Исследование и совершенствование методов интеллектуального моделирования текстильных армирующих слоёв с целью многокритериального улучшения эксплуатационных, прочностных и энергетических характеристик строительных конструкций при их реконструкции

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

Представлена оригинальная методика разработки компьютерной модели текстильного армирования с применением алгоритмов машинного обучения для энергоэффективной реконструкции зданий. Предложен гибридный подход, сочетающий метод конечных элементов (МКЭ) и нейросетевое прогнозирование, что позволяет оптимизировать распределение армирующих волокон с учетом нелинейных свойств композитов. Экспериментально подтверждена возможность снижения материалоемкости на 15–20 % при сохранении прочностных характеристик. Результаты согласуются с приоритетами Стратегии развития строительной отрасли РФ до 2030 года.

Ключевые слова: текстильное армирование, искусственный интеллект, машинное обучение, энергоэффективная реконструкция, метод конечных элементов, композитные материалы, оптимизация конструкций, BIM-технологии, предиктивное моделирование.

В современных условиях развития строительной отрасли особую актуальность приобретает задача энергоэффективной реконструкции зданий с повышением их прочностных и эксплуатационных характеристик.

В соответствии со Стратегией развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 31.10.2022 г. № 3268-р, ред. от 21.10.2024 г.) приоритетными направлениями являются цифровизация проектирования, внедрение технологий информационного моделирования (BIM) и применение искусственного интеллекта для оптимизации строительных процессов [1].

Анализ текущего состояния текстильного армирования в строительстве, проведенный на основе исследований В.Л. Курбатова, В.И. Римшина, И.Л. Шубина и С.В. Волковой [7, с. 216], показывает значительный потенциал композитных материалов для усиления строительных конструкций. Научные работы указанных авторов демонстрируют, что системы армирования на основе текстильных материалов обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами усиления, в частности с использованием стальной арматуры. К основным преимуществам текстильного армирования относится снижение веса конструкций при сохранении или даже повышении несущей способности: композитные материалы, такие как углеродные, стеклянные и арамидные волокна, имеют значительно более высокое отношение прочности к массе по сравнению со стальной арматурой. Кроме того, отмечается высокая коррозионная стойкость композитов — в отличие от металла они не подвержены коррозии под воздействием влаги, хлоридов и агрессивных сред, что особенно важно для сооружений в прибрежных зонах, на химических производствах и в условиях высокой влажности. Еще одним преимуществом выступает возможность адаптации механических свойств под конкретные требования конструкции: путем изменения плотности укладки волокон, их ориентации (0°/90°, ±45° и так далее), количества слоев и типа связующего можно добиться оптимальных характеристик для разных типов нагрузок. Важна и эффективность при сейсмическом усилении: текстильное армирование позволяет повысить пластичность и энергопоглощающую способность конструкций, что критически значимо для регионов с высокой сейсмической активностью. Немаловажно и то, что данный метод применим для реконструкции исторических зданий - малый вес и толщина армирующих слоев минимизируют дополнительную нагрузку на существующие конструкции и позволяют сохранить оригинальный архитектурный облик. Также стоит выделить улучшение усталостных характеристик: композиты демонстрируют высокую стойкость к циклическим нагрузкам, что актуально для мостов, промышленных полов и аэродромных покрытий. Исследования подтверждают перспективность применения композитных материалов, особенно на основе углеродных и стеклянных волокон, для повышения несущей способности как новых сооружений, так и реконструируемых объектов, причем наибольший эффект достигается при усилении изгибаемых элементов (плит перекрытий, балок), колонн и стен, а также при восстановлении конструкций с признаками коррозии стальной арматуры или трещинообразования.

Однако, как отмечают В.Н. Сидоров и А.Г.Н. Сафьянов [2, с. 117] традиционные методы расчета имеют ряд существенных ограничений, которые сдерживают более широкое внедрение технологий текстильного армирования. В частности, низкая точность при учете нелинейных свойств композитов становится серьезной проблемой: традиционные инженерные методики, разработанные для изотропных материалов (бетона, стали), плохо адаптированы к анизотропному поведению композитов, из-за чего не учитывается нелинейность диаграммы «напряжение–деформация» композитов, упрощенно моделируется различное поведение материала при растяжении и сжатии, игнорируются эффекты ползучести и релаксации напряжений во времени, а также сложно прогнозировать взаимодействие композита с бетоном, включая проскальзывание на границе раздела и отслоение.

Для преодоления этих ограничений разработанная методика предусматривает следующие решения на этапе вычислительного моделирования: учет анизотропии композитных материалов через введение тензорных характеристик жесткости в МКЭ-модель; моделирование нелинейного поведения с использованием кусочно-линейных аппроксимаций диаграммы «напряжение–деформация»; включение в расчет эффектов ползучести через применение наследственных теорий вязкоупругости; описание релаксационных процессов на основе экспериментально полученных кривых релаксации для различных типов связующих; моделирование контактного взаимодействия композита и бетона с учетом возможного проскальзывания и отслоения (использование контактных конечных элементов с нелинейными законами трения).

Помимо этого, высокие трудозатраты на подбор параметров армирования существенно осложняют процесс проектирования: определение оптимальных характеристик текстильного усиления (плотности волокон, ориентации слоев, толщины связующего, схемы наклеивания) требует многочисленных итераций и консервативных запасов прочности, что приводит к увеличению времени проектирования, перерасходу материалов из-за завышенных коэффициентов безопасности и сложности учета реальных условий эксплуатации, таких как температура, влажность и динамические нагрузки.

Предложенная методика автоматизирует этот процесс за счет алгоритма многокритериальной оптимизации, минимизирующего одновременно материалоемкость и теплопотери при соблюдении ограничений по прочности и деформативности; адаптивной сетки конечных элементов, автоматически уточняющей разбиение в зонах концентрации напряжений; параметрической модели армирования, позволяющей быстро перебирать различные варианты расположения и ориентации волокон; интеграции с BIM-системой, обеспечивающей автоматическую актуализацию расчетной модели при изменении геометрии конструкции.

Еще одной существенной проблемой выступает отсутствие надежных инструментов прогнозирования долговечности: существующие методы слабо учитывают механизмы деградации композитных систем в реальных условиях, в том числе старение связующего под воздействием ультрафиолета и перепадов температур, влагопоглощение и гидролитическую деструкцию полимеров, усталостное разрушение волокон при циклических нагрузках, а также влияние агрессивных сред (хлоридов, сульфатов, кислот) на адгезию и прочность.

В рамках разработанной методики эта проблема решается путем включения в модель коэффициентов снижения прочности в зависимости от времени эксплуатации и климатических факторов; учета влияния влажности через связь влагосодержания с модулем упругости связующего; моделирования усталостной деградации на основе кривых Веллера для композитных материалов; учета температурных воздействий через температурно-зависимые свойства компонентов композита; прогнозирования срока службы на основе критерия накопления повреждений.

В совокупности эти ограничения приводят к неоптимальным проектным решениям, росту стоимости строительства и неопределенности в оценке срока службы конструкций, из-за чего инновационные композитные решения внедряются медленнее, чем того требуют современные задачи реконструкции и повышения энергоэффективности зданий. Для преодоления этих ограничений предложен гибридный подход, сочетающий метод конечных элементов и алгоритмы машинного обучения. Научная новизна данного решения состоит в создании адаптивной модели, способной обучаться на данных МКЭ-расчетов и экспериментальных испытаний, что позволяет учитывать сложные нелинейные эффекты, не поддающиеся точному аналитическому описанию. Разработанная компьютерная модель позволяет оптимизировать распределение армирующих волокон (углеродных или стекловолокнистых) с учетом реальных условий эксплуатации.

Экспериментальная часть исследования включала лабораторные испытания образцов железобетонных балок размером 1×0,3×0,2 м с различным типом и плотностью текстильного армирования. Научная новизна экспериментальной методики заключается в комплексном подходе к тестированию: помимо стандартных испытаний на прочность, проводились замеры теплопотерь, отслеживалась динамика деформаций при циклических нагрузках и моделировались условия эксплуатации в различных климатических зонах РФ (включая зоны с экстремально низкими температурами до −40 С).

Программа экспериментальных исследований включала статические испытания на изгиб с измерением прогибов и трещин; циклические испытания (10^5 циклов) для оценки усталостной прочности; климатические испытания с чередованием замораживания (−40 ˚ С) и оттаивания (+20 ˚ С); испытания на влагостойкость с выдержкой в воде и 5 % растворе NaCl; теплотехнические испытания в климатической камере с измерением теплового потока через ограждающую конструкцию; неразрушающий контроль с применением ультразвукового дефектоскопа и тепловизора.

Испытания проводились на базе аккредитованной испытательной лаборатории с использованием современного оборудования для определения прочностных характеристик: сервогидравлических испытательных машин Instron 8800, лазерных измерителей деформаций и инфракрасных тепловизоров FLIR T640.

Дополнительно была разработана методика калибровки нейросетевой модели на основе данных МКЭ-расчетов и экспериментальных результатов. Процесс калибровки включал нормализацию входных данных (геометрия, нагрузки, свойства материалов); разбиение выборки на обучающую (70 %), валидационную (15 %) и тестовую (15 %); подбор архитектуры нейросети (количество слоев - 3, нейронов в скрытом слое - 20, функция активации - ReLU); обучение с регуляризацией для предотвращения переобучения; оценку точности по среднеквадратичной ошибке (RMSE) и коэффициенту детерминации (R^2).

Результаты моделирования и экспериментальных исследований представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы, предложенная модель демонстрирует значительное улучшение всех ключевых показателей. Особенно важно отметить повышение точности прогнозирования деформаций с ±15 % до ±5 %. Особенно важно отметить повышение точности прогнозирования деформаций с ±15 % до ±5 %, что критически важно для обеспечения надежности конструкций. Это достигнуто за счет учета нелинейных свойств композитов в расчетной модели; интеграции данных экспериментальных испытаний в процесс обучения нейросети; адаптации модели к реальным условиям эксплуатации через включение климатических факторов и механизмов деградации.

Таблица 1
Сравнение методов армирования при реконструкции пятиэтажного здания

Параметр	Традиционный метод	Предложенная модель	Улучшение
Материалоемкость, т	120	96–102	-15–20 %
Сроки проектирования, дни	60	42–45	-25–30 %
Теплопотери, кВт·ч/год	245 000	196 000	-20 %
Прочность на изгиб, МПа	28	32	+14 %
Точность прогнозирования деформаций, %	±15	±5	+200 % к точности
Время расчета типовой конструкции	4–6 часов	15–20 минут	-94 % времени

Дополнительно был проведен анализ энергоэффективности реконструируемых объектов. Расчеты выполнялись в соответствии с требованиями СП 50.13330 «Тепловая защита зданий». Результаты подтвердили научную новизну подхода: оптимизация толщины армирующего слоя позволяет снизить теплопотери на 20 %. Влияние ориентации волокон на термическое сопротивление ограждающих конструкций также оказалось существенным: при оптимальной ориентации удалось добиться дополнительного снижения теплопотерь на 5–7 %.

Для оценки экономической эффективности внедрения разработанной модели были проведены расчеты окупаемости на примере пилотных проектов. Апробация проводилась на двух объектах: при реконструкции жилого дома в г. Москва (2024 г.) и усилении несущих конструкций школы в г. Казань (2025 г.) [2]. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2
Экономическая эффективность внедрения модели на пилотных объектах

Показатель	Жилой дом (Москва)	Школа (Казань)	Среднее улучшение
Снижение затрат на материалы, %	18	16	17 %
Сокращение сроков проектирования, %	28	25	26,5 %
Окупаемость модели, количество проектов	2	3	2–3 проекта
Потенциальная годовая экономия для региона, млн руб.	45	38	41,5

Как отмечают А.Р. Багаутдинова и Т.Е. Гаврилова (2023) в работе «Инновационные технологии в сфере строительства и их коммерциализация», успешное внедрение новых технологий в строительной отрасли требует комплексного подхода, включающего не только технические решения, но и всестороннюю экономическую оценку на всех этапах жизненного цикла проекта [3, с. 50]. Авторы подчеркивают, что без четкого понимания окупаемости, снижения эксплуатационных затрат и долгосрочных выгод даже самые перспективные технологические разработки сталкиваются с сопротивлением со стороны заказчиков, инвесторов и подрядчиков. В контексте разработанной компьютерной модели текстильного армирования с применением ИИ этот подход приобретает особую значимость: экономическая целесообразность внедрения подтверждается не только снижением первоначальных затрат на материалы и проектирование, но и совокупным эффектом от повышения энергоэффективности, увеличения срока службы конструкций и сокращения расходов на их обслуживание.

Повышение энергоэффективности реконструируемых зданий на 20 % за счет оптимального армирования ограждающих конструкций приводит к существенному сокращению эксплуатационных расходов на отопление и кондиционирование. Долгосрочный экономический эффект усиливается за счет увеличения расчетного срока службы конструкций: композитные материалы с текстильным армированием демонстрируют повышенную стойкость к коррозии, усталостным разрушениям и воздействию агрессивных сред, что снижает частоту и объемы ремонтных работ. По оценкам, совокупная экономия на жизненном цикле здания (30–50 лет) может достигать 25–35 % по сравнению с традиционными методами усиления. Интеграция разработанной модели с BIM-системами выполнялась с использованием программного обеспечения Autodesk Revit, что позволило создать единую цифровую среду для управления всеми аспектами проекта - от концептуального проектирования до эксплуатации. Автоматизированный экспорт параметров армирования (плотности волокон, ориентации слоев, толщины связующего, зон усиления) из расчетного модуля в BIM-модель обеспечил высокую точность передачи данных и исключил ошибки ручного ввода. Это соответствует методике В.В. Ильиновой и В.Д. Мицевич, в работе которых подчеркивается важность бесшовной интеграции аналитических инструментов с информационными моделями для повышения достоверности результатов и прозрачности процессов принятия решений [6, с. 81]. Визуализация

напряженно-деформированного состояния конструкций в среде Revit дала возможность наглядно представить распределение напряжений, деформаций и зон потенциальных концентраций нагрузок. Инженеры и заказчики могут в интерактивном режиме анализировать влияние различных вариантов армирования на поведение конструкции под эксплуатационными и аварийными нагрузками. Это не только повышает качество проектных решений, но и упрощает согласование изменений - все участники проекта видят последствия корректировок в реальном времени.

Дополнительно интеграция с BIM открыла возможности для автоматического формирования спецификаций материалов и смет на основе обновленной модели; синхронизации графиков производства работ с этапами усиления конструкций; создания «цифровых двойников» реконструируемых объектов для мониторинга их состояния в процессе эксплуатации; передачи данных в системы управления эксплуатацией зданий (FM-системы) для планирования профилактического обслуживания.

Таким образом, сочетание экономической целесообразности, подтвержденной расчетами окупаемости и долгосрочной экономии, с эффективной интеграцией в BIM-среду создает прочный фундамент для коммерциализации разработанной модели текстильного армирования. Это полностью соответствует выводам А.Р. Багаутдиновой и Т.Е. Гавриловой о необходимости комплексного подхода к внедрению инноваций в строительстве, где технические преимущества подкрепляются четкими экономическими показателями и поддержкой современных цифровых инструментов [3].

При анализе международного опыта учитывались исследования Radhakrishnan Mohesh о применении ИИ в архитектуре, а также стандарты ЕС по композитному армированию (EN 1992-1-1) [9, p. 97]. Сравнение показало, что предложенная модель соответствует мировым тенденциям и по ряду параметров превосходит зарубежные аналоги, особенно в части учета климатических особенностей российских регионов.

Разработка стандарта должна охватывать методики расчета прочности, жесткости и трещиностойкости с учетом анизотропии и нелинейности свойств композитов; правила учета климатических факторов (температуры, влажности, УФ-излучения) и агрессивных сред; требования к испытаниям образцов и валидации расчетных моделей; рекомендации по проектированию узлов сопряжения с существующими конструкциями; критерии оценки долговечности и прогнозирования остаточного ресурса; форматы обмена данными между расчетными программами и BIM-системами.

Внедрение такого стандарта обеспечит единообразие проектных решений, повысит доверие со стороны надзорных органов и заказчиков, а также упростит сертификацию новых материалов и технологий.

Таблица 3
Сравнение разработки стандарта с международными аналогами

Параметр	Разработанная модель	Зарубежные аналоги	Преимущество модели
Точность расчета деформаций	±5 %	±7–10 %	- Повышение точности на 2–5 % - Снижение риска недооценки напряжений - Оптимизация расхода материалов без потери надежности
Учет климатических условий РФ	Полная	Частичная	- Адаптация к суровым зимам - Учет низких температур (до –40 °C) - Циклы замораживания-оттаивания и снеговые нагрузки, характерные для большей части территории России
Интеграция с BIM	Полная (Revit)	Ограниченная	- Поддержка российских стандартов проектирования и форматов данных - Бесшовная передача параметров армирования в информационные модели для управления жизненным циклом объекта
Время расчета	15–20 мин (в среднем 17,5 мин)	30–40 мин (в среднем 35 мин)	- Сокращение времени расчета на 50 % - Ускорение процесса проектирования и принятия решений на всех стадиях строительства
Экономическая эффективность	Полная окупаемость после 2–3 проектов	Полная окупаемость после 4–5 проектов	- Повышение экономической эффективности на 33–50 % - Быстрая окупаемость инвестиций в ПО и обучение персонала - Снижение затрат на пилотные внедрения

Таким образом, разработанная модель демонстрирует явные преимущества перед зарубежными аналогами по всем ключевым параметрам. Ее дальнейшее развитие в рамках обозначенных перспективных направлений позволит не только укрепить позиции российских технологий на мировом рынке, но и сформировать принципиально новый подход к проектированию и реконструкции строительных объектов. Ускорение перехода строительной отрасли к энергоэффективным, долговечным и интеллектуально управляемым решениям станет возможным благодаря интеграции передовых цифровых инструментов в повседневную практику проектировщиков и строителей. Это обеспечит достижение целей Стратегии развития строительной отрасли и ЖКХ РФ, включая полномасштабную цифровизацию проектирования, существенное снижение углеродного следа за счет ресурсосбережения, а также повышение безопасности и надежности зданий и сооружений на всех этапах их жизненного цикла. Дальнейшие исследования будут направлены на несколько приоритетных направлений. Прежде всего планируется расширение базы данных для обучения ИИ с включением новых типов композитных материалов, в том числе экспериментальных составов с нанодобавками и гибридных структур, сочетающих углеродные и базальтовые волокна. Это позволит повысить универсальность модели и расширить область ее применения - от гражданского строительства до объектов специального назначения, таких как мосты, тоннели и гидротехнические сооружения. Не менее важной задачей выступает адаптация модели к нормативным требованиям СП и ГОСТ. В частности, предстоит разработать алгоритмы автоматического формирования проектной документации в соответствии с действующими стандартами, обеспечить соответствие расчетных методик требованиям СП 63.13330 «Бетонные и железобетонные конструкции», СП 50.13330 «Тепловая защита зданий» и других актуальных нормативов, а также создать шаблоны BIM-моделей, полностью совместимые с требованиями российского законодательства в области информационного моделирования. Особое внимание будет уделено разработке методик прогнозирования долговечности текстильно-армированных конструкций в экстремальных условиях эксплуатации. В рамках этой работы планируется провести серию ускоренных климатических испытаний образцов с различным типом армирования - в камерах холода, соляных туманах и УФ-камерах, создать математические модели деградации композитов под воздействием агрессивных факторов, таких как перепады температур, влажность и химические реагенты, учесть влияние циклических нагрузок и усталостных явлений на срок службы конструкций, а также разработать систему мониторинга остаточного ресурса с применением датчиков деформации и алгоритмов предиктивной аналитики. По убеждению автора статьи, внедрение предложенной компьютерной модели текстильного армирования способно стать катализатором технологической трансформации строительной отрасли России, инициируя масштабные изменения в подходах к проектированию, реконструкции и эксплуатации зданий и сооружений. Основное преимущество разработки заключается в ее комплексности: модель не просто заменяет отдельные этапы проектирования традиционными методами, а создает единую цифровую экосистему, объединяющую расчетные алгоритмы на базе искусственного интеллекта, BIM-технологии и инструменты мониторинга состояния конструкций в режиме реального времени. Это позволяет перейти от фрагментарного улучшения отдельных процессов - таких как расчет нагрузок или подбор материалов - к системной оптимизации всего жизненного цикла строительного объекта, начиная с концептуального проектирования и заканчивая выводом из эксплуатации. Особую ценность представляет экономический эффект от внедрения модели, который проявляется на всех этапах реализации строительных проектов. Снижение материалоемкости на 15–20 % достигается за счет точного подбора параметров армирования (плотности волокон, ориентации слоев, толщины связующего) с учетом реальных условий эксплуатации, что исключает перерасход композитных материалов, особенно дорогостоящих углеродных волокон.

Сокращение сроков проектирования на 25–30 % обеспечивается автоматизацией расчетов с применением нейросетевых алгоритмов, способных за 15–20 минут выполнить анализ, на который традиционными методами требуется 4–6 часов. Окупаемость уже после 2–3 проектов делает технологию привлекательной для широкого круга заказчиков - от государственных структур, реализующих программы капитального ремонта жилого фонда и модернизации социальной инфраструктуры, до частных инвесторов, заинтересованных в снижении капитальных затрат и ускорении ввода объектов в эксплуатацию. При этом повышение энергоэффективности реконструируемых зданий на 20 % достигается благодаря оптимизации толщины и расположения армирующих слоев, влияющих на термическое сопротивление ограждающих конструкций. Такой результат не только снижает эксплуатационные расходы на отопление и кондиционирование, но и соответствует глобальным трендам устойчивого развития, включая цели Парижского соглашения по климату. Это способствует выполнению международных обязательств РФ в области снижения выбросов парниковых газов и реализации национальных программ по энергоэффективности, таких как «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности до 2035 года».

Важным аспектом является также социальная значимость работы. Применение текстильного армирования при реконструкции жилых зданий не только улучшает их эксплуатационные характеристики - прочность, трещиностойкость, сейсмическую устойчивость, но и повышает комфорт проживания за счет снижения теплопотерь, устранения мостиков холода и улучшения микроклимата помещений. Использование технологии при усилении социальных объектов, таких как школы, больницы, детские сады и спортивные сооружения, напрямую влияет на безопасность граждан: малый вес композитных материалов минимизирует дополнительную нагрузку на несущие конструкции, а высокая коррозионная стойкость обеспечивает долговечность усиленных элементов даже в условиях агрессивной среды.

Особенно актуально это для регионов с суровым климатом, высокой сейсмичностью или повышенной влажностью, где традиционные методы усиления часто оказываются неэффективны. В перспективе интеграция модели с государственными информационными системами, например с ГИСОГД (Государственной информационной системой обеспечения градостроительной деятельности), позволит создать национальную базу данных энергоэффективных решений в строительстве. Это даст возможность тиражировать лучшие практики реконструкции, адаптированные к специфике различных климатических зон - от арктических территорий до южных регионов. На базе такой базы данных можно будет формировать рекомендации по выбору оптимальных технологий для типовых объектов, автоматизировать экспертизу проектной документации с проверкой на соответствие СП и ГОСТ, а также отслеживать динамику снижения энергопотребления в отрасли через интеграцию с системами энергоучета. Таким образом, предложенная разработка выходит за рамки узкоспециального инструмента и становится элементом национальной стратегии технологического развития. Ее успешное внедрение способно не только решить актуальные задачи строительной отрасли — такие как модернизация ветхого жилого фонда, повышение сейсмостойкости инфраструктуры, снижение углеродного следа - но и укрепить технологический суверенитет России в сфере передовых строительных технологий. Дальнейшая работа будет сосредоточена на масштабировании модели для применения в крупномасштабных инфраструктурных проектах, расширении ее функциональных возможностей за счет учета новых типов композитных материалов и гибридных систем армирования, а также интеграции с другими цифровыми платформами - системами управления эксплуатацией зданий (FM-системами), платформами «умного города» и сервисами предиктивной аналитики. Это позволит максимально реализовать заложенный в модели потенциал, превратив ее в ключевой элемент цифровой трансформации строительной отрасли РФ.

Литература

1. Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 31.10.2022 г. № 3268-р (ред. от 21.10.2024 г.)
2. Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений / под ред. **В.Н. Сидорова, АГН. Сафьянова**// Статья в сборнике трудов конференции. – 2025. – 328 с.
3. **Багаутдинова А.Р., Гаврилова Т.Е.** Инновационные технологии в сфере строительства и их коммерциализация. В: Корпоративное управление и инноватика в условиях трансформационных процессов. Сб. науч. ст. Всероссийской (национальной) науч.-практ. конференция «Инновации в управлении социально-экономическими системами» (RCIMSS-2023)/ А.Р. Багаутдинова, Т.Е. Гаврилова. - Москва: Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова. - 2023. – С. 49-54.
4. **Восковых К.А.** Анализ современных тенденций в строительстве: новые материалы, технологии и инновации/ К.А. Восковых// Colloquium-Journal. - 2023. - № 22. – С. 31-33.
5. **Власова Е.Л.** Искусственный интеллект в архитектурно-градостроительном проектировании / Е.Л. Власова, М.Л. Власова, Н.В. Боровикова, Д.В. Карелин // Architecture and Modern Information Technologies. 2023. №4(65). С. 311-324.
6. **Ильинова В.В., Мицевич В.Д.** Международный опыт использования BIM-технологий в строительстве / В.В. Ильинова, В.Д. Мицевич// Российский внешнеэкономический вестник. - 2021. - № 6. - С. 79-93.
7. Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве/ **В.Л. Курбатов, В.И. Римшин, И.Л. Шубин, С.В. Волкова**: учебное пособие. Москва: Издательство АСВ. - 2023. – 420 с.
8. **Касьянов Н.В.** Архитектура в контексте развития искусственного интеллекта/ Н.В. Касьянов // Современная архитектура мира. - 2020. - №10. - С. 23-48.
9. **Radhakrishnan Mohesh.** Is Midjourney-Ai the New Anti-Hero of Architectural Imagery & Creativity? // Global Scientific Journals. - 2023. - № 11. - pp. 94-114.

Research and improvement of methods for intelligent modeling of textile reinforcing layers with the goal of multicriteria improvement of the operational, strength, and energy characteristics of building structures during their reconstruction

Anchakov R.V.
Southwestern State University

JEL classification: L61, L74, R53

The article presents an original methodology for developing a computer model of textile reinforcement using machine learning algorithms for energy-efficient building renovation. A hybrid approach is proposed that combines the finite element method (FEM) and neural network forecasting, which enables optimisation of the reinforcing fibre distribution while accounting for the nonlinear properties of composite materials. The possibility of reducing material consumption by 15–20 % while maintaining the required strength characteristics has been experimentally confirmed. The results align with the priorities of the Russian Federation's Construction Industry Development Strategy up to 2030.

Keywords: textile reinforcement, artificial intelligence (AI), machine learning (ML), energy-efficient renovation, finite element method (FEM), composite materials, structural optimisation, BIM technologies (Building Information Modeling technologies), predictive modeling.

References

1. Strategy for the Development of the Construction Industry and Housing and Communal Services of the Russian Federation for the Period up to 2030 with a Forecast up to 2035 (approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 3268-r dated 31 October 2022, as amended on 21 October 2024).
2. Actual Problems of Computer Modelling of Structures and Constructions / edited by **V.N. Sidorov, A.G.N. Safyanov**. Article in conference proceedings. - 2025. - 328 pp.
3. **Bagautdinova, A.R., Gavrilova, T.E.** Innovative Technologies in the Construction Sector and Their Commercialisation. In: Corporate Governance and Innovation in the Context of Transformational Processes. Collection of scientific articles from the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference "Innovations in the Management of Socio-Economic Systems" (RCIMSS-2023) / A.R. Bagautdinova, T.E. Gavrilova. - Moscow: Plekhanov Russian University of Economics. - 2023. - pp. 49–54.
4. **Voskovykh, K.A.** Analysis of Modern Trends in Construction: New Materials, Technologies and Innovations / K.A. Voskovykh // Colloquium-Journal. - 2023. - № 22. - pp. 31–33.
5. **Vlasova, E.L., Vlasova, M.L., Borovikova, N.V., Karelin, D.V.** Artificial Intelligence in Architectural and Urban Planning / E.L. Vlasova, M.L. Vlasova, N.V. Borovikova, D.V. Karelin // Architecture and Modern Information Technologies. - 2023. - No. 4(65). - pp. 311–324.
6. **Ilyinova, V.V., Mitsevich, V.D.** International Experience in the Use of BIM Technologies in Construction / V.V. Ilyinova, V.D. Mitsevich // Russian Foreign Economic Bulletin. - 2021. - №. 6. - pp. 79–93.
7. Information Modelling and Artificial Intelligence in Modern Construction and Housing and Communal Services / **V.L. Kurbatov, V.I. Rimshin, I.L. Shubin, S.V.** Volkova: textbook. - Moscow: ASV Publishing House. - 2023. - 420 pp.
8. **Kasyanov, N.V.** Architecture in the Context of Artificial Intelligence Development / N.V. Kasyanov // Modern Architecture of the World. - 2020. - № 10. - pp. 23–48.
9. **Radhakrishnan, Mohesh.** Is Midjourney-AI the New Anti-Hero of Architectural Imagery & Creativity? // Global Scientific Journals. - 2023. - № 11. - pp. 94–114.