

УДК: 69.055

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.11

EDN: ILNLNZ



Система цифровой идентификации строительных конструкций на основе технологии радиочастотных меток

Р.С. Сафиуллин¹, Р.Х. Мухаметрахимов¹, Р.З. Рахимов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Проблема утраты и фрагментации проектной, исполнительной и эксплуатационной информации о строительных конструкциях наиболее остро проявляется при техническом обследовании, капитальном ремонте и реконструкции. Цель исследования – разработать понятную и проверяемую модель цифровой идентификации строительных конструкций, в которой физический элемент связывается с цифровым паспортом посредством радиочастотной метки. Для достижения цели решены задачи систематизации технических решений радиочастотной идентификации, разработки архитектуры системы и структуры цифрового паспорта, обоснования размещения меток и расчетной оценки трудоемкости получения инженерной информации при обследовании. В работе систематизированы типы меток, частотные диапазоны и варианты корпусов; предложены архитектура системы и структура цифрового паспорта. Эффективность оценена расчетным экспериментом для условного восьмизэтажного каркасного здания, содержащего 1270 элементов. Все трудозатраты определены через количество операций и норму времени на одну операцию. Расчет показывает, что при принятых исходных условиях трудоемкость подготовительного этапа обследования снижается с 85,9 до 17,6 чел.-ч. Предложенный подход может применяться изготовителями конструкций, подрядными и эксплуатирующими организациями, техническими заказчиками и организациями, выполняющими обследование зданий.

Ключевые слова: RFID, строительные конструкции, цифровой паспорт, UHF, on-metal метки, жизненный цикл, техническое обследование, информационное сопровождение

Для цитирования: Сафиуллин Р.С., Мухаметрахимов Р.Х., Рахимов Р.З. Система цифровой идентификации строительных конструкций на основе технологии радиочастотных меток // Известия КГАСУ, 2026, № 2 (76), с. 168-181, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.11, EDN: ILNLNZ

Digital identification system for building structures based on radio frequency tag technology

R.S. Safiullin¹, R.Kh. Mukhametrakhimov¹, R.Z. Rakhimov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Abstract. The problem of loss and fragmentation of design, as-built, and operational information about building structures becomes most acute during technical inspections, major repairs, and reconstruction. The aim of the study is to develop a clear and verifiable model for the digital identification of building structures in which a physical element is linked to a digital passport by a radio-frequency tag. To achieve this aim, the study systematizes technical solutions for radio-frequency identification, develops the system architecture and digital passport structure, justifies tag placement, and performs a computational assessment of the labour intensity of obtaining engineering information during inspection. The work systematizes

tag types, frequency ranges, and housing options and proposes the system architecture and digital passport structure. Effectiveness is evaluated through a computational experiment for a hypothetical eight-story framed building comprising 1,270 elements. All labour inputs are determined through the number of operations and the standard time per operation. Under the adopted initial conditions, the labour intensity of the preparatory stage of inspection decreases from 85.9 to 17.6 man-hours. The proposed approach can be applied by manufacturers of structural elements, contractors, operating organizations, technical customers, and organizations performing building inspections.

Keywords: RFID, building structures, digital passport, UHF, on-metal tags, life cycle, technical inspection, information management

For citation: Safiullin R.S., Mukhametrakhimov R.Kh., Rakhimov R.Z. Digital identification system for building structures based on radio frequency tag technology // News of KSUAE, 2026, № 2 (76), p. 168-181, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.11, EDN: ILNLNZ

1. Введение

Цифровизация строительства развивается от электронного документооборота к управлению данными, связанными с конкретными физическими элементами здания. Современные исследования управления строительными проектами на основе данных показывают переход к комплексному использованию данных на протяжении жизненного цикла объекта [1]. Работы по наземному лазерному сканированию демонстрируют возможность сопоставления фактического состояния конструкций с цифровой моделью и ускорения строительного контроля [2]. Применение цифрового двойника на стадии эксплуатации подтверждает востребованность непрерывного поступления данных от физического объекта в информационную модель [3]. Эти исследования формируют смежную научную основу, однако сами по себе не решают задачу долговременной идентификации отдельной колонны, балки, плиты или металлического элемента после монтажа.

RFID (Radio Frequency Identification) – технология автоматической идентификации, при которой считыватель создает радиочастотное поле, а электронная метка отвечает кодированным сигналом. В простейшем случае метка передает уникальный номер, по которому информационная система открывает карточку объекта [4, 5]. В отличие от штрихкода и QR-кода RFID не требует обязательной прямой видимости между меткой и считывателем и позволяет быстро считывать несколько меток; современные обзоры подтверждают применимость этого принципа в структурной инженерии [23].

Обзор развития RFID в строительстве показывает последовательный переход от учета материалов и инструмента к управлению поставками, производством сборных элементов и жизненным циклом информации [6]. Пилотные исследования подтвердили применимость RFID в строительном процессе [7], а для сборного железобетона технология применялась при поиске и прослеживании изделий на складе [11].

Более поздние исследования расширяют эту область. Современный обзор методов RFID-локализации в строительстве связывает технологию с интернетом вещей и задачами безопасного обмена данными [8]. Практическая платформа управления строительными материалами на основе RFID и GPS показала возможность получать в реальном времени сведения о состоянии и местоположении материалов [9]. Российские исследования также рассматривают средства идентификации и прослеживаемости продукции в промышленном производстве [10].

На строительной площадке RFID применяется совместно с другими цифровыми средствами. В IoT-системах технология используется для обнаружения и локализации событий на площадке [12]. Связка BIM и RFID позволяет увязывать краткосрочное планирование с фактическим движением материалов [14], а обзоры систем мониторинга подтверждают общую тенденцию к автоматическому позиционированию и отслеживанию ресурсов [15].

Для сборных элементов особое значение приобретает управление данными на уровне отдельного компонента. Цифровые двойники сборных железобетонных элементов

рассматриваются как основа сквозного обмена производственной и эксплуатационной информацией [13]. Современные обзоры управления строительными материалами отмечают RFID как один из инструментов повышения прозрачности движения ресурсов [16]. Систематический обзор 2026 года показывает, что интеграция RFID и BIM используется для прослеживаемости материалов и поддержки данных на стадиях жизненного цикла [17].

Интеграция физического элемента и цифровой модели ранее была систематизирована в исследовании [18]. Задача прослеживаемости сборных элементов также развивается в цифровых системах цепей поставок, ориентированных на неизменяемость и совместное использование записей [21]. Совместное использование RFID и IoT рассматривается как отдельное направление развития распределенных информационных систем [22].

Обзоры цепей поставок связывают RFID с повышением точности учета, прослеживаемости и скорости получения данных [25, 26]. При этом технические ограничения сохраняются: металлическая поверхность способна существенно изменять параметры антенны [19], а размещение радиочастотных устройств в железобетоне требует учета защитного слоя и арматуры [20]. Новые обзоры пассивных UHF-антенн отдельно подчеркивают влияние металла и жидких сред на дальность чтения [24].

Для работы непосредственно на металле применяются специализированные on-metal решения; современные обзоры систематизируют варианты их конструкций и диапазонов [27, 28]. Параллельно развивается сенсорное направление RFID: радиочастотные метки рассматриваются для мониторинга технического состояния конструкций и параметров среды [30, 31]. Таким образом, опубликованные работы охватывают идентификацию, логистику, BIM-интеграцию, мониторинг и сенсорные функции, однако задача постоянной адресной связи конкретной строительной конструкции с ее инженерным паспортом на всем жизненном цикле остается недостаточно формализованной.

Гипотеза исследования состоит в том, что постоянный RFID-идентификатор, связанный с цифровым паспортом и резервным хранилищем, уменьшает объем ручного поиска и повторного ввода данных, а также повышает устойчивость доступа к инженерной информации при обследовании и реконструкции. Цель исследования – разработать понятную и проверяемую модель цифровой идентификации строительных конструкций, в которой физический элемент связывается с цифровым паспортом посредством RFID-метки. Для достижения цели поставлены задачи: 1) систематизировать технические решения RFID, применимые к строительным конструкциям; 2) разработать архитектуру системы и структуру цифрового паспорта; 3) обосновать выбор и размещение меток с учетом материала конструкции и условий эксплуатации; 4) выполнить прозрачный расчет трудозатрат и анализ чувствительности результата; 5) сопоставить предлагаемую систему с требованиями к архивному хранению строительной документации.

2. Материалы и методы

Объектом исследования является процесс информационного сопровождения строительных конструкций на протяжении жизненного цикла. Предметом исследования являются параметры и организационно-технологические решения RFID-систем, определяющие идентифицируемость элемента, доступность инженерных данных и трудоемкость их получения. Для расчетного эксперимента принято условное восьмизэтажное административное здание со сборно-монолитным железобетонным каркасом и 1270 учитываемыми элементами: 120 колонн, 180 ригелей, 720 плит перекрытия и 250 стеновых панелей. Субъектами строительной деятельности в предлагаемой модели являются завод-изготовитель, технический заказчик, генеральный подрядчик, монтажная организация, эксплуатирующая организация и организация, выполняющая техническое обследование. Каждый субъект вносит в цифровой паспорт данные в пределах своей зоны ответственности.

Материалами исследования послужили рецензируемые публикации и нормативные документы, непосредственно относящиеся к автоматической идентификации и управлению данными строительных элементов. При тематическом отборе учитывались работы по применению RFID на строительных площадках и в управлении материалами

[8, 9, 12], по интеграции с BIM, цифровыми двойниками и системами прослеживаемости [13, 17, 18], а также по работе меток на металлических и строительных основаниях [19, 20, 27]. Дополнительно использованы обзоры по RFID и цепям поставок [23, 25, 26], по on-metal решениям [28] и RFID-сенсорам для мониторинга конструкций [30, 31]. Литературный анализ носил тематический характер: источники использовались для обоснования архитектуры системы, параметров меток, ограничений и сценарных допущений расчетного эксперимента.

Методика исследования включает:

- 1) тематический анализ публикаций по применению RFID, BIM, IoT и цифровых средств прослеживаемости в строительстве;
- 2) системное моделирование информационных потоков между физической конструкцией, считывателем, программным слоем, цифровым паспортом и пользователем;
- 3) подбор типа и исполнения меток по материалу конструкции, доступности после монтажа и условиям эксплуатации с формированием процедуры натурной проверки;
- 4) расчетный эксперимент по определению трудоемкости подготовительного этапа обследования по количеству операций и времени на одну операцию, а также анализ чувствительности результата;
- 5) анализ нормативных требований к хранению проектной, рабочей и исполнительной документации и обобщение практического опыта автора по поиску архивных материалов.

Расчет выполнялся по формулам (1)–(3) для одного условного объекта с $N = 1270$ конструктивными элементами. Базовые исходные значения приведены в таблице 1. Анализ чувствительности выполнялся детерминированно: время считывания одной метки $t_{ск}$ принималось равным 10, 15 и 30 с/элемент, а доля меток, требующих повторного чтения или ручного подтверждения sRFID – 5, 10 и 20 %; остальные параметры сохранялись на базовом уровне. Для каждого сочетания параметров повторно вычислялись трудоемкость RFID-процесса и относительное снижение по сравнению с традиционным процессом. Поскольку расчет является детерминированным, статистические повторения одного и того же сценария не требуются. Натурные радиотехнические испытания в рамках настоящей работы не проводились; серия чтений, приведенная далее, предлагается как процедура проверки при пилотном внедрении.

Трудоемкость традиционного процесса определялась как сумма фиксированных операций и операций, зависящих от количества элементов:

$$Q_{тр} = t_{арх} + t_{черт} + N * \frac{t_{ид}}{60} + N * s_{тр} * \frac{t_{птр}}{60} + N * \frac{t_{сис}}{60} + t_{контр} \quad (1)$$

где: $Q_{тр}$ – общая расчетная трудоемкость подготовительного этапа обследования при традиционном способе поиска и сопоставления документации, чел.-ч; $t_{арх} = 6$ ч – продолжительность инвентаризации бумажного и электронного архива одним инженером, поэтому трудоемкость операции составляет 1 чел. $\times$ 6 ч = 6 чел.-ч; $t_{черт} = 4$ ч – продолжительность подбора, проверки комплектности и взаимной увязки проектных и исполнительных чертежей одним инженером, то есть 4 чел.-ч; $N = 1270$ шт. – общее количество рассматриваемых конструктивных элементов условного объекта (120 колонн + 180 ригелей + 720 плит перекрытия + 250 стеновых панелей); $t_{ид} = 1,5$ мин/элемент – среднее расчетное время полевой идентификации одного элемента без RFID, включающее подход к конструкции, поиск и чтение маркировки, визуальное определение типа элемента и сопоставление с ведомостью; деление произведения $N * t_{ид}$ на 60 переводит минуты в часы; $s_{тр} = 0,20$ – безразмерная доля элементов, для которых при традиционном подходе требуется дополнительная проверка вследствие отсутствующей, поврежденной или неоднозначной маркировки; значение 0,20 соответствует 20 %, то есть $N * s_{тр} = 1270 * 0,20 = 254$ элементам; $t_{птр} = 4$ мин/элемент – дополнительное время проверки одного неоднозначного элемента по чертежам, архивным материалам и фактическому положению; $t_{сис} = 1$ мин/элемент – время ручного переноса сведений об одном элементе в итоговую ведомость; $t_{контр} = 6$ чел.-ч – трудоемкость итогового контроля, принятая как работа двух специалистов по 3 ч каждый: 2 чел. $\times$ 3 ч = 6 чел.-ч.

Таким образом, каждый член формулы выражает самостоятельную операцию, а слагаемые с N зависят от количества обследуемых конструкций.

Таблица 1

Исходные данные расчетного эксперимента

Параметр	Значение	Основание принятия
Общее число конструктивных элементов N , шт.	1270 шт.	Состав условного каркасного здания: 120 колонн, 180 ригелей, 720 плит, 250 панелей.
Доля не идентифицированных конструктивных элементов при традиционном подходе к обследованию стр, %	20 % = 254 элемента	Сценарное допущение для проверки чертежей, маркировки и фактического положения; принято как расчетная величина, не как отраслевой норматив.
Доля неработоспособных RFID-меток sRFID, %	10 % = 127 элементов	Базовый сценарий; при анализе чувствительности принимается 5, 10 и 20 %.
Время идентификации одного элемента без RFID тид, мин/элемент	1,5 мин/элемент	Включает подход, чтение маркировки и сопоставление с ведомостью; принято как расчетная норма, не как отраслевой норматив.
Время считывания одной RFID-метки tск, с/элемент	15 с/элемент	Консервативное время мобильного считывания с фиксацией результата; при анализе чувствительности принимается 10, 15 и 30 с.
Дополнительное время проверки одного элемента tптр / tпRFID, мин/элемент	4 мин/элемент без RFID; 3 мин/элемент с RFID	Поиск на чертеже/в архиве либо проверка цифровой записи и физической привязки.
Время ручной систематизации tсист, мин/элемент	1 мин/элемент без RFID; 0 мин/элемент при автоматическом импорте	Ручной перенос в ведомость; при RFID данные импортируются автоматически, остается итоговый контроль.

Трудоемкость процесса с RFID рассчитывалась по формуле:

$$Q_{RFID} = t_{настр} + N * \frac{t_{ск}}{3600} + N * S_{RFID} * \frac{t_{пRFID}}{60} + t_{ит} \quad (2)$$

где: Q_{RFID} – общая расчетная трудоемкость подготовительного этапа обследования при использовании RFID-идентификации и цифровых паспортов, чел.-ч; $t_{настр} = 2$ ч – продолжительность начальной настройки мобильного считывателя, авторизации пользователя, синхронизации с сервером и загрузки задания одним инженером, то есть 2 чел.-ч; $N = 1270$ шт. – количество идентифицируемых конструктивных элементов; $t_{ск} = 15$ с/элемент – расчетное время считывания уникального кода одной RFID-метки и автоматической фиксации результата в электронной ведомости; деление произведения $N * t_{ск}$ на 3600 переводит секунды в часы; $S_{RFID} = 0,10$ – безразмерная доля RFID-меток, требующих повторного чтения или ручного подтверждения связи с конструкцией; значение 0,10 означает 10 % от общего числа элементов, поэтому $N * S_{RFID} = 1270 * 0,10 = 127$ элементов; к таким исключениям относятся метки с ослабленным сигналом, закрытые отделочным слоем, расположенные рядом с металлом без on-metal исполнения, либо записи с неполной координатной привязкой; $t_{пRFID} = 3$ мин/элемент – дополнительное время на повторное считывание, проверку цифровой записи и подтверждение физической привязки одного проблемного элемента; деление произведения $N * S_{RFID} * t_{пRFID}$ на 60 переводит минуты в часы; $t_{ит} = 4$ чел.-ч – трудоемкость итоговой проверки полноты данных и формирования сводной ведомости одним специалистом в течение 4 ч. Автоматический импорт корректно считанных записей не выделяется как ручная операция, поскольку выполняется программной системой без участия специалиста.

Относительное снижение трудоемкости определялось по формуле (3):

$$\eta_Q = \frac{Q_{\text{тр}} - Q_{\text{RFID}}}{Q_{\text{тр}}} * 100\% \quad (3)$$

где η_Q – относительное уменьшение трудоемкости при переходе от традиционного процесса к RFID-процессу, %; $Q_{\text{тр}}$ – трудоемкость традиционного процесса, чел.-ч; Q_{RFID} – трудоемкость процесса с RFID, чел.-ч; разность $Q_{\text{тр}} - Q_{\text{RFID}}$ показывает абсолютную экономию трудозатрат, чел.-ч; деление этой разности на $Q_{\text{тр}}$ показывает, какую долю исходной трудоемкости удалось исключить; умножение на 100 переводит безразмерную долю в проценты. При $Q_{\text{тр}} = 85,85$ чел.-ч и $Q_{\text{RFID}} = 17,64$ чел.-ч абсолютная экономия равна 68,21 чел.-ч, а относительное снижение – $68,21/85,85 \cdot 100\% = 79,45\%$, или округленно 79,5 %.

3. Результаты и обсуждение

RFID-система включает метку, считыватель, антенну и программную систему. Пассивная метка не содержит батареи: энергия поступает от электромагнитного поля считывателя, после чего микросхема изменяет отраженный сигнал и передает записанный код. Активная метка имеет собственный источник питания и периодически передает сигнал; она обеспечивает большую дальность, но требует обслуживания. Полупассивная метка использует батарею для питания микросхемы и датчиков, однако отвечает после запроса считывателя. Для долговременной идентификации массовых строительных элементов рациональнее пассивные метки, поскольку они не зависят от срока службы батареи; активные решения целесообразны для техники, контейнеров и дорогостоящего оборудования [5, 23]. Современный обзор пассивных UHF-меток подтверждает, что выбор конструкции определяется требуемой дальностью, рабочей средой и электромагнитными ограничениями [24].

По режиму памяти различают метки Read Only, WORM (однократная запись с многократным чтением) и Read/Write. В предлагаемой системе в памяти метки хранится только неизменяемый или защищенный уникальный идентификатор. Проектные характеристики, акты, фотографии, результаты обследований и сведения о ремонтах хранятся на сервере цифровых паспортов. Такой принцип исключает попытку разместить большой объем документации в ограниченной памяти метки и позволяет обновлять сведения без физической замены RFID-носителя. В обзорных исследованиях по управлению цепями поставок RFID рассматривается именно как средство автоматического получения идентификатора и актуализации связанной записи в информационной системе, а не как автономный носитель всей документации [25, 26]. Основные диапазоны RFID и их применимость в строительстве приведены в таблице 2.

Корпус метки выбирают по условиям эксплуатации. Самоклеящаяся бумажная или полимерная этикетка подходит для сухих помещений и упаковки. Метки в корпусах из ABS-пластика или поликарбоната устойчивее к ударам и влаге. Эпоксидная заливка защищает микросхему от пыли и воды; керамический корпус выдерживает температуру и химическое воздействие, но более хрупок. Для бетонирования применяются герметичные капсулы или пластиковые закладные корпуса, не создающие существенного ослабления защитного слоя. Для металлических конструкций используются болтовые, заклепочные либо клеевые промышленные корпуса. Современные обзоры on-metal решений показывают, что промежуточный диэлектрический слой и конструкция антенны непосредственно влияют на согласование с металлической поверхностью и стабильность чтения [27, 28].

Обычная UHF-метка при непосредственном контакте с металлом теряет настройку антенны: проводящая поверхность изменяет ее электромагнитные параметры и может резко уменьшить дальность чтения. On-metal (anti-metal) – специализированная метка, конструкция которой предусматривает диэлектрическую прокладку, ферритовый слой, собственную экранирующую плоскость или антенну, рассчитанную на работу совместно с металлической поверхностью. Специально разработанные metal-mount метки сохраняют работоспособность там, где обычная этикетка становится нестабильной [19]. Для железобетона исследуются встраиваемые UHF-RFID сенсорные решения, подтверждающие возможность радиочастотного взаимодействия через бетонный защитный слой при специальном исполнении устройства [20]. Современные обзоры on-

metal меток систематизируют жесткие и гибкие диэлектрические основания и подчеркивают необходимость учитывать рабочую частоту конкретного региона [27, 28]. Поэтому термин on-metal обозначает не способ крепления, а электромагнитно согласованную конструкцию метки.

Таблица 2

Основные диапазоны RFID и их применимость в строительстве

Диапазон	Частота	Дистанция считывания	Особенности и рациональная область применения
LF	125 – 134 кГц	сантиметры, обычно до 0,3 – 0,5 м	Устойчивая ближняя идентификация; малая скорость и небольшая дальность. Общие характеристики RFID-систем рассматриваются в [4, 23].
HF / NFC	13,56 МГц	несколько сантиметров, реже до 1 м	Считывание телефоном для NFC; удобно для локального доступа к паспорту, но требует близкого подхода. Общие принципы диапазонов RFID рассмотрены в [23].
Microwave	2,45 и 5,8 ГГц	от единиц до десятков метров	Чаще активные системы; высокая стоимость и чувствительность к среде.
UHF	860 – 960 МГц	обычно 2 – 10 м, зависит от антенны и среды	Высокая скорость и групповое считывание; предпочтительно для складов, площадки и обследования. Особенности UHF и влияние металлических поверхностей обобщены в [24, 27, 28].

Разработанная схема (рис. 1) поясняет путь данных от конструкции к пользователю. RFID-метка не заменяет архив и не хранит полный комплект документов. Она передает уникальный идентификатор. Считыватель принимает этот код, сервис идентификации находит соответствующую запись, а пользователь получает цифровой паспорт. BIM-модель, среда общих данных и резервный архив подключаются к паспорту как внешние источники и хранилища. Журнал изменений фиксирует автора, дату и основание каждой новой записи.



Рис. 1. Архитектура системы цифровой идентификации строительных конструкций (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Architecture of the Digital Identification System for Structural Building Elements (illustration by the authors)

Под цифровым паспортом строительной конструкции в настоящем исследовании понимается структурированный, версионный набор инженерных данных об индивидуальном элементе, имеющий уникальный идентификатор и пополняемый

уполномоченными участниками на стадиях изготовления, строительства и эксплуатации. В отличие от обычной карточки изделия паспорт включает не только заводские характеристики, но и фактическое положение, результаты входного и операционного контроля, историю дефектов, обследований, ремонтов и усилений. Предлагаемый состав показан на рис. 2. Аналогичный переход к управлению информацией на уровне компонента соответствует исследованиям жизненного цикла RFID-данных [17] и интеграции RFID с BIM [18].

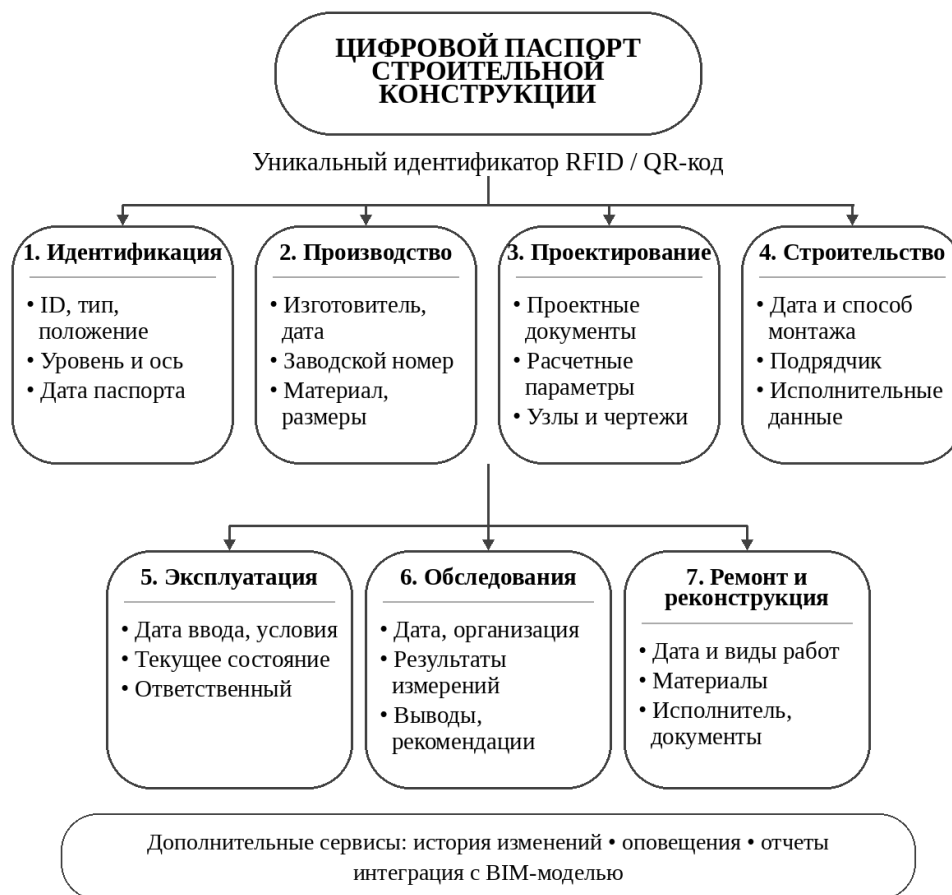


Рис. 2. Информационные блоки цифрового паспорта строительной конструкции (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Information Blocks of the Digital Passport for Structural Building Elements (illustration by the authors)

Данные, приведенные в таблице 3, имеют характер инженерных рекомендаций, а не универсальных размеров. Обоснование рекомендаций базируется на трех уровнях. Во-первых, литература подтверждает влияние металла и строительных материалов на настройку антенны и необходимость специализированных решений [19, 20, 27]. Во-вторых, место установки выбирается по критериям доступности после монтажа, защищенности от повреждений и возможности однозначно сопоставить метку с элементом. В-третьих, окончательное положение должно подтверждаться приемочным радиотехническим испытанием. При натурной апробации для каждого типа элемента предлагается выполнять не менее 30 чтений с разных направлений, фиксируя долю успешных чтений, минимальную дистанцию и влияние отделки. Серийное решение целесообразно принимать при достижении заданного проектом порога, например не менее 95 % успешных чтений в контрольных положениях. Этот порог является предлагаемым критерием приемки системы, а не заранее заявленной статистикой настоящего расчетного исследования.

Таблица 3

Обоснование выбора и размещения RFID-меток

Тип элемента	Рекомендуемое решение	Инженерное обоснование и контроль
Железобетонная колонна	Герметичная пассивная UHF-метка в технологической нише или у поверхности защитного слоя на высоте 1,2 – 1,5 м	Высота доступна при обследовании и менее подвержена удару техникой, чем зона у пола. До серийного внедрения требуется натурное испытание чтения с учетом арматуры и отделки.
Ригель или балка	Метка на боковой грани вблизи опоры, доступной из помещения	Средняя зона пролета может быть закрыта потолком; зона у опоры сохраняет связь с узлом и доступность при обслуживании.
Плита перекрытия	Метка на нижней грани вблизи опоры, доступной из помещения в центре опираемой стороны, либо в доступной технологической зоне; дублирующий QR-код на исполнительной схеме	Верхняя и нижняя поверхности обычно закрываются стяжкой и потолком. Торцы доступнее до заделки швов; после монтажа необходима координатная привязка.
Стеновая панель	Метка на внутренней боковой грани или в сервисной нише	Фасадная поверхность подвергается осадкам и ремонту; внутренняя зона лучше защищена.
Стальная колонна или балка	Промышленная on-metal UHF-метка на болтовом/заклепочном держателе либо на клеевой площадке вне зоны огнезащиты	Обычная этикетка на металле детонируется. On-metal конструкция учитывает проводящую поверхность [19]; размещение проверяется после нанесения огнезащиты.
Закладные детали и малые изделия	Небольшая on-metal или керамическая метка; при невозможности – маркировка партии	Размер метки и металл ограничивают дальность; для массовых малых деталей индивидуальная идентификация экономически нецелесообразна.

Представленный в таблице №4 расчет оценивает организационно-технологический эффект; оценка экономической эффективности требует учета стоимости аппаратного обеспечения и может быть предметом отдельного исследования.

Таблица 4

Расчет трудоемкости подготовительного этапа обследования

Операция	Традиционный процесс, чел.-ч	RFID-процесс, чел.-ч	Расчет
Инвентаризация архива / настройка системы	6,00	2,00	Фиксированная операция одного инженера.
Подбор чертежей	4,00	0,00	При RFID ссылки на документы открываются из паспорта.
Полевое распознавание / считывание	31,75	5,29	1270×1,5/60; 1270×15/3600.
Разбор неоднозначных случаев	16,93	6,35	1270×0,20×4/60; 1270×0,10×3/60.
Ручная систематизация	21,17	0,00	1270×1/60; при RFID – автоматический импорт.
Итоговый контроль	6,00	4,00	Проверка полноты и формирование ведомости.
Итого	85,85	17,64	Сумма операций.

Анализ чувствительности подтверждает направленную устойчивость расчетного результата. При одновременном варьировании времени считывания t_{ск} от 10 до 30 с/элемент и доли меток, требующих повторной проверки sRFID от 5 до 20 % расчетная трудоемкость RFID-процесса изменяется от 12,70 до 29,28 чел.-ч. При неизменной

трудоемкости традиционного процесса 85,85 чел.-ч относительное снижение составляет от 65,9 до 85,2 %. Базовому сценарию $t_{ск} = 15$ с/элемент и sRFID = 10 % соответствуют 17,64 чел.-ч и снижение на 79,5 %. Таким образом, изменение двух ключевых сценарных параметров влияет на величину эффекта, но не меняет вывода о сокращении ручных операций в рассмотренном диапазоне.

Практический опыт автора в области проектирования и анализа существующих зданий показывает, что при работе с объектами, срок эксплуатации которых превышает 35 лет, получение исходной инженерной информации нередко оказывается затруднено. Проектная, рабочая и исполнительная документация может отсутствовать у собственника и эксплуатирующей организации, храниться в разрозненном виде либо не соответствовать фактически реализованным конструктивным решениям.

Наиболее часто возникают сложности с поиском исполнительных схем, паспортов строительных изделий и материалов, актов освидетельствования скрытых работ, сведений о фактическом армировании железобетонных элементов, а также документов, отражающих выполненные ремонты, перепланировки, усиления и реконструкции. Даже при наличии отдельных чертежей не всегда удается однозначно установить, относятся ли они к фактически возведенному объекту, последней редакции проектных решений или конкретному обследуемому конструктивному элементу.

Указанная проблема особенно характерна для зданий, которые за период эксплуатации неоднократно меняли собственника, балансодержателя или эксплуатирующую организацию. При каждой передаче объекта возрастает риск неполной передачи архива и нарушения связи между документацией и физическими конструкциями. Дополнительными причинами являются несистематизированное хранение, повреждение бумажных носителей, отсутствие резервных цифровых копий и выполнение ремонтных работ без внесения изменений в исполнительную документацию.

При этом отсутствие документации у текущего собственника не обязательно означает, что установленный законодательством срок ее хранения истек. Приказ Росархива от 28.12.2021 № 142 устанавливает дифференцированные сроки хранения научно-технической и производственной документации: они зависят от вида документа, организации-держателя и категории объекта. Приказ Минстроя России от 16.05.2023 № 344/пр в действующей редакции предусматривает передачу исполнительной документации на постоянное хранение застройщику, техническому заказчику или лицу, ответственному за эксплуатацию объекта; для электронных документов должны обеспечиваться резервное копирование, восстановление и протоколирование операций.

Приведенные в таблице №5 сроки показывают, что нормативная система предусматривает длительное, а для исполнительной документации у застройщика или заказчика – постоянное хранение. Вместе с тем нормативная обязанность и фактическая доступность документации представляют собой разные характеристики. Документ может формально подлежать хранению, но быть недоступным вследствие смены собственника, неполной передачи архива, отсутствия каталога, повреждения носителя или невозможности сопоставить чертеж с конкретной конструкцией.

Поэтому срок эксплуатации более 35 лет сам по себе не доказывает обязательную утрату документации, однако увеличивает количество организационных переходов и событий, при которых архив может быть фрагментирован. В настоящей работе данное положение рассматривается как профессиональное наблюдение автора, сформированное в процессе проектной деятельности, а не как статистически установленный процент утраты. Количественная оценка требует отдельного исследования реальных архивов по единой программе и репрезентативной выборке.

Предлагаемая RFID-система не заменяет обязательное архивное хранение. Ее функция заключается в создании дополнительного устойчивого канала доступа: уникальный идентификатор на физической конструкции связывается с цифровым паспортом, в котором фиксируются ключевые проектные характеристики, сведения об изготовлении и монтаже, результаты обследований, ремонтов и усиления. Это уменьшает зависимость специалиста от того, насколько полно сохранился традиционный комплект документов.

Сопоставление результатов с опубликованными исследованиями показывает их направленную согласованность. При управлении сборными изделиями и строительными материалами RFID повышает прослеживаемость и сокращает объем ручного поиска [9, 11]. На площадках цифровые средства позиционирования и мониторинга уменьшают зависимость от ручного наблюдения [8, 15]. Интеграция RFID с BIM формирует связь между физическим элементом и цифровой записью [17, 18]. Обзоры по цепям поставок связывают RFID с повышением точности учета, прослеживаемости и скорости получения данных [25, 26]. В то же время металлические поверхности остаются критическим ограничением для обычных UHF-меток [19, 27, 28], а арматура, влажность и защитные слои требуют отдельной натурной проверки [20, 30]. Перспективным продолжением является использование RFID-меток не только как идентификаторов, но и как пассивных сенсорных элементов для фиксации коррозии и других параметров технического состояния [20, 30, 31].

Таблица 5

Нормативные сроки хранения основных видов строительной документации

Вид документа	Застройщик / заказчик	Организация-разработчик	Лицо, выполняющее работы	Эксплуатирующая организация	Ключевое примечание
Проектная документация	5 лет после вывода объекта из эксплуатации	До ликвидации организации	До минования практической надобности	До минования практической надобности	Для особо опасных, технически сложных и уникальных объектов предусматривается постоянное хранение
Рабочая документация	5 лет после вывода объекта из эксплуатации	До ликвидации организации	До окончания работ по договору	5 лет после вывода объекта из эксплуатации	Срок может быть постоянным; неутвержденные комплекты хранятся 5 лет после завершения договора
Исполнительная документация	Постоянно	Не устанавливается как основной держатель	До завершения работ по договору	5 лет после вывода объекта из эксплуатации	Включает исполнительные чертежи и схемы, акты, журналы, сертификаты и паспорта материалов; контрольные органы хранят постоянно

4. Ограничения исследования

Исследование имеет расчетный характер. Принятые значения времени идентификации, доли неоднозначных случаев и доли меток, требующих повторной проверки, являются сценарными исходными данными, а не отраслевыми нормативами. Натурная проверка дальности и надежности чтения, влияние армирования, влажности, отделочных и огнезащитных слоев, а также экономическая эффективность требуют подтверждения на пилотном объекте. Поэтому количественный эффект 79,5 % относится к принятому условному объекту; обобщаемым результатом является предложенная организационно-технологическая схема и причинно-следственная связь между автоматической идентификацией и сокращением ручных операций.

5. Заключение

1. На основе анализа литературных источников определены субъекты, участвующие в формировании данных; раскрыты принципы питания, записи и чтения пассивных, активных и полупассивных RFID-меток; рассмотрены диапазоны LF, HF/NFC, UHF и микроволновые системы, варианты корпусов и назначение on-metal решений; определены рациональные виды для применения в строительных конструкциях.

2. Разработаны архитектура системы цифровой идентификации и структура цифрового паспорта строительной конструкции. Цифровой паспорт определен как

версионизируемый набор данных об индивидуальном элементе, связанный с постоянным идентификатором и пополняемый по стадиям жизненного цикла. RFID-метка в данной модели хранит преимущественно идентификатор, а не полный массив инженерной документации.

3. Разработаны рекомендации по размещению меток, которые обоснованы их доступностью после монтажа, защищенностью, влиянием материала конструкции и необходимостью контрольных радиотехнических испытаний. Для металлоконструкций применение обычной этикеточной метки без согласования с поверхностью признано необоснованным; требуется on-metal исполнение.

4. По результатам расчета трудозатрат установлено, что для условного объекта с 1270 элементами получено 85,85 чел.-ч при традиционном процессе и 17,64 чел.-ч при RFID-сценарии (снижение на 79,5 %). При варьировании времени считывания от 10 до 30 с/элемент и доли меток, требующих повторной проверки, от 5 до 20 % снижение составляет 65,9–85,2 %, что подтверждает направленную устойчивость результата в рассмотренном диапазоне. Практический опыт автора указывает, что для зданий старше 35 лет поиск проектной, рабочей и исполнительной документации нередко затруднен, несмотря на установленные нормативные сроки хранения. RFID-идентификация рассматривается как дополнительный механизм сохранения адресной связи между физической конструкцией и цифровой инженерной информацией, а не как замена обязательного архива.

Список литературы / References

1. Huang Y., Shi Q., Zuo J., Pena-Mora F., Chen J. Research Status and Challenges of Data-Driven Construction Project Management in the Big Data Context // *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Article 6674980. DOI: 10.1155/2021/6674980.
2. Богданов А.Н., Листратов Я.А. Строительный контроль методом наземного лазерного сканирования // *Известия КГАСУ*. 2019. № 4(50). С. 401 – 409.
Bogdanov A.N., Listratov Ya.A. Construction control using ground-based laser scanning // *News of KSUAE*. 2019. No. 4(50). P. 401–409.
3. Степанов И.О., Крайнов Д.В. Применение цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении // *Известия КГАСУ*. 2024. № 2(68). С. 26 – 36. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.3.
Stepanov I.O., Krainov D.V. Application of a digital twin for monitoring indoor microclimate // *News of KSUAE*. 2024. No. 2(68). P. 26–36. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.3.
4. Носенко В.А., Силаев А.А., Ефремкин С.И. Обзор беспроводных технологий, применяемых для автоматизации технологических процессов // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 1 URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5652>.
Nosenko V.A., Silaev A.A., Efremkin S.I. Overview of wireless technologies used to automate technological processes // *Engineering Bulletin of the Don*. 2019. No. 1. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5652>.
5. Want R. An introduction to RFID technology // *IEEE Pervasive Computing*. 2006. Vol. 5. No. 1. P. 25 – 33. DOI: 10.1109/MPRV.2006.2.
6. Valero E., Adán A., Cerrada C. Evolution of RFID applications in construction: a literature review // *Sensors*. 2015. Vol. 15. No. 7. P. 15988 – 16008. DOI: 10.3390/s150715988.
7. Jaselskis E.J., El-Misalami T. Implementing radio frequency identification in the construction process // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2003. Vol. 129. No. 6. P. 680 – 688. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:6(680).
8. Khan S.I., Ray B.R., Karmakar N.C. RFID localization in construction with IoT and security integration // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 159. Article 105249. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105249.
9. Dardouri S., BuHamdan S., Al Balkhy W., Dakhli Z., Danel T., Lafhaj Z. RFID platform for construction materials management // *International Journal of Construction Management*. 2023. Vol. 23. No. 14. P. 2509 – 2519. DOI: 10.1080/15623599.2022.2073085.

10. Шеремет Д.А., Силаев А.А., Носенко В.А. Средства идентификации и прослеживаемости продукции, представленные на российском рынке для производства труб большого диаметра // Инженерный вестник Дона. 2024. № 4 URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9168>.
Sheremet D.A., Silaev A.A., Nosenko V.A. Product identification and traceability tools available on the Russian market for the production of large-diameter pipes // Engineering Bulletin of the Don. 2024. No. 4. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9168>.
11. Ergen E., Akinci B., Sacks R. Tracking and locating components in a precast storage yard utilizing radio frequency identification technology and GPS // Automation in Construction. 2007. Vol. 16. No. 3. P. 354 – 367. DOI: 10.1016/j.autcon.2006.07.004.
12. Jin R., Zhang H., Liu D., Yan X. IoT-based detecting, locating and alarming of unauthorized intrusion on construction sites // Automation in Construction. 2020. Vol. 118. Article 103278. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103278.
13. Kosse S., Vogt O., Wolf M., König M., Gerhard D. Digital Twin Framework for Enabling Serial Construction // Frontiers in Built Environment. 2022. Vol. 8. Article 864722. DOI: 10.3389/fbuil.2022.864722.
14. Chen Q., Adey B.T., Haas C.T., Hall D.M. Using look-ahead plans to improve material flow processes on construction projects when using BIM and RFID technologies // Construction Innovation. 2020. Vol. 20. No. 3. P. 471 – 508. DOI: 10.1108/CI-11-2019-0133.
15. Rao A.S., Radanovic M., Liu Y., Hu S., Fang Y., Khoshelham K., Palaniswami M., Ngo T. Real-time monitoring of construction sites: sensors, methods, and applications // Automation in Construction. 2022. Vol. 136. Article 104099. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104099.
16. Castillo Rodríguez R., Domínguez Lepe J.A., Jiménez Torrez L.F. Current situation of construction material management at international level // Revista Ingeniería de Construcción. 2022. Vol. 37. No. 1. P. 79 – 90. DOI: 10.7764/ric.00020.21.
17. Lopes I.T., Turkan Y. Digital Enablers for Circular Construction: A Systematic Review of RFID and BIM Integration // ASCE OPEN: Multidisciplinary Journal of Civil Engineering. 2026. Vol. 4. No. 1. Article 03126002. DOI: 10.1061/AOMJAH.AOENG-0104.
18. Xue F., Chen K., Lu W., Niu Y., Huang G.Q. Linking radio-frequency identification to Building Information Modeling: status quo, development trajectory and guidelines for practitioners // Automation in Construction. 2018. Vol. 93. P. 241 – 251. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.05.023.
19. Mo L., Zhang H. RFID label tag design for metallic surface environments // Sensors. 2011. Vol. 11. No. 1. P. 938 – 948. DOI: 10.3390/s110100938.
20. Bouzaffour K., Lescop B., Talbot P., Gallée F., Rioual S. Development of an Embedded UHF-RFID Corrosion Sensor for Monitoring Corrosion of Steel in Concrete // IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21. No. 10. P. 12306 – 12312. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3064970.
21. Wang Z., Wang T., Hu H., Gong J., Ren X., Xiao Q. Blockchain-based framework for improving supply chain traceability and information sharing in precast construction // Automation in Construction. 2020. Vol. 111. Article 103063. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103063.
22. Al-Turjman F., Lemayian J.P. Intelligence, security, and vehicular sensor networks in Internet of Things (IoT)-enabled smart-cities: an overview // Computers & Electrical Engineering. 2020. Vol. 87. Article 106776. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2020.106776.
23. Duan K.-K., Cao S.-Y. Emerging RFID technology in structural engineering – A review // Structures. 2020. Vol. 28. P. 2404 – 2414. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.10.036.
24. Abdulghafor R., Turaev S., Almohamedh H., Alabdan R., Almutairi B., Almutairi A., Almotairi S. Recent Advances in Passive UHF-RFID Tag Antenna Design for Improved Read Range in Product Packaging Applications: A Comprehensive Review // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 63611 – 63635. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3074339.

25. Unhelkar B., Joshi S., Sharma M., Prakash S., Mani A.K., Prasad M. Enhancing supply chain performance using RFID technology and decision support systems in Industry 4.0: a systematic literature review // International Journal of Information Management Data Insights. 2022. Vol. 2. No. 2. Article 100084. DOI: 10.1016/j.jjime.2022.100084.
26. Tan W.C., Sidhu M.S. Review of RFID and IoT integration in supply chain management // Operations Research Perspectives. 2022. Vol. 9. Article 100229. DOI: 10.1016/j.orp.2022.100229.
27. Pereira E., Sandoval Júnior, Silva L.F.V., Batista M., Santos E., Araújo Í., Araújo J., Barboza E., Gomes F., Fraga I.T., Dos Santos D.O., Davanzo R. RFID tags for on-metal applications: a brief survey // Technologies. 2024. Vol. 12. No. 5. Article 58. DOI: 10.3390/technologies12050058.
28. Erman F., Koziel S., Leifsson L. Broadband/dual-band metal-mountable UHF RFID tag antennas: a systematic review, taxonomy analysis, standards of seamless RFID system operation, supporting IoT implementations, recommendations, and future directions // IEEE Internet of Things Journal. 2023. Vol. 10. No. 16. P. 14780 – 14797. DOI: 10.1109/IJOT.2023.3289198.
29. Соколова Э.С., Багиров М.Б., Женарстанов А.М., Бородин Т.Л., Дмитриев Д.В. Система управления сетью «Интернета вещей» для удаленной идентификации радиометок // Инженерный вестник Дона. 2019. № 6 URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6014>.
Sokolova E.S., Bagirov M.B., Zhenarstanov A.M., Borodina T.L., Dmitriev D.V. Internet of Things network management system for remote identification of radio tags // Engineering Bulletin of the Don. 2019. No. 6 URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6014>.
30. Zhang M., Liu Z., Shen C., Wu J., Zhao A. A review of radio frequency identification sensing systems for structural health monitoring // Materials. 2022. Vol. 15. No. 21. Article 7851. DOI: 10.3390/ma15217851.
31. Costa F., Genovesi S., Borgese M., Michel A., Dicandia F.A., Manara G. A review of RFID sensors, the new frontier of Internet of Things // Sensors. 2021. Vol. 21. No. 9. Article 3138. DOI: 10.3390/s21093138.

Информация об авторах

Сафиуллин Рустам Салаватович, инженер, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: ruschooltam@mail.ru, ORCID: 0009-0008-2540-3291

Мухаметрахимов Рустем Ханифович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: muhametrahimov@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2062-5289

Рахимов Равиль Зуфарович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: rahimov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-4251-1605

Information about the authors

Rustam S. Safiullin, engineer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: ruschooltam@mail.ru, ORCID: 0009-0008-2540-3291

Rustem Kh. Mukhametrakhimov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: muhametrahimov@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2062-5289

Ravil Z. Rakhimov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

E-mail: rahimov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-4251-1605

Дата поступления: 24.07.2026

Дата принятия: 29.09.2026