56510-2015. Метрологическое обеспечение в области неразрушающего контроля: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2016-06-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 8 с.

76. ГОСТ Р 58908.1-2020. Промышленные системы, установки, оборудование и промышленная продукция. принципы структурирования и коды Часть 1. Основные правила», рассказывающих про принципы классификации и кодирования строительных элементов: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2020-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 77 с.

77. ГОСТ Р 58908.12-2020. Промышленные системы, установки, оборудование и промышленная продукция. принципы структурирования и коды. Часть 12. Объекты капитального строительства и системы инженерно-технического обеспечения: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2021-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 56 с.

78. ГОСТ Р 8.619-2006. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2007-03-04 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 14 с.

79. ГОСТ Р 8.794-2012. Сканеры лазерные наземные. Методика поверки: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2014-06-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 15 с.

80. ГОСТ Р 8.913-2016. Дальномеры спутниковые лазерные. Погрешность и неопределенность измерений. Нормируемые метрологические характеристики: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2019-03-04 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 15 с.

81. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 28.09.2015 №1390-ст: дата введения 2015-11-01 // Стандартинформ, 2015.

82. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Требования: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 28.09.2015 №1391-ст: дата введения 2015-11-01 // М.: Стандартинформ, 2015.

83. Грибовский, С.В. Математические методы оценки стоимости недвижимого имущества / С.В. Грибовский, С.А. Сивец. – М.: Финансы и статистика, 2008. – 368 с.

84. Долженко, А.В. Повышение качества управления жизненным циклом плоских рулонных кровель совершенствованием инструментов оценки их физического износа / А.В. Долженко, А.Е. Наумов, О.А. Щенятский // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – №6. – С. 48–54. – DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-6-48-54.

85. Долженкова, М.В. Прогнозирование долговечности кровельных битумно-полимерных композитов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05. – Воронеж, 2005. – 169 с. – EDN: NNQJUD.

86. Евтушенко, С.И. Дефекты и повреждения конструкций кровли производственных зданий / С.И. Евтушенко, Т.А. Крахмальний // Строительство и архитектура. – 2022. – Т. 10, №1. – С. 2-5. – DOI 10.29039/2308-0191-2021-10-1-2-5. – EDN ZNAYDG.

87. Емельянов, А.В. Анализ методов семантической сегментации изображений на основе нейронных сетей / А.В. Емельянов // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2019. – Т. 12-1. – С. 195-201.

88. Жолобова, О.А. Современные методы выявления скрытых протечек в рулонных кровлях / О.А. Жолобова, А.Л. Жолобов // Строительство, новые технологии, новое оборудование. – 2010. – №2. – С. 23-26.

89. Зильберова, И.Ю. Перспективы применения современных средств автоматизации в строительно-технической экспертизе / И.Ю. Зильберова, В.А. Бобкина, Р.Д. Зильберов // Актуальные проблемы науки и техники. 2024: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 19–21 марта 2024 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2024. – С. 248.

90. Зиновьев, А.Ю. Комплекс мер по развитию информатизации и автоматизации строительно-технических экспертиз / А.Ю. Зиновьев, Л.А. Опарина, Н.В. Лазарева // Всероссийский информационно-аналитический и научно-технический журнал Русский инженер. – 2021. – №02 (71).

91. Зиновьев, А.Ю. Организация строительно-технической экспертизы объектов капитального строительства на основе информатизации производственных процессов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.02.22. – 2022. – 160 с. – EDN URQYPP.

92. Ибрагимов, А.М. Зависимость между физическим износом и техническим состоянием элементов зданий жилищного фонда / А.М. Ибрагимов, А.С. Семенов // Жилищное строительство. – 2014. – №7. – С. 53. – EDN SHOSAR.

93. Иванников, В.В. О дефектах рулонной кровли / В.В. Иванников, А.Г. Николаев, В.М. Шварц [и др.] // Химическая техника. – 2015. – №3. – С. 39. – EDN TTLYBF.

94. Иванова, Н.Н. Предложения по расширению области применения цифровой фотографии при оценке состояния строительных конструкций / Н.Н. Иванова, О.А. Жолобова // Интернет-журнал Науковедение. – 2012. – №3(12). – С. 94. – EDN PVUZZD.

95. Использование технологий информационного моделирования при обследовании объектов культурного наследия / А.О. Попов, И.Н. Гарькин, Л.С. Сабитов, Э.Ю. Абдуллазянов // Инженерные исследования. – 2024. – №1(16). – С. 23-29. – EDN DCFAQZ.
96. Карпенко, А.В. Анализ понятий и методик определения физического износа применительно к назначению ремонтов зданий / А.В. Карпенко, И.В. Хомякова // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2024. – №3(75). – С. 24-34. – DOI 10.36622/2541-7592.2024.75.3.002. – EDN NUFXKG.
97. Классификатор основных видов дефектов в строительстве и промышленности строительных материалов / Госстрой России. – М., 1993.
98. Классификация и кодирование информационных моделей объектов капитального строительства промышленного назначения. Методическое пособие / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <http://ksi.faufcc.ru/method.php> (дата обращения: 12.07.2023).
99. Ключникова, О.В. Возможности применения нейронных сетей в современной строительной индустрии / О.В. Ключникова, Е.Е. Александров // Строительство и архитектура – 2022: материалы международной научно-практической конференции факультета промышленного и гражданского строительства, Ростов-на-Дону, 19–21 апреля 2022 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2022. – С. 222-225.
100. Кожемяка, С.В. Влияние дефектов кровель промышленных зданий на технико-экономические показатели их ремонта / С.В. Кожемяка, В.А. Мазур // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2012. – №6(98). – С. 25-32. – EDN FRUNEB.
101. КСИ, часть 1. Зарубежный опыт КСИ [Электронный ресурс]. URL: <https://exinco.ru/news/zarubezhnyy-opyt-klassifikatsii-stroitelnoy-informatsii/> (дата обращения: 24.04.2022)

102. КСИ, часть 2. Проблемы КСИ и методы их решения [Электронный ресурс]. URL: <https://exinco.ru/news/ksi-chast-2-problemy-ksi-i-metody-ikh-resheniya/> (дата обращения: 24.04.2022).

103. Лapidус, А.А. Искусственные нейронные сети как инструмент оптимизации производственных процессов в строительстве / А.А. Лapidус, И. Ндайирагидже // Технология и организация строительного производства. – 2018. – №4. – С. 3–6.

104. Литвинова, О.В. Совершенствование методов определения физического износа зданий и сооружений / О.В. Литвинова, А.А. Толкачева, Е.И. Малгатаева // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2019. – Т. 9, №2. – С. 120-124. – EDN YZOUKO.

105. Лукин, М.И. Обзор дефектов и повреждений ограждающей конструкции плоской кровли / М.И. Лукин // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – №5-1. – С. 46-49. – EDN YKOICV.

106. Манастырный, Д.Н. Использование искусственного интеллекта в строительной индустрии / Д.Н. Манастырный // Актуальные проблемы технических и естественных наук в России и за рубежом: сборник научных статей. – Москва: Издательский дом «НАУКА И СОЦИУМ», 2024. – С. 132-134.

107. Методика выявления дефектов и оценки эксплуатационных свойств кровель железобетонных крыш жилых зданий / ЦНИИЭП Жилища. – М.: Стройиздат, 1985. – 61 с.

108. Методические рекомендации Главгосэкспертизы по экспертной оценке BIM-моделей / Методические рекомендации по подготовке информационной модели объекта капитального строительства [Электронный ресурс]. URL: gge.ru (дата обращения: 12.07.2023).

109. Мищенко, А.В. Применение технологий информационного моделирования на всех этапах проектирования жизненного цикла объекта недвижимости / А.В. Мищенко, Е.П. Горбанева // Организация строительного производства: Материалы II Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 04–05

февраля 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – С. 195-206. – EDN IHLLWE.

110. Морозов, А. С. Организация и проведение обследования технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений / А.С. Морозов, В.В. Ремнева, Г.П. Тонких и др. – М., 2001.

111. Наумов, А.Е. Рациональное целеполагание в планировании градостроительной политики на основе метода анализа иерархий / А.Е. Наумов, М.А. Щенятская, А.В. Шарапова // Недвижимость: экономика, управление. – 2017. – №2. – С. 47-50. – EDN: ZXLZJV.

112. Наумов, А.Е. Совершенствование технологии проведения строительно-технических экспертиз с использованием аппаратно-программного комплекса автоматизированной дефектоскопии / А.Е. Наумов, Д.А. Юдин, А.В. Долженко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2019. – №4. – С. 61-69. – DOI: 10.34031/article_5cb824d26344e7.45899508.

113. Нормативное регулирование и опыт внедрения BIM на различных этапах жизненного цикла объекта строительства в России / С.Г. Шеина, С.Л. Шуйков // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2023. – Т. 2, №1. – С. 4-11.

114. Опарина, Л.А. Организация претензионно-исковой работы в строительстве / Л.А. Опарина, А.Ю. Зиновьев, Н.В. Лазарева // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – №11. – С. 71-76.

115. Определение технического состояния строительных конструкций методом максимального правдоподобия / С.Г. Шеина, В.Я. Мищенко, Ю.Д. Сергеев [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2024. – №2(110). – С. 408-425.

116. Орлова, А.Я. История развития информационного моделирования зданий и сооружений / А.Я. Орлова, Г.А. Никишина // Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева (Саранск). – 2020.

117. Основы психофизиологии: учебник / отв. ред. Ю.И. Александров. – Москва: ИНФРА-М, 1997. – 349 с.

118. Оценка применения BIM-технологий в строительстве [Электронный ресурс]. URL: https://www.nopriz.ru/upload/iblock/2cc/4.7_bim_rf_otchet.pdf (дата обращения: 20.02.2024).

119. Пантелеенко, Л.Д. Преимущества применения GDL-языка в дизайне и проектировании строительных конструкций / Л.Д. Пантелеенко // Образование. Наука. Производство: материалы XIII Международного молодежного форума, Белгород, 8-9 октября 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 471-475. – EDN: KECWKR.

120. Перспективы применения BIM-технологий на всех стадиях жизненного цикла инвестиционно-строительного проекта / И.Ю. Зильберова, И.В. Новоселова, В.Д. Маилян [и др.] // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2023. – Т. 2, №1. – С. 44-53. – DOI 10.23947/2949-1835-2023-2-1-44-54.

121. Положение об авторском надзоре за строительством зданий и сооружений: свод правил: утвержден Приказом Минстроя России от 19.02.2016 №98/пр // Информационный бюллетень о нормативной, методической и типовой проектной документации. №5, 2016.

122. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий / АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ». - М., 1997.

123. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий / АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ». - М., 2004.

124. Применение информационных технологий в процессе обследования жилых зданий / Э.В. Морозов, Н.В. Лисиченко, М.О. Кузнецов, С.Е. Васильева // Экономика и предпринимательство. – 2020. – №3(116). – С. 981-983. – DOI 10.34925/EIP.2020.116.3.207. – EDN JLCZWN.

125. Ракитов, А.И. Анатомия научного знания / А.И. Ракитов. – Москва, 1969.

126. РД-22-01-97. Требования к проведению оценки безопасности эксплуатации производственных зданий и сооружений поднадзорных промышленных производств и объектов (обследование строительных конструкций специализированными организациями): руководящий документ / Госгортехнадзор России. – Изд. официальное. – Москва: ГП НИИПИ, 1997. – 27 с.

127. Результаты исследования эффективности применения BIM-технологий в инвестиционно-строительных проектах российских компаний // НОПРИЗ: официальный сайт. – URL: https://www.nopriz.ru/upload/iblock/2cc/4.7_bim_rf_otchot.pdf.

128. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций по внешним признакам / В.В. Гранев, В.Т. Ильин, А.М. Туголуков, А.Н. Добромыслов. - Москва: ЦНИИПРОМЗДАНИЙ, 2001. - 46 с.

129. Российская Федерация. Законы. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон №190-ФЗ [принят Государственной Думой 22 дек. 2004 г.: одобрен Советом Федерации 24 дек. 2004 г.]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс.

130. Российская Федерация. Законы. О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации: Федеральный закон №73-ФЗ [принят Государственной Думой 05 апр. 2001 г.: одобрен Советом Федерации 16 мая 2001 г.].

131. Российская Федерация. Законы. О порядке проведения строительного контроля при осуществлении строительства, реконструкции и капитального ремонта объектов капитального строительства: Постановление Правительства Российской Федерации №468 [принят Государственной Думой 18 июня 2010 г.: одобрен Советом Федерации 21 июня 2010 г.] // Собрание законодательства РФ. 2010, №26, ст. 3365 // Российская Бизнес-газета, №27, 2010;

132. Российская Федерация. Законы. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию: Постановление Правительства Рос-

сийской Федерации №87 [принят Государственной Думой 18 июня 2008 г.: одобрен Советом Федерации 21 июня 2008 г.] // Собрание законодательства РФ. 2008, №8, ст. 744 // Российская газета. №41, 2008.

133. Российская Федерация. Законы. О техническом регулировании: Федеральный закон №184-ФЗ [принят Государственной Думой 15 дек. 2002 г.: одобрен Советом Федерации 18 дек. 2002 г.]. - Российская газета, №245, 2002 // Парламентская газета. №1-2, 2003.

134. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон №384-ФЗ: [принят Государственной Думой 23 дек. 2009 г.: одобрен Советом Федерации 25 дек. 2009 г.]. – Москва: Проспект; Санкт-Петербург: Кодекс, 2009. – 21 с.

135. Российская Федерация. Постановления Правительства. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию: Постановление Правительства Российской Федерации №87 [принят ГД 18 июня 2008 г.: одобрен СФ 21 июня 2008 г.] // Собрание законодательства РФ. 2008, №8, ст. 744 // Российская газета. №41, 2008.

136. Российская Федерация. Постановления Правительства. Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов, а также о внесении изменения в пункт 6 Положения о выполнении инженерных изысканий для подготовки проектной документации, строительства, реконструкции объектов капитального строительства: Постановление Правительства Российской Федерации №1431 [принят ГД 15 сентября 2020 г.].

137. Рощина, С.И. Особенности технической эксплуатации зданий и сооружений: учебное пособие / С.И. Рощина. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2014. – 119 с.

138. Саати, Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати. – Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.
139. Савицкий, В.В. О физическом износе зданий / В.В. Савицкий // Жилищное строительство. – 1985. – №4.
140. Савченко, Р. Н. Основные принципы и особенности BIM технологии / Р.Н. Савченко // Вопросы науки и образования. – 2018. – №27(39). – С. 26-29. – EDN: YPMJLV.
141. Седашова, М.А. Методы GDL-программирования при информационном моделировании строительных конструкций / М.А. Седашова, Д.С. Руденский // Международная научно-техническая конференция молодых ученых, Белгород, 25-27 мая 2020 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 1891-1895. – EDN: NLBIEV.
142. Семантическая сегментация изображений в проекте «Duckietown» / Д.Е. Шабалина, К.С. Ланчуковская, Т.В. Лях, К.В. Чайка // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2021. – Т. 19, №3. – С. 26-39. – DOI: 10.25205/1818-7900-2021-19-3-26-39.
143. Семенов, А.С. Организация технического обследования зданий жилищного фонда для выполнения работ по капитальному ремонту, модернизации и реконструкции: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.02.22. – Иваново, 2011.
144. Симионова, Н.Е. Методы оценки и технической экспертизы недвижимости: учебное пособие / Н.Е. Симионова. – М.: ИКЦ «Март», 2006. - 447 с.
145. СП 13-102-2003 Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений: свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2003-08-21 / ФГУП «КТБ ЖБ», 2003. – 31 с.
146. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции: актуализированная редакция СНиП II-23-81*: свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2011-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 144 с.

147. СП 2.13130.2009 Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты: свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2009-05-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2009. – 80 с.

148. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия: актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*: свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2017-07-04 / Минстрой России, 2016. – 147 с.

149. СП 22.13330.2011 Основания зданий и сооружений»: актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*: свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2011-05-20 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 166 с.

150. СП 4.13130.2013 Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям: свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2013-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 96 с.

151. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»: актуализированная редакция СНиП 52-01-2003: свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2013-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 148 с.

152. СП 70.13330.2012 Несущие и ограждающие конструкции»: актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87: свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2013-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 230 с.

153. СП 71.13330.2011 Изоляционные и отделочные покрытия: актуализированная редакция СНиП 3.04.01-87: свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2011-07-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 128 с.

154. СП 72.13330.2016 Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии: свод правил по проектированию и строительству: дата введения 2017-06-17 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 64 с.

155. СТО НКС 4.1-2022. Эксплуатация и техническое обслуживание крыш с кровлями из рулонных и мастичных материалов. – М., 2022.

156. Стражников, А.М. Научные основы, разработка и реализация системы мониторинга жилищного фонда в мегаполисах: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.02.22. – Москва: Московский институт коммунального хозяйства и строительства, 2003. - 118 с.

157. Текутов, А.В. Влияние разрушения отдельных конструктивных элементов на общее техническое состояние эксплуатируемых зданий и сооружений / А.В. Текутов, М.Н. Шутова // Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений: материалы 15-ой международной научно-практической конференции, Новочеркасск, 30 октября 2015 года / Ответственный редактор Г.М. Скибин. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 2015. – С. 112-114. – EDN VSRDTL.

158. Травин, В.И. Капитальный ремонт и реконструкция жилых зданий: учебное пособие для архитектурных и строительных спец. вузов / В.И. Травин. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2002. – 256 с.

159. Требования к информационным моделям объектов капитального строительства. Часть 1. Общие требования к цифровым информационным моделям зданий для прохождения экспертизы при использовании технологии информационного моделирования. Редакция 4.1 [Электронный ресурс]. URL: https://www.mos.ru/mke/documents/prikazy/view/244254_220 (дата обращения: 12.07.2023).

160. Указания по технической эксплуатации крыш жилых зданий с рулонными, мастичными и стальными кровлями / Минжилкомхоз РСФСР. - М.: Стройиздат, 1987. - 76 с.

161. Улыбин, А.В. Качество визуального обследования зданий и сооружений и методика его выполнения / А.В. Улыбин, Н.И. Ватин // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – №10(25). – С. 134-146. – EDN: TBGDTL

162. Хайдар, А.Н.А.Д. Методика использования георадиолокации для контроля исправности конструкций на протяжении их жизненного цикла / А.Н.А.Д. Хайдар, М.М. Железнов // Строительство и архитектура. – 2023. – Т. 11, №1. – С. 10. – DOI 10.29039/2308-0191-2022-11-1-9-9.

163. Черноиван, Н.В. Оценка технического состояния кровель крупнопанельных жилых зданий, возведенных в Беларуси до 1993 г / Н.В. Черноиван // Наука и техника. – 2025. – Т. 24, №2. – С. 134-142. – DOI 10.21122/2227-1031-2025-24-2-134-142. – EDN JCINMT.

164. Черняк, Г.Е. Контроль параметров эксплуатационных качеств физкультурно-оздоровительных и спортивных зданий и сооружений / Г.Е. Черняк, И.В. Харламов, С. А. Кулигин. – Барнаул: АлтГТУ, 2010.

165. Шеина, С.Г. Методические и организационные основы стоимостной оценки физического износа жилых зданий / С.Г. Шеина // Жилищное строительство. – 2008. – №7. – С. 24-25. – EDN JVNSSP.

166. Шестериков, Ю.А. Информационные системы и технологии обследования зданий и сооружений / Ю.А. Шестериков, О.А. Стифеева // Транспортные сооружения. – 2020. – Т. 7, №1. – С. 4. – DOI 10.15862/05SATS120. – EDN DDFIVZ.

167. Шеховцов, Г.А. Теоретические основы бесконтактного фотографического способа измерения расстояний при определении деформаций инженерных сооружений / Г.А. Шеховцов, О.В. Раскаткина // Приволжский научный журнал. – 2019. – №2(50). – С. 44-51.

168. Шитов, А.А. Исследование эксплуатационных свойств конструкций кровель из наплавливаемых рулонных материалов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.01. – Москва: [б.и.], 2001. – 131 с. – EDN QDKPFP.

169. Эбзеев, М.Б. Организация контроля эксплуатационного качества зданий и сооружений // Материалы Международной научно-практической конференции ВСГУТУ. – Улан-Удэ: Издательство ВСГУТУ, 2012. – С. 20-22.

170. Юдин, Д.А. Программный комплекс автоматизированной разметки изображений с применением нейросетевого детектирования объектов / Д.А. Юдин, В.В. Прахов // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений. Распознавание 2019: сборник материалов XV Международной научно-технической конференции, Курск, 14–17 мая 2019 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 205-207. – EDN: RTETTX.

171. Ярцев, В.П. Влияние эксплуатационных факторов на долговечность кровельных битумных материалов / В.П. Ярцев, М.В. Долженкова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2004. – Т. 10, №4-2. – С. 1088-1093. – EDN: PWWXED.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Приложение А. Титульный лист «Стандарт организации на производство
автоматизированной строительно-технической дефектоскопии плоских ру-
лонных кровель»**

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
"ЧУКОТСТРОЙИНВЕСТ"**

689000, Чукотский АО, г Анадырь, ул Отке, 44, пом 1, ИНН 8709907805
КПП 870901001, ОГРН 1188709000150

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «ЧукотСтройИнвест»

В.В. Зотиков



«___» ___ 2025 г.

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

на производство автоматизированной строительно-технической дефектоскопии
плоских рулонных кровель

РАЗРАБОТАНО

Канд. техн. наук, доцент

А.Е. Наумов

«___» ___ 2025 г.

Инженер-исследователь

А.В. Долженко

«___» ___ 2025 г.

Белгород 2025 г.

**Приложение Б. Акты о внедрении результатов
научно-исследовательской работы**

Общества с ограниченной ответственностью «ЧУКОТСТРОЙИНВЕСТ»
689000, ЧАО, г. Анадырь, ул. Отке, д. 44, пом. 1, т. 8(924)665-77-82
ИНН 8709907805 КПП 870901001 ОГРН 1188709000150

от 28.04.2025 №34

на № от

**Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы
«Управление жизненным циклом объекта строительства
автоматизированной строительно-технической экспертизой плоских
рулонных кровель», представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук,
Долженко Александра Валериевича**

рассмотрев результаты научно-исследовательской работы Долженко Александра Валериевича под руководством кандидата технических наук, доцента Наумова Андрея Евгеньевича, отмечает актуальность и практическую значимость проведенных исследований.

Результаты научно-исследовательской работы Долженко А.В., представленные:

- усовершенствованным составом аппаратно-программного обеспечения производства автоматизированной строительно-технической дефектоскопии;
- технологией получения, документирования и архивации цифрового результата автоматизированной строительно-технической дефектоскопии плоских рулонных кровель;
- технологией производства автоматизированной строительно-технической дефектоскопии плоских рулонных кровель с использованием беспилотных авиационных систем и нейросетевых инструментов диагностики дефектов;
- методикой количественной оценки сравнительной эффективности мероприятий по поддержанию удовлетворительного технического и функционального состояния плоских рулонных кровель;

внедрены при производстве строительно-технических экспертиз пяти объектов капитального строительства на территории г. Анадырь, Чукотского автономного округа.

Результатом внедрения технологии автоматизированной строительно-технической дефектоскопии плоских рулонных кровель является повышение достоверности результатов более чем на 50%, а также пятикратное снижение сроков производства экспертиз. Низкая трудоемкость и себестоимость производства экспертиз позволяет своевременно выявлять ухудшение технического состояния кровель и предпринимать мероприятия по устранению выявленных дефектов и повреждений, существенно снижать стоимость эксплуатации зданий в климатических условиях Крайнего Севера.

Директор ООО «ЧСИ»



В.В.Зотиков



**Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы
«Управление жизненным циклом объекта строительства
автоматизированной строительно-технической экспертизой плоских
рулонных кровель», представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук,
Долженко Александра Валериевича**

Общество с ограниченной ответственностью «Дроноскан Рус», рассмотрев результаты научно-исследовательской работы Долженко Александра Валериевича под руководством кандидата технических наук, доцента Наумова Андрея Евгеньевича, отмечает актуальность, научную и практическую значимость проведенных исследований.

Разработанная методика количественной оценки сравнительной эффективности мероприятий по поддержанию удовлетворительного технического и функционального состояния плоских рулонных кровель, в составе аппаратно-программного обеспечения и информационного модельного оснащения использована для автоматизированной строительно-технической дефектоскопии десяти объектов гражданской недвижимости г. Самары, и позволила предложить рациональный состав и порядок проведения мероприятий текущего ремонта плоских рулонных кровель, что снизило стоимость работ до 20%.

Проведенное диссертационное исследование Долженко А.В. можно охарактеризовать как законченную и научно-обоснованную работу, которая станет эффективным подспорьем в совершенствовании научно-практических основ управления жизненным циклом объектов капитального строительства, позволит повысить достоверность производства строительно-технических экспертиз за счет применения новых инструментов получения, документирования и архивации цифрового результата.

ООО «Дроноскан Рус»
Генеральный директор Шеховцов Р.В.

28.04.2025



Приложение В. Справка о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:



Первый проректор

д-р техн. наук, проф.

____ Е.И. Евтушенко

«27» марта 2025 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс

Теоретические положения диссертационной работы Долженко А.В. на тему «Управление жизненным циклом объекта строительства автоматизированной строительно-технической экспертизой плоских рулонных кровель» используется в учебном процессе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» при подготовке студентов бакалавриата, обучающихся по направлению 08.03.01 «Строительство», образовательной программы «Экспертиза и управление недвижимостью», что отражено в рабочих программах дисциплин «Основы строительно-технической экспертизы», «Управление объектами недвижимости» и образовательной программы «Информационно-строительный инжиниринг», что отражено в рабочей программе дисциплины «Технический анализ строительных объектов», а также студентов магистратуры, обучающихся по направлению 08.04.01 «Строительство», образовательной программы «Организация информационного моделирования в строительстве», что отражено в рабочей программе «Инструментальные методы исследования», а также образовательной программы «Судебная строительно-техническая и стоимостная экспертиза», что отражено в рабочей программе «Инструментальные методы исследования».

Директор инженерно-строительного
института, д-р техн. наук, профессор

В.А. Уваров

Зав. кафедрой экспертизы
и управления недвижимостью,
канд. техн. наук, доцент

А.Е. Наумов