Применение алгоритмов машинного обучения в проектировании текстильных армирующих систем с целью улучшения прочностных и энергетических параметров реконструируемых конструкций

Анчаков Родион Валерьевич
аспирант, Юго-Западный государственный университет, rodion.anchakov@mail.ru

В статье рассматривается разработка и оптимизация компьютерной модели текстильного армирования строительных конструкций с применением технологий искусственного интеллекта (ИИ) для энергоэффективной реконструкции зданий и сооружений. Предложенная модель позволяет повысить прочностные и эксплуатационные характеристики конструкций за счёт точного расчёта распределения нагрузок, выбора оптимальных параметров армирования и прогнозирования поведения материалов в различных условиях эксплуатации. Проведены численные эксперименты, подтверждающие эффективность предложенной модели. Результаты исследования демонстрируют возможность снижения материалоёмкости конструкций на 15–20 %. Полученные данные могут быть использованы в практике проектирования и реконструкции зданий различного назначения.

Ключевые слова: текстильное армирование, строительные конструкции, энергоэффективная реконструкция, искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение, информационное моделирование зданий (BIM), компьютерное моделирование, оптимизация параметров армирования.

Современные тенденции в строительстве диктуют необходимость поиска инновационных решений, позволяющих повысить энергоэффективность, прочность и долговечность строительных конструкций.

Одним из перспективных направлений является применение текстильного армирования, которое обладает рядом преимуществ перед традиционными методами армирования: меньшим весом, высокой коррозионной стойкостью и возможностью создания сложных геометрических форм. Лёгкость текстильных композитов снижает общую нагрузку на несущие элементы и фундамент, что особенно важно при реконструкции старых зданий с ограниченной несущей способностью оснований. Коррозионная стойкость текстильных материалов обеспечивает долговечность конструкций в агрессивных средах, а гибкость текстильных армирующих элементов позволяет создавать криволинейные и нестандартные формы без потери прочности.

Актуальность исследования обусловлена ростом числа аварийных ситуаций, связанных с разрушением строительных конструкций, что представляет серьёзную угрозу безопасности людей, ведёт к значительным экономическим потерям и наносит ущерб инфраструктуре населённых пунктов. Статистические данные подтверждают тревожную динамику: по результатам исследований за последние десятилетия доля аварий на эксплуатируемых зданиях и сооружениях достигает 85 % от общего числа подобных происшествий. Особенно остро проблема стоит в отношении объектов, возведённых в середине XX века. Сегодня около 20–25 % жилого фонда страны составляют здания постройки 1950–1960-х годов, многие из которых уже исчерпали нормативный срок службы и имеют скрытые дефекты конструкций.

Ключевыми причинами аварийных разрушений выступают ошибки проектирования, выражающиеся в неправильном учёте действующих нагрузок, ошибках в расчётах несущей способности, недостаточной проработке узлов сопряжения конструкций и игнорировании особенностей грунтовых условий и климатических воздействий. К числу значимых факторов также относятся нарушения технологии строительства, включающие низкое качество строительно-монтажных работ, использование материалов, не соответствующих проектным требованиям, и отклонения от утверждённой проектной документации в процессе возведения объекта. Существенную роль играют недостатки нормативной базы — устаревшие или недостаточно проработанные нормы проектирования, не учитывающие современные нагрузки и экстремальные воздействия, включая климатические аномалии и техногенные факторы.

Не менее значимы нарушения правил эксплуатации: отсутствие своевременного технического обслуживания, перегрузка конструкций из-за несанкционированной перепланировки или установки дополнительного оборудования, а также неучет износа материалов и накопления повреждений.

Воздействие внешних факторов - природных катастроф (землетрясений, наводнений, ураганов), техногенных аварий (пожаров, взрывов), прогрессирующего разрушения из-за коррозии, ползучести бетона и усталости материалов - дополнительно усугубляет ситуацию. Особую опасность создаёт недостаточный мониторинг состояния конструкций: отсутствие систем непрерывного контроля деформаций, напряжений и других критических параметров, особенно на уникальных и высотных объектах.

Примерами последствий таких проблем стали обрушение купола «Трансвааль-парка» в Москве в 2004 году из-за проектных ошибок и отсутствия экспериментальной проверки сложных конструктивных решений, авария в 3-м трубосварочном цехе металлургического комбината в Таганроге в 1995 году, вызванная чрезмерным прогибом несущей балки и некорректным армированием стоек, а также разрушение несущей стены жилого дома в Барнауле в 2013 году вследствие игнорирования признаков аварийного состояния конструкции. Особую опасность представляют случаи прогрессирующего разрушения, когда локальное повреждение приводит к цепной реакции и полному обрушению здания — это наиболее характерно для большепролетных и высотных сооружений, где отказ одного элемента (колонны, пилона, подвески вантовой системы) может вызвать лавинообразное разрушение всей конструкции.

Развитие методов информационного моделирования в строительстве создало необходимую базу для внедрения ИИ-технологий. А. И. Веккер подчёркивает важность BIM-технологий для комплексного подхода к проектированию объектов промышленного и гражданского строительства [3, с. 42]. По его мнению, трёхмерные информационные модели позволяют объединить все аспекты проектирования — от архитектурно-планировочных решений до инженерных систем — в единой цифровой среде, что существенно снижает вероятность ошибок на стадии разработки документации. BIM-модели содержат не только геометрическую информацию, но и данные о материалах, технологиях монтажа, сроках выполнения работ и стоимости, что делает их иде-

альной платформой для интеграции с интеллектуальными системами. Это создает предпосылки для формирования цифровых двойников зданий, способных сопровождать объект на всем жизненном цикле – от проектирования до эксплуатации и реконструкции. Л.В. Гиря и М.А. Савин отмечают роль информационного моделирования в обеспечении инвестиционной безопасности строительства [4, с. 18]. Они указывают, что использование BIM-технологий позволяет снизить риски перерасхода средств за счёт более точной оценки объёмов работ, оптимизации логистики материалов и предотвращения коллизий на этапе проектирования. Кроме того, информационная модель служит надёжным инструментом контроля качества строительства, поскольку содержит всю необходимую документацию и может быть использована для проверки соответствия выполненных работ проектным решениям.

Интеграция ИИ с BIM-системами открывает новые возможности для автоматизации проектирования, оптимизации расхода материалов и повышения надёжности строительных объектов на всех этапах их жизненного цикла, что согласуется с выводами Д.М. Тальникова и С.Г. Шеина о необходимости минимизации недостатков информационной модели здания на всех этапах его жизни [9, с. 292]. Объединение этих технологий позволяет создавать «умные» BIM-модели, способные самостоятельно анализировать проектные решения, предлагать оптимальные варианты армирования, подбирать материалы с учётом заданных критериев и прогнозировать поведение конструкций в долгосрочной перспективе. Например, ИИ-алгоритмы могут автоматически проверять проект на соответствие нормативным требованиям, выявлять потенциально слабые места и предлагать меры по их усилению.

А.Б. Ланчаков отмечает растущую роль ИИ в строительной отрасли [6, с. 169], подчёркивая, что интеллектуальные системы уже сейчас способны решать задачи, ранее требовавшие значительного времени и участия высококвалифицированных специалистов: от расчёта оптимальных параметров конструкций до управления строительными роботами на площадке. Т.С. Худайбердин демонстрирует успешное применение ИИ для расчёта каркасов монолитных зданий [10, с. 2125], показывая, что использование нейросетевых моделей позволяет сократить время расчётов на 40–60 % при сохранении высокой точности результатов.

А.В. Лукин исследует возможности ИИ для анализа железобетонных конструкций [7, с. 104] и приходит к выводу, что машинное обучение эффективно выявляет закономерности в поведении бетона и арматуры под нагрузкой, что особенно ценно при проектировании сооружений, работающих в сложных условиях. А.Н. Секисов с соавторами анализируют экономические аспекты внедрения ИИ в строительстве [8, с. 358] и отмечают, что первоначальные затраты на внедрение интеллектуальных систем окупаются за счёт снижения эксплуатационных расходов, сокращения сроков строительства и уменьшения количества аварийных ситуаций. Таким образом, сочетание BIM-технологий и ИИ-решений формирует принципиально новый подход к проектированию и строительству, позволяющий повысить надёжность сооружений, оптимизировать затраты и обеспечить безопасность на всех этапах жизненного цикла зданий и сооружений. Это особенно актуально в условиях растущих требований к энергоэффективности, долговечности и экологической устойчивости строительной отрасли.

Основными задачами при разработке компьютерной модели текстильного армирования являются: создание математического описания взаимодействия текстильных материалов с бетонной матрицей; разработка алгоритмов оптимизации параметров армирования; интеграция модели с существующими системами информационного моделирования; верификация результатов моделирования на основе экспериментальных данных. Решение этих задач позволит создать универсальный инструмент для проектирования и реконструкции зданий с применением текстильно-армированных композитов.

Предложенная компьютерная модель базируется на сочетании методов конечных элементов (МКЭ) и алгоритмов машинного обучения. МКЭ используется для расчёта напряжённо-деформированного состояния конструкции, а алгоритмы машинного обучения - для оптимизации параметров армирования и прогнозирования поведения материала в долгосрочной перспективе.

Математическая модель взаимодействия текстильного армирования с бетонной матрицей описывается системой уравнений механики деформируемого твёрдого тела:

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0 \qquad (1)$$

где σ – тензор напряжений, f – вектор объемных сил.

Тензор напряжений σ связан с тензором деформаций ε через закон Гука:

$$\sigma = C : \varepsilon, \qquad (2)$$

где C – тензор упругих модулей, а: - операция двойного скалярного произведения.

Тензор деформаций ε в свою очередь связан с перемещениями u в материале через градиент:

$$\varepsilon = \tfrac{1}{2}\,(\nabla u + (\nabla u)^T), \qquad (3)$$

где $(\nabla u)^T$ обозначает транспонирование градиента перемещений

Для описания нелинейного поведения композитного материала в рамках разработанной компьютерной модели вводится модель пластичности с кинематическим упрочнением, которая учитывает анизотропию свойств текстильного армирования. Этот подход принципиально отличается от традиционных моделей, оперирующих изотропными материалами, и позволяет более точно воспроизводить реальную работу композита в конструкции. Модель пластичности с кинематическим упрочнением базируется на представлении о том, что при пластическом деформировании поверхность текучести в пространстве напряжений не просто расширяется (как в случае изотропного упрочнения), а смещается в направлении действующих напряжений.

Это смещение отражает накопление микроповреждений и изменение внутренней структуры материала под нагрузкой. Математически процесс описывается через эволюцию центра поверхности текучести, который задаётся вектором кинематического упрочнения α. Условие текучести в общем виде записывается как:

$$f(\sigma,\alpha) = \sqrt{3/2}\,(\sigma-\alpha)' - \sigma_y = 0), \qquad (4)$$

где σ - тензор напряжений, α - тензор кинематического упрочнения, σ_y - начальный предел текучести, а штрих обозначает девиаторную часть тензора.

Эта модель позволяет адекватно отражать сложное механическое поведение композита при различных видах нагружения, включая циклические нагрузки.

В частности, она учитывает эффект Баушингера - изменение предела текучести материала при смене знака деформации. Физическая природа этого эффекта связана с перераспределением внутренних напряжений на микроуровне: после пластической деформации в одном направлении сопротивление материала деформированию в противоположном направлении снижается.

Анизотропия свойств задаётся через ориентацию волокон текстильного армирования, их плотность и взаимное расположение в бетонной матрице. Эти параметры определяют преимущественные направления прочности и жёсткости композита. В математической модели анизотропия отражается в тензоре жёсткости материала C, компоненты которого рассчитываются на основе углов ориентации слоёв армирования относительно глобальных осей конструкции; объёмной доли волокон в композите; механических характеристик отдельных компонентов (волокон и матрицы); параметров межфазного взаимодействия на границе волокно-матрица.

Тензор жёсткости C имеет пониженную симметрию по сравнению с изотропным материалом и может содержать до 21 независимой компоненты для общего случая анизотропии. Его структура напрямую влияет на распределение напряжений в конструкции, определяя зоны концентрации напряжений вблизи пересечений волокон; характер распространения трещин в матрице; механизмы разрушения на микроуровне (расслоение, выдергивание волокон, разрушение матрицы).

Для учёта эволюции анизотропии в процессе нагружения модель дополняется правилами обновления тензора жёсткости на каждом шаге расчёта. Например, при достижении предельных деформаций в каком-либо направлении соответствующие компоненты C уменьшаются, что имитирует деградацию свойств материала

Реализация модели в рамках метода конечных элементов требует специального алгоритма интегрирования определяющих соотношений, учитывающего нелинейность связи напряжений и деформаций; зависимость от истории нагружения; анизотропию упругопластических свойств; возможность разгрузки и повторного нагружения.

Обычно используется неявная схема интегрирования с коррекцией по методу Ньютона-Рафсона, обеспечивающая устойчивость расчёта даже при резких изменениях жёсткости. Практическое применение модели показывает, что её использование повышает точность прогнозирования: предельной несущей способности конструкций на 15–20 % по сравнению с изотропными моделями; усталостной долговечности при циклических нагрузках на 25–30 %; остаточной жёсткости после аварийных воздействий на 18–22 %.

Введение модели пластичности с кинематическим упрочнением и учётом анизотропии позволяет создать более реалистичное описание поведения текстильно-армированных композитов, что особенно важно для ответственных конструкций, работающих в сложных условиях эксплуатации. Это даёт возможность проектировщикам точнее оценивать запасы прочности, прогнозировать развитие повреждений и принимать обоснованные решения по усилению или ремонту сооружений. Учёт ползучести бетона и релаксации напряжений в армирующих волокнах осуществляется с помощью вязкоупругой модели Больцмана-Вольтерры. Данная модель описывает наследственные свойства материала, то есть зависимость текущих напряжений не только от текущей деформации, но и от всей предыстории нагружения. Математически это выражается через интегральное соотношение:

$$\sigma(t) = \int_0^t \mathbf{R}(t-\tau) : \dot{\varepsilon}(\tau)\,d\tau), \qquad (5)$$

где σ(t) - тензор напряжений в момент времени t, R - тензор релаксации, зависящий от состава бетона, условий твердения и эксплуатации, $\dot{\varepsilon}$ - скорость тензора деформаций, а τ - переменная интегрирования по времени.

Такой подход позволяет прогнозировать изменение напряжённо-деформированного состояния конструкции на протяжении всего срока службы, учитывая длительные процессы ползучести и релаксации для эффективной реализации модели в численных расчётах применяются методы численного интегрирования (например, квадратурные формулы), а также специальные алгоритмы аппроксимации ядра релаксации, что существенно снижает вычислительные затраты без потери точности.

Оптимизация параметров армирования выполняется с использованием гибридного алгоритма, сочетающего генетический алгоритм, как в работе H. Elbakry и S. Mohamed [11, с. 118]) и метод роя частиц.

Генетический алгоритм обеспечивает глобальный поиск оптимального решения в многомерном пространстве параметров, а метод роя частиц ускоряет сходимость в окрестности найденного оптимума за счёт локального уточнения. Такое сочетание позволяет эффективно решать задачу многокритериальной оптимизации с учётом нелинейных зависимостей и ограничений. Преимуществом предложенного гибридного подхода является устойчивость поиска глобального оптимума даже при высокой размерности пространства проектных параметров и наличии нелинейных ограничений.

$$F(x)=\alpha\cdot W(x)+\beta\cdot\delta(x)+\gamma\cdot C(x)\rightarrow\min, \quad (6)$$

где: W(x) - масса конструкции;

δ(x) - максимальное перемещение;

C(x) - стоимость материалов;

α,β,γ - весовые коэффициенты, определяемые в зависимости от приоритета задачи (снижение массы, повышение жёсткости, минимизация стоимости); x - вектор оптимизируемых параметров, включающий плотность армирования, ориентацию волокон, толщину слоёв, шаг укладки и тип текстильного материала.

Интеграция модели с BIM-системами осуществляется через открытые форматы данных (IFC), что позволяет использовать результаты моделирования на всех этапах жизненного цикла здания. Формат IFC обеспечивает совместимость с основными программными комплексами проектирования (Autodesk Revit, ArchiCAD, Renga и др.) и позволяет передавать данные о конструкции, параметрах армирования, результатах расчётов и рекомендациях по оптимизации. Это соответствует современным подходам к информационному моделированию, описанным в материалах VII Международной научно-практической конференции под общей редакцией А. А. Семёнова [5, с. 177]. Благодаря интеграции с BIM появляется возможность автоматически обновлять проектную документацию при изменении параметров армирования, формировать спецификации материалов и генерировать отчёты о соответствии нормативным требованиям.

Для обучения и верификации модели используются данные мониторинга реальных конструкций, а также результаты лабораторных испытаний образцов текстильно-армированного бетона. В процессе обучения применяются методы машинного обучения, рассмотренные L. Zhao и M. Wang [12], включая рекуррентные нейронные сети (RNN) и ансамблевые алгоритмы (Random Forest, Gradient Boosting). Рекуррентные сети особенно эффективны для анализа временных рядов данных мониторинга, позволяя выявлять тренды деградации свойств материала и прогнозировать остаточный ресурс конструкций. Ансамблевые методы, в свою очередь, обеспечивают высокую точность классификации состояний конструкции (нормальное, предаварийное, аварийное) на основе многомерных данных. Эти методы позволяют прогнозировать изменение свойств материала во времени с учётом воздействия эксплуатационных факторов: температуры, влажности, динамических нагрузок, коррозионных процессов. Обучение проводилось на базе данных, включающих результаты испытаний на сжатие, растяжение и изгиб; данные натурных испытаний фрагментов конструкций; информацию о поведении реальных объектов в процессе эксплуатации, полученную с помощью систем мониторинга (датчиков деформации, акселерометров, термометров и т. д.). Численные эксперименты проводились на примере реконструкции пятиэтажного жилого здания с заменой традиционных железобетонных панелей на текстильно-армированные аналоги. Корректность полученных результатов дополнительно подтверждалась сравнением с эталонными расчетами и экспериментальными данными, представленными в открытых научных источниках. Расчёты выполнялись с использованием МКЭ в программном комплексе ANSYS, интегрированном с модулем ИИ-оптимизации. Результаты моделирования показали снижение массы конструкции на 18 %, уменьшение расхода бетона на 22 %, повышение предела прочности на изгиб на 15 % и сокращение сроков проектирования на 28 %.

Энергоэффективность реконструированного здания увеличилась на 12 % за счёт оптимизации теплозащитных свойств ограждающих конструкций и снижения мостиков холода, что соответствует современным требованиям к энергоэффективности зданий, изложенным в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий». Практическая реализация предложенной модели включает следующие этапы: сбор исходных данных о конструкции и условиях эксплуатации (геометрические параметры, нагрузки, климатические условия, история эксплуатации); создание BIM-модели здания с детализацией элементов армирования; расчёт напряжённо-деформированного состояния с использованием МКЭ и учётом нелинейных свойств материала; оптимизация параметров армирования с помощью гибридного ИИ-алгоритма; верификация результатов на основе данных мониторинга (сравнение расчётных и фактических деформаций, напряжений, температур); формирование проектной документации с учётом требований энергоэффективности и нормативных ограничений (СП 63.13330, СП 50.13330 и др.).

Разработанная модель может быть применена для реконструкции существующих зданий с усилением несущих конструкций; проектирования новых энергоэффективных зданий; оценки остаточного ресурса конструкций; мониторинга состояния зданий в процессе эксплуатации. Перспективы развития исследования связаны с усовершенствованием алгоритмов машинного обучения для учёта нелинейного поведения материалов, включая эффекты усталости и накопления повреждений; интеграцией модели с системами «умного дома» для автоматического сбора данных мониторинга в режиме реального времени; разработкой мобильных приложений для оперативного контроля состояния конструкций с возможностью визуализации данных и формирования аварийных оповещений; расширением базы данных лабораторных испытаний для повышения точности прогнозов, в том числе за счёт включения данных о новых типах текстильных армирующих материалов и модификаторах бетона; адаптацией модели для работы с гибридными системами армирования (комбинация текстильных и стальных элементов); созданием облачной платформы для коллективного использования модели проектировщиками и инженерами с поддержкой многопользовательского доступа и совместной работы над проектами.

Внедрение предложенного решения позволит не только повысить надёжность и долговечность строительных конструкций, но и существенно сократить затраты на их проектирование, строительство и эксплуатацию, способствуя развитию ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий в строительной отрасли.

Научные результаты исследования позволяют сформулировать следующие ключевые положения: доказана возможность интеграции вязкоупругих моделей с механизмами пластического деформирования для описания поведения гетерогенных материалов в условиях сложного нагружения, что открывает путь к созданию универсальных расчётных схем для широкого класса композитных конструкций. Результаты исследования подтверждают эффективность применения гибридных оптимизационных алгоритмов в задачах многокритериального проектирования. Алгоритмы позволяют одновременно учитывать противоречивые требования к конструкции: обеспечение необходимой прочности, минимизацию материалоёмкости и стоимости, а также достижение требуемого уровня энергоэффективности. Обоснована необходимость перехода от статических расчётных моделей к динамическим, учитывающим историю нагружения и процессы деградации свойств материалов, - такой подход повышает достоверность прогнозов долговечности и остаточного ресурса. Подтверждена перспективность объединения методов искусственного интеллекта и информационного моделирования (BIM) для автоматизации проектирования и мониторинга конструкций, что создаёт основу для формирования «цифровых двойников» зданий с возможностью самодиагностики и адаптации.

Практические следствия работы выходят за рамки конкретного примера реконструкции пятиэтажного здания и включают формирование методологической базы для проектирования сооружений в сейсмически активных районах, где критична устойчивость к знакопеременным нагрузкам, а также создание инструментов для реновации ветхого жилого фонда с минимальными затратами на усиление несущих конструкций. Кроме того, результаты исследования позволяют разработать стандарты цифрового сопровождения зданий, включающие автоматизированный анализ данных мониторинга и прогнозное обслуживание, и снизить зависимость от дефицитных традиционных материалов - стали и тяжёлого бетона - за счёт внедрения лёгких композитов с заданными свойствами. Социально-экономическое значение исследования проявляется в сокращении экологического ущерба от строительства благодаря уменьшению объёмов производства цемента и энергоёмких материалов, а также в повышении безопасности городской среды за счёт более точных прогнозов поведения конструкций в экстремальных ситуациях. Внедрение разработанной модели способствует формированию новых компетенций для проектировщиков и инженеров: владение инструментами ИИ и BIM становится обязательным условием конкурентоспособности в отрасли. Помимо этого, исследование стимулирует инновации в смежных сферах - производстве композитов, разработке аппаратуры (датчики) и программного обеспечения для мониторинга. Перспективные направления развития концепции охватывают адаптацию модели для проектирования инфраструктурных объектов, таких как мосты, тоннели и гидротехнические сооружения, интеграцию с национальными системами «умного города» для централизованного контроля состояния зданий в масштабах мегаполиса, разработку мобильных решений для экспресс-оценки повреждений после чрезвычайных ситуаций и создание открытой базы данных по поведению композитных материалов в различных климатических зонах. Последнее позволит стандартизировать подходы к проектированию с учётом региональных особенностей.

Несмотря на достигнутые результаты, следует отметить ряд ограничений проведённого исследования. В модели было упрощено представление микроструктуры композита: не учитывались локальные дефекты волокон, такие как микротрещины и неравномерность пропитки, а также вариации толщины связующего слоя. Эти факторы могут оказывать влияние на точность прогноза разрушения на микроуровне. Расчёты выполнены для нормальных условий эксплуатации (T=20 ^{0}C, RH= 60 %), тогда как влияние экстремальных температур, циклов замораживания-оттаивания и агрессивных сред требует отдельного углублённого изучения. Модель верифицирована на образцах и элементах малого масштаба - например, на балках длиной до 3 м. При применении к крупным конструкциям, таким как мосты или высотные здания, потребуется дополнительная калибровка параметров. Гибридный алгоритм оптимизации, используемый в модели, требует значительных вычислительных ресурсов при расчёте сложных трёхмерных моделей, поэтому для рутинного проектирования целесообразно разработать упрощённые методики на основе полученных данных. Ещё одним ограничением выступает текущая нормативная база: существующие строительные нормы (СП, ГОСТ) не содержат прямых указаний по расчёту текстильно-армированных конструкций, а значит, внедрение модели потребует согласования с соответствующими регулирующими органами.

Дальнейшее развитие в рамках национальных программ цифровизации строительства позволит повысить безопасность зданий, особенно в сейсмически активных и коррозионно-опасных регионах, сократить углеродный след отрасли за счёт оптимизации расхода бетона и стали, а также создать базу данных «цифровых двойников» конструкций для предиктивного обслуживания.

Считаем, что преодоление обозначенных ограничений открывает значительные перспективы для практического внедрения разработанной модели. В первую очередь необходимо углубить изучение микроструктуры композита - провести микроскопический анализ образцов и экспериментально оценить влияние микротрещин, неравномерности пропитки и вариаций толщины связующего слоя на прочность конструкции. Параллельно следует расширить диапазон тестируемых условий эксплуатации: выполнить лабораторные испытания при экстремальных температурах (от – 40 С до +80 С), провести циклические тесты на замораживание-оттаивание и коррозионные испытания в агрессивных средах позволит разработать корректирующие коэффициенты для модели.

Для масштабирования решения критически важна верификация на крупномасштабных элементах (фермах, колоннах высотных зданий) и создание методики пересчёта параметров при переходе от лабораторных образцов к реальным объектам. Чтобы сделать модель применимой для рутинного проектирования, нужно оптимизировать вычислительные алгоритмы: например, внедрить нейросетевые аппроксиматоры и суррогатные модели для ускорения расчётов, а также создать облегчённую версию ПО с интеграцией в BIM-системы.

Полученные результаты могут служить методической основой для разработки нормативных документов по расчету текстильно-армированных конструкций и дальнейшего внедрения технологий ИИ в практику цифрового строительства.

Литература

1. **Аль-Згуль И.Г., Морозова Н.Е.** Причины аварии строительных конструкций/ И.Г Аль-Згуль, Н.Е. Морозова// Статья в сборнике трудов конференции. – 2022. - С. 32-33.
2. **Войку И. П.** Дореволюционный этап истории развития проектного дела в России/ И.П. Войку // Beneficium. - 2020. – №. 1 (34). - С. 30–38.
3. **Веккер А.И.** Информационное моделирование объектов промышленного и гражданского строительства/ А.И. Веккер // Шаг в науку. - 2021. - № 4. - С. 40–45
4. **Гиря Л.В., Савин М.А.** Роль информационного моделирования зданий в инвестиционной безопасности в строительстве/ Л.В. Гиря, М.А. Савин//Статья в сборнике трудов конференции. – 2022. С. 18-20.
5. Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы VII Международной научно-практической конференции / под общ. ред. **А.А. Семенова**; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2024. - 381 с.
6. **Ланчаков А.Б.** Инновационные технологии и искусственный интеллект в сфере строительства/ **А.Б. Ланчаков**// Вестник НИЦ «Строительство». - 2024. - № 43(4) – С.166-181.
7. **Лукин, А.В**. Возможности применения искусственного интеллекта для анализа железобетонных конструкций // «Молодой учёный». - 2023. - № 20 (467). - С. 102–105.
8. **Секисов А.Н., Коженко Н. В., Папоян А.А., Кристя Н.Г., Прозорова А.С.** Основные тенденции и направления применения искусственного интеллекта в строительном секторе национального хозяйства: организационные и экономические аспекты/ А.Н. Секисов и [др.] // «Экономика: вчера, сегодня, завтра». - 2023. - Том 13. - № 10А. - С. 357–366.
9. **Тальников Д.М., Шеин С.Г.** Недостатки информационной модели здания на всех этапах его жизни и пути минимизации их влияния/ Д.М. Тальников, С.Г. Шеин // Инженерный вестник Дона. 2020. - № 11. - С. 290–299.
10. **Худайбердин Т.С.** Использование ИИ в расчете каркасов монолитных зданий / Т.С. Худайбердин// Международный научный журнал «Вестник науки». – 2025. - № 6 (87). – Т. 3. - С. - 2121 - 2139.
11. **Elbakry H., Mohamed S**. Genetic Algorithm Optimization of Reinforced Concrete Frames // Journal of Structural Engineering. - 2025. - Т. 151. - С. 112-122.
12. **Zhao L., Wang M.** Machine learning in structural health monitoring: state-of- the-art review // Structural Control and Health Monitoring. - 2022. - Т. 29. -e2940.

Application of machine learning algorithms in the design of textile reinforcing systems to improve the strength and energy parameters of reconstructed structures

Anchakov R.V.
Southwest State University

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

The article addresses the development and optimization of a computer model for textile reinforcement of building structures using artificial intelligence (AI) technologies for energy-efficient reconstruction of buildings and structures. The proposed model enhances the strength and operational characteristics of structures through precise load distribution calculations, selection of optimal reinforcement parameters, and prediction of material behaviour under various operating conditions. Numerical experiments have been conducted to confirm the effectiveness of the proposed model. The research results demonstrate the possibility of reducing the material intensity of structures by 15–20 %. The obtained data can be applied in the design and reconstruction practice for buildings of various purposes.

Keywords: textile reinforcement, building structures, energy-efficient reconstruction, artificial intelligence (AI), machine learning, building information modeling (BIM), computer modeling, reinforcement parameter optimization.

References

1. Al-Zgul I.G., Morozova N.E. Causes of failures of building structures / I.G. Al-Zgul, N.E. Morozova // Article in the conference proceedings. – 2022. – pp. 32–33.
2. Voiku I.P. The pre-revolutionary stage in the development of design practice in Russia / I.P. Voiku // Beneficium. – 2020. – No. 1 (34). – pp. 30–38.
3. Vekker A.I. Information modeling of industrial and civil construction facilities / A.I. Vekker // Step into Science. – 2021. – No. 4. – pp. 40–45.
4. Girya L.V., Savin M.A. The role of building information modeling in investment security in construction / L.V. Girya, M.A. Savin // Article in the conference proceedings. – 2022. – pp. 18–20.
5. Information Modeling in Construction and Architecture: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference / ed. by A.A. Semenov; Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. – Saint Petersburg: SPbGASU, 2024. – 381 p.
6. Lanchakov A.B. Innovative technologies and artificial intelligence in the construction industry / A.B. Lanchakov // Bulletin of the Research Center “Construction”. – 2024. – No. 43(4). – pp. 166–181.
7. Lukin A.V. Possibilities of using artificial intelligence for the analysis of reinforced concrete structures // Young Scientist. – 2023. – No. 20 (467). – pp. 102–105.
8. Sekisov A.N., Kozhenko N.V., Papoyan A.A., Kristya N.G., Prozorova A.S. Main trends and directions in the application of artificial intelligence in the construction sector of the national economy: organizational and economic aspects / A.N. Sekisov et al. // Economics: Yesterday, Today and Tomorrow. – 2023. – Vol. 13. – No. 10A. – pp. 357–366.
9. Talnikov D.M., Shein S.G. Shortcomings of the building information model at all stages of its life cycle and ways to minimize their impact / D.M. Talnikov, S.G. Shein // Engineering Bulletin of the Don. – 2020. – No. 11. – pp. 290–299.
10. Khudaiberdin T.S. Use of artificial intelligence in the analysis of monolithic building frames / T.S. Khudaiberdin // International Scientific Journal “Bulletin of Science”. – 2025. – No. 6 (87). – Vol. 3. – pp. 2121–2139.
11. Elbakry H., Mohamed S. Genetic Algorithm Optimization of Reinforced Concrete Frames // Journal of Structural Engineering. – 2025. – Vol. 151. – pp. 112–122.
12. Zhao L., Wang M. Machine learning in structural health monitoring: state-of-the-art review // Structural Control and Health Monitoring. – 2022. – Vol. 29. – e2940.