

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**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Белгород – 2025**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

- Научный руководитель: **Наумов Андрей Евгеньевич**,  
кандидат технических наук, доцент
- Официальные оппоненты: **Железнов Максим Максимович**,  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
- Горбанева Елена Петровна**,  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии, организации строительства, экспертизы и управления недвижимостью ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
- Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Защита состоится 16 сентября 2025 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214 ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте [https://gos\\_att.bstu.ru/dis/dolzhenko](https://gos_att.bstu.ru/dis/dolzhenko)

Автореферат разослан \_\_\_ июля 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



С.М. Есипов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 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 технологиях информационного моделирования. 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 соответствующая 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, полагаемыми 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.** Теоретическими основами исследования стали труды отечественных и зарубежных ученых в области организации эксплуатации и обследования технического состояния объектов недвижимости, информационного моделирования 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 ремонтно-восстановительных мероприятий (РВМ) для его дальнейшей безопасной эксплуатации. 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 её полевого производства, инструментов нейросетевого распознавания дефектов, информационного моделирования и прогнозирования их развития.

**Цель работы.** Разработка научно обоснованной технологии производства автоматизированной СТД ПРК, повышающей эффективность производства СТЭ 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, его 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 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 новым иерархическим классом объектов – дефектами ПРК, расширяющим инструментарий цифрового управления ЖЦ ОС.

Осуществлена программная реализация методики обучения глубокой

свёрточной 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 отдельном иерархическом классе 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 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 кровель являются методики обучения анализа глубоких (полных) свёрточных нейронных сетей на представительной выборке цифровых результатов изысканий (дасете).

**Положения, выносимые на защиту:**

- классификатор дефектов ПРК, комплементарный классификатору строительной информации, и технология параметрического моделирования дефектов ПРК как отдельного 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 минимизации 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 работы.** Основные положения диссертационной работы были представлены на 4-ой международной научной конференции «Интеллектуальные информационные технологии для промышленности» (ИТИ, 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-ТЕСН» (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 аппаратно-программной 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 пп. 5, 7 паспорта научной специальности 2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства.

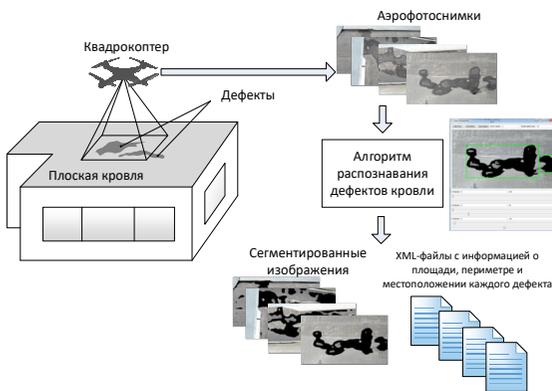
## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Качество управления ЖЦ ОС зависит от эффективности оценки технического состояния его элементов, осуществляемой СТЭ, включающей СТД. Дефекты элементов ОС находятся в тесном взаиморазвитии, ухудшая техническое состояние ОС, поэтому повышение достоверности СТД является важной задачей управления ЖЦ ОС. СТД элементов ОС осуществляется вручную, в связи с чем методики получения результата излишне упрощены, шаблонизированы, субъективны в оценках фактического состояния ОС. В этой связи перспективны исследования, связанные с совершенствованием методик СТД как в аспекте достоверности и качества цифрового результата, так и алгоритмов построения прогнозных оценок развития дефектов.

Ранее выполненными исследованиями доказана возможность и эффективность нейросетевого распознавания дефектов ПРК, выраженных визуально и распределенных преимущественно на поверхности элемента. Цифровые параметры дефектов, вносимых в ИМ ОС отдельным иерархическим классом, позволяют оценить динамику их развития, оценить текущее и прогнозное состояние ПРК. В этой связи *рабочей гипотезой* исследования

явилось предположение о наличии математической связи СФС ПРК с количественными показателями развития дефектов, прогнозирования СФС ПРК, выбора на этой основе рационального состава и сроков производства РВМ, возможности повышения эффективности управления ЖЦ ОС при помощи АСТД.

Внешний характер дефектов, большое количество измерительной работы, труднодоступность или невозможность близкого (прямого) наблюдения ПРК, недружелюбная среда производства изысканий и ограниченность восприятия визуальной информации делают рациональным использование в АСТД беспилотных авиационных систем (БАС) с навесным оборудованием, обеспечивающим максимальную детализацию и информационный объем исследования. В АСТД ПРК использовался ряд БАС, на последнем этапе апробации – квадрокоптер DJI Matrice 300/350 RTK, оснащенный RTK-модулем, многофункциональной видео и тепловизионной камерой DJI Zenmuse H30T и лидаром DJI Zenmuse L2. Модульность аппарата позволяет адаптировать его под задачи периодических, плановых изысканий по заданному полетному заданию или ситуационный мониторинг, выполняемый в режиме реального времени в ручном управлении.



**Рис. 1.** Нейросетевые инструменты АСТД ПРК

В работе предложена и апробирована технология АСТД ПРК, включающая следующие этапы производства изысканий (рис. 1):

– комплектация БАС рациональным составом навесного оборудования, обеспечивающего визуальную, мультиспектральную и термографическую

идентификацию дефектов ПРК, их геотегирование;

– каталогизация диагностируемых дефектов;

– формализация представлений о техническом состоянии, функциональном износе, работоспособности, долговечности и ремонтпригодности ПРК в интегрированный показатель СФС;

– ранжирование дефектов ПРК по степени влияния на СФС;

– обучение нейросети, диагностирующей дефекты;

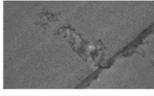
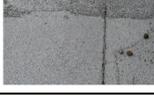
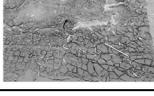
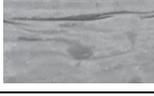
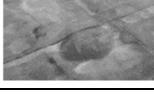
– включение в ИМ ОС параметрических моделей дефектов ПРК, оценка и прогнозирование их развития;

– формирование рационального состава РВМ, направленных на сохранение СФС ПРК минимальной ресурсоемкости.

Каталогизация дефектов ПРК осуществляется исходя из условий устройства и эксплуатации кровельных материалов. Каталог дефектов, представленных на уровне отдельно вводимого иерархического класса ИМ (табл. 1), 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 работ по его устранению.

Высокая детализация и объем изображений БАС, содержащих диагностируемые дефекты, обосновывает рациональность использования инструментов нейросетевого детектирования и квалиметрии.

**Таблица 1** – Каталогизация дефектов, применяемая при АСТД ПРК

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

Дефект	Иерархический класс ИМ	Пример диагностируемого изображения	Уровень воздействия
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

Рациональным подходом при обнаружении каталогизированных дефектов ПРК является анализ бинаризованного одноканального изображения, получаемого на основе порогового RGB-HSV преобразования, выбираемого опытно-итерационно, учитывая оптические свойства анализируемой поверхности и условия ее освещенности в момент фотографирования. Алгоритм сегментации изображения с дефектами 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.

4. Отыскание на полученном бинаризованном одноканальном изображении 8-связных областей использованием двухпроходного алгоритма.

5. Ранжирование найденных связных областей по пороговой величине площади области, отсечение 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 при информационном моделировании, динамическом и сметном анализе результатов проведенной диагностики.

Реализация описанного алгоритма была осуществлена с помощью библиотеки Keras в python 3.5. Приложение позволяет отлаживать эмпирические характеристики распознавания, визуально анализировать результаты диагностики на загружаемых аэрофотоснимках, редактировать получаемые бинаризованные изображения для дифференцированного назначения существенно отличающихся порогов яркости.

При выборе архитектуры нейронной сети учитывались подходы, доказавшие свою эффективность на задаче сегментации изображений на обучающей выборке размеченных изображений PASCAL VOC, содержащей 21 различных тип пикселей. К ним относится обучение глубоких полностью свёрточных нейронных сетей FCN, содержащих 13 (FCN13) и 17 (FCN17) свёрточных слоев (рис. 2).

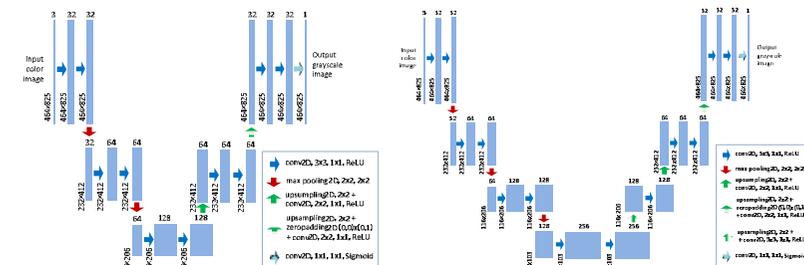


Рис. 2. Архитектура глубокой свёрточной нейронной сети для сегментации изображений с 13 (FCN13) и 17 (FCN17) свёрточными слоями

Для демонстрации возможностей обучения и проверки работоспособности свёрточных нейронных сетей использовался стартовый датасет из 35 изображений 464×825 пкс с размеченными на них дефектами, из которых к обучающей выборке отнесены 33 изображения, к валидационной – 2. Количественным параметром оценки качества работы реализованных в системе алгоритмов сегментации является мера *Dice*:

$$Dice = \frac{2 \cdot (Y_{GT}, Y_P) + \varepsilon}{(Y_{GT}, Y_{GT}) + (Y_P, Y_P) + \varepsilon} \quad (1)$$

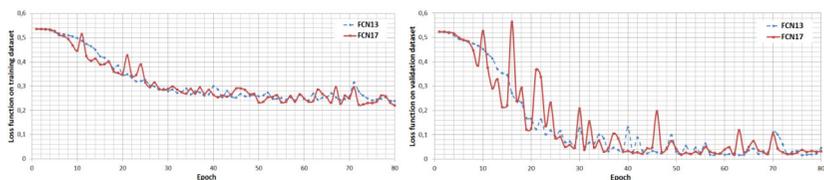
где  $(Y_{GT}, Y_P)$  – скалярное произведение вектора  $Y_{GT}$ , содержащего «истинную» сегментацию изображения, представленную в виде одномерного массива, и вектора  $Y_P$ , содержащего результат сегментации с помощью применяемого алгоритма, представленный в виде одномерного массива. Каждый элемент 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 (величина  $(Y_{GT}, Y_P)$  эквивалентна площади пересечения двух областей);  $(Y_{GT}, Y_{GT})$  – то же, эквивалентна площади истинных областей, содержащих дефекты;

$(Y_P, Y_P)$  – то же, эквивалентна площади областей с дефектами, найденных с помощью алгоритма,

$\varepsilon$  – величина, равная единице (пикселю), необходимая для учета случаев отсутствия на изображении истинных и найденных областей с дефектами.

Процесс обучения свёрточной нейронной сети был выполнен с помощью оптимизатора Adam с коэффициентом скорости обучения 0,00001. Для тестирования выбраны веса, получившиеся на 73 эпохе сети FCN17, функция потерь  $Loss = 1 - Dice$  на обучающей выборке составляет 0,224, функция потерь на валидационной выборке равна 0,021 (рис. 3, 4). Общее время обучения на 80 эпохах составило менее 20 мин, при скорости распознавания до 7 кадров/сек. Результаты обучения продемонстрировали, что даже при небольшом объеме обучающей выборки полностью свёрточные нейронные сети обучаются до приемлемого качества сегментации ( $Dice$  для FCN17 достигает 0,78, для FCN13 – 0,76), обеспечивая применимость в АСТД ПРК.



**Рис. 3.** Предапробационное обучение глубокой полностью свёрточной нейронной сети в течение 80 эпох: слева – функция потерь на обучающей выборке, справа – функция потерь на тестовой выборке



**Рис. 4.** Примеры распознавания дефектов (.../Def\_9) с использованием глубокой полностью свёрточной нейронной сети: слева – исходное изображение; в центре – подготовленная бинарная маска; справа – оцененный по параметрам дефект

Собранные количественные данные о дефекте позволяют информационно и визуально реализовать его в составе ИМ ОС отдельным иерархическим классом объектов. Расширение ИМ библиотечными элементами дефектов было выполнено в среде визуального программирования Rhino, взаимодействующего с ТИМ ПО Archicad через внешний плагин

Grasshopper. Библиотечные элементы содержат как необходимые для анализа и архивации информационные поля, так и автоматически генерируемое пространственное представление в выбранном масштабе времени ЖЦ (рис. 5), позволяющее выполнить качественный экспресс-анализ СФС.

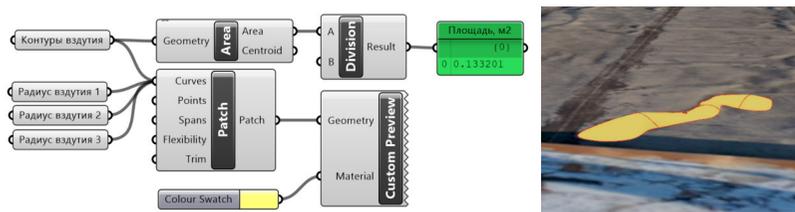


Рис. 5. Параметрический алгоритм Rhino+Grasshopper и визуализация в ИМ дефекта ПРК (.../Def\_8)

Использование АСТД допускает любую детализацию ПРК на участки исследования при установке полетного задания БАС (рис. 6). Оценка дефектов в АСТД осуществляется на каждом участке отдельно, частные оценки по участкам собираются в общую интегральную оценку по всей ПРК, в том же разрешении (до участка) используются инструменты визуального и количественного анализа СФС. Представленный подход, помимо универсальности и простоты формализации СТД еще и схож с используемыми при обследовании ПРК нормативными картами дефектов (рис. 7), что позволит реализовать алгоритм в текущей изыскательской практике.

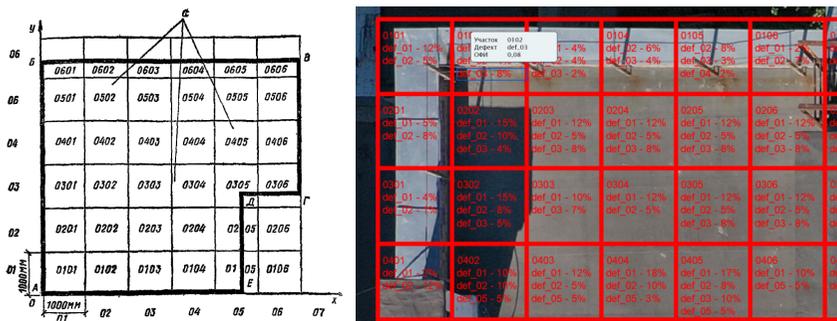


Рис. 6. Практическая работа в инженерном приложении АСТД ПРК: слева – полетное задание БАС; справа – актуализируемая карта установленных дефектов

В процессе АСТД каждый из каталогизированных дефектов  $\dots/Def_i$  диагностируется на участках ПРК по  $j=1 \dots m$  параметрам:

- $\dots/Par_1$  – площадь, занимаемая дефектом в горизонтальной проекции на плоскость ПРК, %;
- $\dots/Par_2$  – 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 – слой А-В; 2 – слой А-Д; 3 – слой А-І.



**Рис. 7.** Пример карты дефектов, рекомендуемой действующими нормами (слева) и используемой в АСТД ПРК (справа): А–Е – границы контуров обследуемой ПРК; 0101-0606 – шифр участка, .../Def  $i$  – детектируемые дефекты;  $n\%$  – количественная оценка текущего параметра дефекта на площади исследуемого участка

**Таблица 2** – 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	0	0	.../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

Действия с массивом оценок параметров дефектов (принять или отвергнуть оценку) для каждого дефекта назначаются параметрической маской .../Def  $i/M[j]$  (табл. 2), конструирующей индивидуальную выборку параметров по каждому из исследуемых дефектов в соответствии с задачами АСТД. Ранжирование каталогизированных дефектов по степени влияния на СФС осуществлено группой привлеченных отраслевых экспертов методом анализа иерархий исходя из опыта оценки характера развития дефектов и повреждений. Результат нормализованного ранжирования дефектов по эксплуатационным состояниям .../MnP $_s$  (герметичность, долговечность, ремонтпригодность, работоспособность) (рис. 8), позволяет количественно связать интегральную оценку СФС с частными оценками дефектов по каждому из .../MnP $_s$ .

Согласно разработанному алгоритму (рис. 9) оценка СФС ПРК строится на оценке удельных весов  $\delta[s]$  эксплуатационных состояний ПРК .../MnP $_s$  ( $s = 1...r$ ) на каждом из  $k$  ( $k = 1...m$ ) участков ПРК.

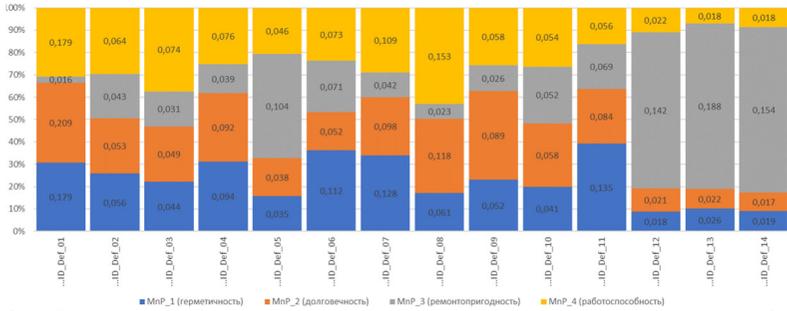


Рис. 8. Нормализованное ранжирование классифицированных дефектов ПРК .../Def<sub>i</sub> по эксплуатационным состояниям .../MnP<sub>s</sub>

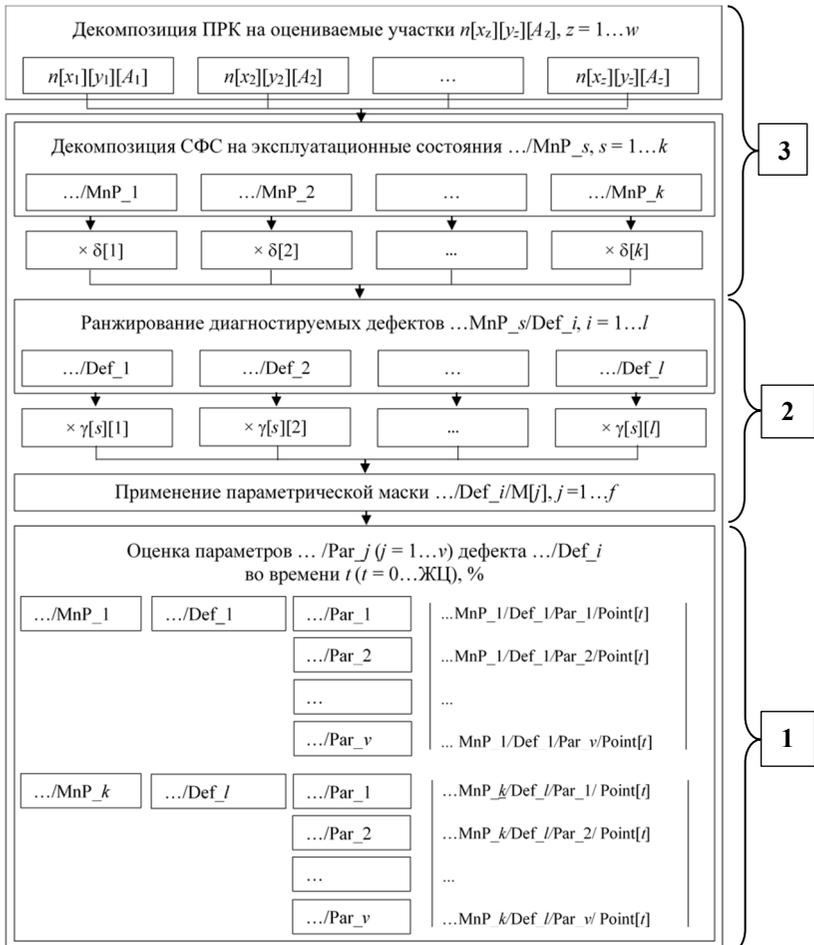


Рис. 9. Алгоритм оценки СФС ПРК по этапам (обозначения см. ф. (2))

Оценка производится диагностикой и количественной оценкой дефектов  $\dots/Def\_i$  по эксплуатационным параметрам  $\dots/Def\_i/Par\_j$ , определяемым в текущее время ЖЦ (время производства АСТД  $t = 0 \dots \text{ЖЦ}$ ) по установленной процентной шкале  $\dots/Def\_i/Par\_j/MnP\_s/Point[t]$  (этап 1). С использованием назначаемых экспертно и варьируемых в дальнейшем по опыту ЛПП параметрической маски (отклика на оценку)  $M[j]$  параметров дефекта  $\dots/Par\_j$ , удельных весов  $\gamma[s][i]$  классифицированных дефектов  $\dots/Def\_i$  (этап 2), удельных весов  $\delta[s]$  эксплуатационных состояний  $\dots/MnP\_s$  (этап 3) осуществляется свертка полученных частных оценок ЭС в интегральную оценку СФС ПРК:

$$\text{СФС} = \delta[s] \sum_{s=1}^k a[z] \sum_{z=1}^w \gamma[s][i] \sum_{i=1}^l M[j] \sum_{j=1}^f \dots/MnP\_s/Def\_i/Par\_j/Point[t], \quad (2)$$

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

$\delta[s]$  – удельные веса (значимости) эксплуатационных состояний  $\dots/MnP\_s$  в общей оценке СФС ПРК (назначаются экспертно), %;

$z$  – 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 по координатам центра участка в ЛСК и площади  $n[x_z][y_z][A_z]$ , %;

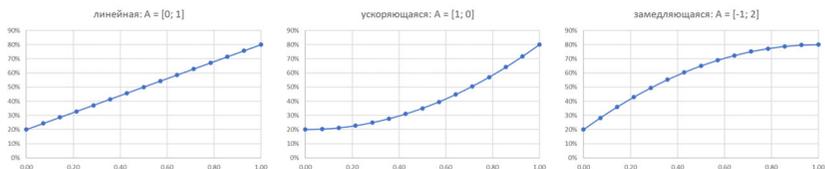
$\dots/Def\_i$  – дефект ПРК ( $i = 1 \dots f$ ), оцениваемый во влиянии на СФС;

$\dots/Par\_j$  – количественный/качественный параметр дефекта ПРК ( $j = 1 \dots v$ );

$\dots/Point[t]$  – автоматизировано осуществляемые оценки влияния дефектов  $\dots/Def\_i$  по параметрам  $\dots/Par\_j$  на СФС, %;

$\gamma[s][i]$  – удельные веса (значимости) классифицированных дефектов  $\dots/Def\_i$  во влиянии на  $\dots/MnP\_s$  в общей оценке СФС ПРК (назначаются экспертно), %;

$M[j]$  – параметрическая маска (применимость  $j$ -го параметра к оценке  $i$ -го дефекта,  $M[j] = 0/1$ ).



**Рис. 10.** Квадратные полиномы, используемые для прогнозирования состояния дефектов экстраполяцией

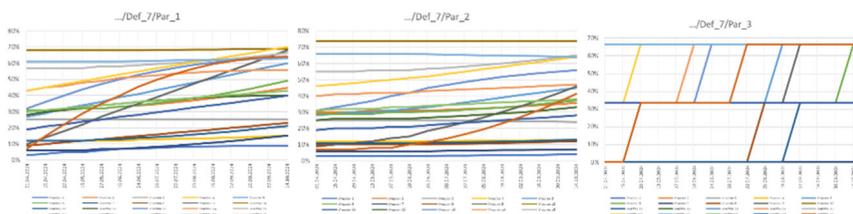
Произведенная оценка СФС, сформированная частными оценками  $\dots/MnP\_s$  во времени  $t = 0 \dots \text{ЖЦ}$  позволяет осуществить прогнозирование состояния дефектов экстраполяцией, для которой использовались квадратные полиномы вида:

$$\dots/\text{MnP\_s}/\text{Def\_i}/\text{Par\_j}/\text{Point}[t] = A[1]t^2 + A[2]t, \quad (3)$$

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, рис. 10), с лучшим МНК соответствием интерполируемой динамике ( $R^2 > 0,9$ ).

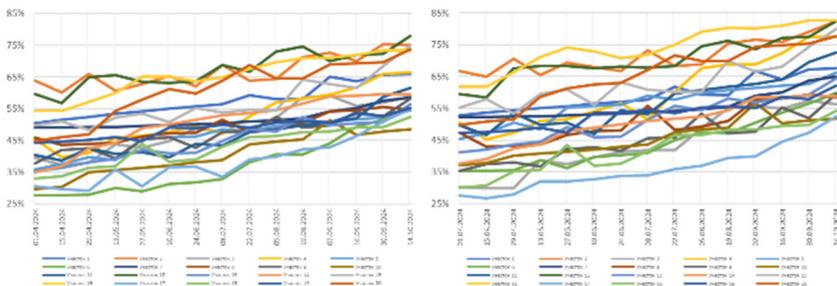
Алгоритм оценки СФС ПРК (2) апробирован для следующих условий проведения ( $k$  – число эксплуатационных состояний  $\dots/\text{MnP\_s}$  декомпозиции СФС:  $k=4$ ;  $l$  – число диагностируемых дефектов  $\dots/\text{Def\_i}$ :  $l = 14$ ;  $v$  – число диагностических параметров дефектов  $\dots/\text{Par\_j}$ :  $v = 4$ ) на примере ОС гражданского назначения 1975-1985 гг. строительства г. Белгорода и Самары с кровлями, находящимися в эксплуатации 10 и более лет, в связи с чем выборку объектов и состояние их ПРК можно считать представительными для демонстрации работоспособности технологии. Поверхность ПРК в зависимости от очертаний ОС в плане декомпозировалась на 20-30 близких по площади участков исследования, в связи с чем удельные веса  $a[z]$  участков выбирались равными. Для каждого из классифицированных дефектов  $\dots/\text{Def\_i}$  определялись частные оценки  $\dots/\text{MnP\_s}$  по параметрам  $\dots/\text{Par\_j}$  с дискретизацией в 1% ( $\dots/\text{Par\_01}$ ,  $\dots/\text{Par\_02}$ ) и 33% ( $\dots/\text{Par\_03}$ ,  $\dots/\text{Par\_04}$ ), что связано с практически достигаемой на момент апробации инструментальной точностью и принятой шкалой оценки параметра.

Пример частных оценок  $\dots/\text{MnP\_s}$  ПРК, определявшихся дважды в месяц на одном из ОС (МКД по ул. Силина, 17 в г. Самаре) в период 01/04/2024–26/06/2024 г. с прогнозированием на 14/10/2024 г. по параметрам дефектов  $\dots/\text{Def\_i}$  (этап 1), диагностируемым с различным уровнем дискретизации, представлен на рис. 11.

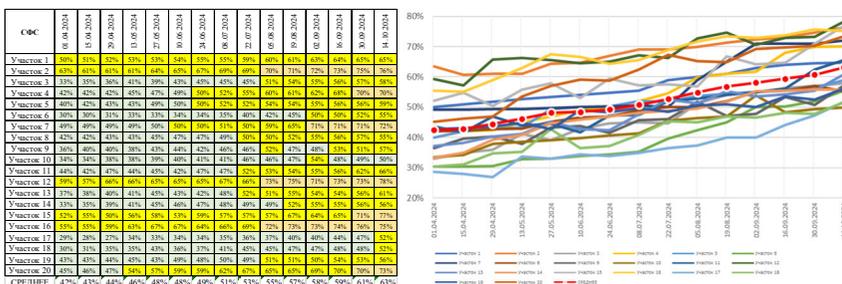


**Рис. 11.** Частные оценки  $\dots/\text{MnP\_s}$  по параметрам дефекта  $\dots/\text{Def\_7}$  в период 01/04/2024–26/06/2024 г. с прогнозированием на 14/10/2024 г.

Частные оценки  $\dots/\text{MnP\_s}$  ПРК объекта в тот же период времени представлены на рис. 12 (этап 2). Варьируемые удельные веса  $\delta[s]$  (для апробации были распределены по правилу Фишберна) позволили получить текущую и прогнозируемую оценку дифференцированно на каждом исследуемом участке ПРК и с учетом относительных размеров участков на всей площади кровли обследуемого здания (рис. 13, этап 3).



**Рис. 12.** Оценки .../MnP\_01 и .../MnP\_02 в период 01/04/2024–26/06/2024 г. с прогнозированием на 14/10/2024 г.



**Рис. 13** – Общая оценка СФС ПРК в период 01/04/2024–26/06/2024 г. с прогнозированием на 14/10/2024 г.

Полученная общая оценка СФС ПРК позволяет сформировать детальное представление о текущем и предполагаемом состоянии ПРК в достоверно экстраполируемый промежуток времени в будущем (при апробации технологии такой промежуток оценен в 12 месяцев). Текущие оценки полагаются в основу перспективных инструментов информирования управляющего ЖЦ, прогнозные оценки позволяют планировать оптимальный состав и порядок производства РВМ, своевременно и рационально выделять на них лимитированные ресурсы, что особенно важно при финансировании эксплуатации ОС, находящихся на государственном балансе. Рационализация мероприятий по восстановлению ПРК реализуется решением следующей оптимизационной задачи:

$$\begin{cases} \text{СФС} = f(t) \Rightarrow \min; \\ t = 0 \dots \text{ЖЦ}; \\ |R[t]| = \text{var}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $|R[t]|$  – матрица управляющих воздействий (проектных решений, порядка и перечня ремонтируемых участков ПРК), варьируемых в пределах предполагаемых альтернативных вариантов РВМ.

Так, в частности, апробация методики на примере МКД в г. Самаре позволила по прогнозируемому развитию дефектов решением оптимизационной задачи (4) внести изменения в планы управляющей компании по проведению текущего ремонта ПРК, предложив его рациональный состав (табл. 3), что позволило снизить стоимость ремонта ПРК на 23%, уменьшить площадь ремонтируемой ПРК актуализацией ее фактического и прогнозного состояния на 44%, сократить сроки производства РВМ за счет рационального снижения объемов на 58%.

Проведенный в последовавший за производством РВМ промежуток времени 6 месяцев мониторинг СФС ПРК установил практически стабилизировавшееся состояния, оценка изменений за полгода не превысила 4%. Последнее обстоятельство обеспечено за счет приоритетного устранения наиболее значимых дефектов на ключевых участках кровли, что подтвердило значительное замедления процесса деградации ПРК и позволило прогнозно увеличить межремонтный промежуток для обследуемой кровли с 10 нормативных до 15 предполагаемых лет, что способствует дополнительному снижению ресурсоемкости нормальной эксплуатации ПРК.

**Таблица 3** – 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 ремонтируемой ПРК, м <sup>2</sup>	Стоимость ремонтируемой ПРК, млн. руб.	Сроки ремонта ПРК, раб. дн.	Диагностируемое СФС после проведения РВМ	
				через 1 мес.	через 6 мес.
Плановый	750	2,38	30	–	–
Принятый	520 ▼44%	1,94 ▼23%	19 ▼58%	25%	26% ▲4%

Таким образом, предлагаемая технология АСТД ПРК, заключающаяся в регулярной полностью автоматизированной дефектоскопии элемента, оценке состояния его функционального соответствия и практически удобном аналитическом и визуальном представлении результатов на текущую и прогнозную перспективу позволяет собственнику ОС принимать технически обоснованные, организационно-экономически эффективные и минимально ресурсоемкие управленческие решения на этапах ЖЦ ОС.

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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги выполненного исследования.** Предложен и апробирован термин и алгоритм оценки СФС ПРК, дополняющий используемые понятия физического износа и технического состояния 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 новом 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 новый иерархический класс объектов ИМ ОС, формализующий описание и аналитическое содержание дефектов, диагностируемых в составе СТД ПРК. Выполнено научно-методическое обоснование, осуществлена программная реализация и произведена апробация методики обучения глубокой сверточной нейронной сети, 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, расширяющие инструментарий эффективного цифрового управления ЖЦ ОС. Представлены научно-методические подходы к моделированию ПРК как элемента консолидированной ИМ ОС, обеспечивающего выбор оптимальных управленческих решений в технической эксплуатации. Предложена и апробирована методика количественной оценки сравнительной эффективности мероприятий по поддержанию СФС ПРК, обеспечивающая рационализацию лимитированных затрат на техническую эксплуатацию.

Для апробации разработанного аппаратно-программного обеспечения и информационного модельного оснащения выполнена АСТД ПРК ряда объектов гражданской недвижимости г. Белгорода, Белгородской области,

г. Самары, позволившая предложить рациональный состав и порядок проведения мероприятий текущего ремонта ПРК, что позволило снизить стоимость владения ПРК для собственника 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 интегрированных советующих систем эффективного управления ЖЦ ОС в отношении его основных конструктивных и функциональных элементов.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК*

1. 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.

2. Наумов, А.Е. Интеллектуализация технологических процессов строительно-технической экспертизы / А.Е. Наумов, Д.А. Юдин, **А.В. Долженко** [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – №12. – С. 28-38. – DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-12-28-38.

3. **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 Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – №6. – С. 48-54. – DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-6-48-54.

4. **Долженко, А.В.** Интеллектуализация строительно-технической экспертизы кровель как инструмент управления ее жизненным циклом / А.В. Долженко, А.Е. Наумов, В.В. Строкова // Строительство и архитектура. – 2023. – Т. 11, № 2. – С. 42-50. – DOI 10.29039/2308-0191-2023-11-2-5-5.

5. **Долженко, А.В.** Совершенствование методики цифровой оценки физического износа плоских рулонных кровель / В.В. Строкова, Р.В. Лесовик, А.Е. Наумов [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, №6. – 9 с.

6. **Долженко, А.В.** Рационализация строительно-технической экспертизы цифровыми инструментами / А.В. Долженко, А.Е. Наумов, М.А. Щенятская // Недвижимость: экономика, управление. – 2024. – № S4. – С. 226-234.

### *В сборниках трудов конференций*

7. Software for roof defects recognition on aerial photographs / D. Yudin, A. Naumov, **A. Dolzhenko** [et al.] // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1015 (2018) 032152. – 9 p. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/3/032152.

8. Yudin, D. A. The usage of grayscale or color images for facial expression recognition with deep neural networks / D.A. Yudin, **A.V. Dolzhenko**, E.O. Kapustina // Studies in Computational Intelligence. – 2020. – Vol. 856. – P. 271-281. – DOI 10.1007/978-3-030-30425-6\_32.

9. Yudin, D. Age and Gender Recognition on Imbalanced Dataset of Face Images with Deep Learning / D. Yudin, M. Shchendrygin, **A. Dolzhenko** // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1156. – P. 30-40. – DOI 10.1007/978-3-030-50097-9\_4.

10. 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. – P. 175-183. – DOI 10.1007/978-3-030-60577-3\_20.

11. **Долженко, А.В.** Практические аспекты применения искусственного интеллекта при проведении строительно-технических экспертиз на этапе эксплуатации жизненного цикла здания / А.В. Долженко // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума, Тамбов, 17–21 мая 2023 года. – Тамбов: ИП Чеснокова А.В., 2023. – С. 81-82.

12. **Долженко, А.В.** Совершенствование технологий эффективного управления жизненным циклом эксплуатируемого объекта недвижимости аппаратно-программными комплексами автоматизированной нейросетевой дефектоскопии // Материалы всероссийской научно-практической конференции молодых учёных «Лидеры 3D-TECH», Тула, 2023. – С. 71-76.

### *Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ*

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018618494 Российской Федерации. Программа сегментации дефектов кровли на аэрофотоснимках с применением полностью сверточной нейронной сети: № 2018615810: заявл. 07.06.2018; опубл. 13.07.2018 / Д.А. Юдин, Е.Д. Патракова, **А.В. Долженко**, А.Е. Наумов; заявитель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614940 Российская Федерация. Программа распознавания дефектов кровли на изображениях и формирования отчетности: № 2021614057: заявл. 24.03.2021; опубл. 31.03.2021 / Д.А. Юдин, **А.В. Долженко**, А.Е. Наумов, А.И. Поляков; заявитель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

**ДОЛЖЕНКО АЛЕКСАНДР ВАЛЕРИЕВИЧ**

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

Специальность 2.1.14. Управление жизненным циклом  
объектов строительства

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 09.07.25 г.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Отпечатано в Белгородском государственном  
технологическом университете им. В.Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46