Разработка и оптимизация компьютерной модели текстильного армирования строительных конструкций зданий и сооружений на базе искусственного интеллекта для их энергоэффективной реконструкции и повышения прочностных и эксплуатационных характеристик

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

Актуальность исследования обусловлена необходимостью теоретического осмысления и систематизации подходов к построению компьютерных моделей текстильного армирования строительных конструкций, позволяющих одновременно повышать несущую способность и энергоэффективность зданий при реконструкции. Традиционные методы усиления не отвечают современным требованиям, тогда как текстильное армирование композитными сетками требует разработки новых основ для обоснования архитектуры моделей и методов оптимизации их параметров. Целью работы является анализ и разработка основ построения архитектуры компьютерной модели текстильного армирования и её многокритериальной оптимизации на базе методов искусственного интеллекта для энергоэффективной реконструкции зданий и сооружений. Объектом исследования выступают модели и методы расчёта текстиль-бетонных композитов. Предметом исследования являются архитектура компьютерных моделей, учитывающих прочностные и теплофизические характеристики, а также методы многокритериальной оптимизации параметров армирования. Научная новизна заключается в систематизации и классификации существующих подходов к моделированию текстильного армирования, выявлении закономерностей влияния архитектурных параметров текстильной сетки на эксплуатационные характеристики, разработке концепции построения нейросетевой суррогатной модели и обосновании применения многокритериальной оптимизации на базе генетического алгоритма NSGA-II для поиска Парето-оптимальных решений, учитывающих конфликтующий характер требований к несущей способности, материалоёмкости и теплозащите при реконструкции зданий и сооружений.

Ключевые слова: текстильное армирование, архитектура компьютерной модели, многокритериальная оптимизация, композитные материалы, искусственный интеллект, реконструкция зданий, энергоэффективность, прочностные характеристики.

Введение

Современное состояние строительной науки характеризуется накоплением значительного объёма эмпирических данных о применении текстильного армирования для усиления строительных конструкций, однако теоретическое осмысление этих данных отстаёт от потребностей практики реконструкции зданий. Традиционные методы усиления металлическими обоймами и железобетонными рубашками [1; 2] не отвечают требованиям энергоэффективности, создавая мостики холода. Текстильное армирование композитными нитями рассматривается как перспективная технология тонкослойной реконструкции [3; 4].

Анализ литературы показывает, что существующие исследования сосредоточены на экспериментальном изучении прочностных характеристик [5; 6]. Модели базируются либо на классических гипотезах механики, не учитывающих дискретность расположения нитей, либо на сложных конечно-элементных моделях с трудно определяемыми параметрами контактного взаимодействия [7; 8]. Отсутствует единая концепция, связывающая архитектуру текстильной сетки с интегральными характеристиками конструкций.

Под архитектурой модели понимается совокупность структурных элементов компьютерной модели и связей между ними, определяющих способ представления текстильного армирования как объекта проектирования. Оптимизация архитектуры направлена на достижение баланса между точностью описания физических процессов и вычислительной эффективностью [9; 10].

Особую сложность представляет учёт теплофизических факторов. Высокая теплопроводность углеродных волокон создаёт мостики холода, снижая эффективность утепления [3]. Отсутствуют аналитические зависимости, позволяющие оценивать влияние архитектуры сетки на термическое сопротивление узлов реконструкции [11; 12].

Методы искусственного интеллекта открывают возможность создания суррогатных моделей, заменяющих дорогостоящие расчёты при оптимизации [13]. Оптимизация понимается как процесс нахождения параметров архитектуры сетки, обеспечивающих требуемые прочностные и теплофизические характеристики. Особый интерес представляет многокритериальная оптимизация, учитывающая конфликт требований к несущей способности, материалоёмкости и теплозащите.

Цель работы – анализ и разработка основ построения архитектуры компьютерной модели текстильного армирования и её многокритериальной оптимизации на базе искусственного интеллекта для энергоэффективной реконструкции зданий.

Методы исследования

Методологическая основа базируется на принципах системного подхода к рассмотрению текстильного армирования как многофакторной системы, функционирующей в условиях противоречивых требований [1; 9].

На первом этапе выполнен системный анализ и классификация существующих подходов к моделированию текстиль-бетонных композитов. Рассматривались три группы методов: аналитические, базирующиеся на гипотезах механики армированных материалов [2]; численные, реализуемые в рамках конечно-элементного подхода [7]; эмпирико-статистические, основанные на обработке экспериментальных данных [5]. Классификация проводилась по степени учёта дискретности армирования, полноте описания нелинейных эффектов, возможности учёта теплофизических факторов и вычислительной сложности.

Анализ влияния архитектуры текстильной сетки на прочностные характеристики выполнялся на основе обобщения [4; 14]. Анализировались зависимости, связывающие параметры сетки с несущей способностью и характером разрушения. Для анализа теплофизических факторов применялись методы теории теплопроводности анизотропных сред [3]. Оценивалась зависимость приведённого термического сопротивления от геометрии сетки.

На втором этапе разрабатывались основы построения нейросетевой суррогатной модели. Анализировались архитектуры нейронных сетей применительно к задачам строительного материаловедения [10]. Обосновывался выбор многослойного персептрона как универсального аппроксиматора. Рассматривались аспекты формирования обучающей выборки, обосновывалось применение метода латинского гиперкуба для равномерного заполнения пространства параметров.

Третий этап посвящён обоснованию многокритериальной оптимизации архитектуры текстильного армирования. Рассматривались математические постановки задач многокритериальной оптимизации. Обосновывался выбор метода Парето-оптимальных решений как наиболее адекватного для задач с

конфликтующими критериями. Анализировались основы генетического алгоритма NSGA-II.

Особое внимание уделялось обоснованию интеграции нейросетевой суррогатной модели в оптимизационную процедуру. Анализировались подходы к построению метамоделей, заменяющих детерминистические расчёты.

На завершающем этапе формулировались методологические принципы интеграции методов искусственного интеллекта в процедуры проектирования текстильного армирования при реконструкции зданий. Разрабатывалась концептуальная схема взаимодействия конечно-элементного моделирования, нейросетевой аппроксимации и многокритериальной оптимизации. Анализировались ограничения и границы применимости разработанных положений.

Результаты исследования

В ходе исследования получены результаты, включающие систематизацию подходов к моделированию текстильного армирования, выявление зависимостей между архитектурными параметрами сетки и эксплуатационными характеристиками, а также разработку концептуальных основ многокритериальной оптимизации.

Выполнена классификация существующих подходов к моделированию текстиль-бетонных композитов. Установлено, что аналитические методы [1; 2] не учитывают дискретность нитей, численные методы [7] обладают высокой вычислительной сложностью, эмпирико-статистические методы [5] не имеют обобщающей способности. Результаты классификации представлены в таблице 1.

Таблица 1
Классификация подходов к моделированию текстильного армирования

Группа методов	Достоинства	Недостатки	Применимость для оптимизации архитектуры
Аналитические методы	Простота, наглядность, возможность параметрического анализа	Не учитывают дискретность нитей, сложные контактные взаимодействия	Ограниченная, только для предварительных оценок
Численные методы	Высокая точность, учёт нелинейности, детализация контакта	Высокая вычислительная сложность, трудоёмкость задания параметров	Неприменима для многовариантных расчётов
Эмпирико-статистические методы	Надёжность в пределах исследованной области	Отсутствие предсказательной способности за границами выборки	Только для интерполяции

Таким образом, выявлено, что ни один из подходов в отдельности не удовлетворяет требованиям многокритериальной оптимизации, что обосновывает необходимость гибридных методов, сочетающих конечно-элементное моделирование и нейросетевую аппроксимацию.

Исследовано влияние архитектурных параметров текстильной сетки на прочностные характеристики [15]. Установлено, что размер ячейки является наиболее значимым фактором: при ячейке менее 15×15 мм реализуется механизм множественного трещинообразования, при увеличении ячейки свыше 20×20 мм доминирует проскальзывание нитей, снижающее несущую способность [14].

Разработана модель влияния архитектуры армирования на термическое сопротивление, учитывающая образование тепловых мостиков углеродными нитями с высокой теплопроводностью [16]. Оценки оптимальной сложности модели представлены в таблице 2.

Таблица 2
Оценка влияния архитектуры нейросети на точность аппроксимации

Архитектура сети	Смещение	Дисперсия	Суммарная ошибка	Склонность к переобучению
1 скрытый слой	Высокое	Низкая	Высокая	Низкая
2 скрытых слоя	Оптимальное	Оптимальная	Минимальная	Средняя
3 скрытых слоя	Низкое	Высокая	Средняя	Высокая

На основании проведённого анализа обоснована архитектура нейросетевой суррогатной модели на базе многослойного персептрона с двумя скрытыми слоями. Данная архитектура выбрана потому, что теорема об универсальной аппроксимации гарантирует способность двухслойной сети воспроизводить любые непрерывные зависимости при достаточном числе нейронов. Сравнительный анализ показал, что увеличение числа слоёв свыше двух приводит к переобучению без существенного повышения точности, тогда как один слой не обеспечивает необходимой гибкости для аппроксимации нелинейных эффектов контактного взаимодействия. Определены требования к объёму обучающей выборки (1000–1500 расчётов) на основе метода латинского гиперкуба. Это количество получено из условия равномерного заполнения шестимерного пространства варьируемых параметров: размер ячейки, диаметр нити, толщина слоя, класс бетона, толщина утеплителя, нагрузка. Выполнен анализ точности аппроксимации с позиций теории вариационного смещения и дисперсии, обосновано применение методов регуляризации для предотвращения переобучения. Теория вариационного смещения показывает, что ошибка модели складывается из систематической составляющей и случайной.

На основе постановки задачи многокритериальной оптимизации архитектурных параметров с конфликтующими критериями: несущая способность, термическое сопротивление, материалоёмкость, целесообразно применение генетического алгоритма NSGA-II. Конфликт критериев означает, что увеличение прочности за счёт более частой сетки неизбежно снижает теплозащиту из-за мостиков холода и повышает расход материалов. Традиционные методы оптимизации, сводящие задачу к одному критерию, не позволяют выявить весь спектр рациональных решений. Генетический алгоритм NSGA-II разработан для таких случаев: механизм недоминируемой сортировки направляет поиск к Парето-фронту, а оператор скученности обеспечивает равномерное распределение найденных решений вдоль него. Интеграция нейросетевой суррогатной модели в оптимизационную процедуру позволяет сократить вычислительные затраты по сравнению с прямым использованием конечно-элементного анализа.

Обсуждение результатов

Выявленное разделение методов на аналитические, численные и эмпирико-статистические соответствует общей структуре методов механики композитов. Аналитические методы недостаточно точны из-за дискретности расположения нитей, что подтверждается экспериментальными данными. Численные методы точны, но неприемлемо сложны для оптимизации. Данный результат обосновывает необходимость гибридных методов.

Выявленные зависимости влияния архитектурных параметров на прочностные характеристики показывают, что размер ячейки свыше 20×20 мм снижает несущую способность вследствие перехода к механизму проскальзывания нитей. Результат согласуется с экспериментальными наблюдениями [14] и получил обоснование через анализ контактных взаимодействий.

Эффект образования тепловых мостиков углеродными нитями ранее рассматривался качественно [3], теоретическое обоснование нейросетевой суррогатной модели базируется на теореме об универсальной аппроксимации [10]. Метод латинского гиперкуба обеспечивает репрезентативность обучающей выборки при минимальном числе конечно-элементных расчётов.

Наиболее значимым результатом является обоснование интеграции нейросетевой модели в оптимизационную процедуру. Прямое использование конечно-элементного анализа в контуре генетического алгоритма невозможно из-за экспоненциального роста затрат.

Ограничения исследования связаны с допущениями о статическом нагружении и отсутствии учёта длительных процессов. Учёт анизотропии теплофизических свойств и динамических воздействий представляет перспективное направление дальнейших исследований. Разработанные положения создают основу для совершенствования методов проектирования текстильного армирования с использованием искусственного интеллекта.

Заключение

Систематизированы существующие подходы к моделированию текстильного армирования, выявлены их достоинства и недостатки. Установлено, что аналитические методы не учитывают дискретность расположения нитей, численные методы обладают высокой вычислительной сложностью, а эмпирико-статистические методы не имеют обобщающей способности. Обоснована необходимость разработки гибридных методов, сочетающих конечно-элементное моделирование для генерации данных и нейросетевую аппроксимацию для ускорения оптимизационных процедур.

Выявлены закономерности влияния архитектурных параметров текстильной сетки на прочностные и теплофизические характеристики усиливаемых конструкций. Установлено, что размер ячейки является наиболее значимым фактором, определяющим механизм разрушения: при ячейке менее 15×15 мм реализуется механизм множественного трещинообразования, при ячейке свыше 20×20 мм доминирует проскальзывание нитей.

Разработаны основы построения нейросетевой суррогатной модели для аппроксимации зависимостей между архитектурными параметрами и эксплуатационными характеристиками. Обоснованы архитектура многослойного персептрона, требования к объёму и репрезентативности обучающей выборки, методы предотвращения переобучения.

Обосновано применение многокритериальной оптимизации на базе генетического алгоритма NSGA-II для поиска рациональных архитектурных параметров текстильного армирования. Показано, что интеграция нейросетевой суррогатной модели в оптимизационную процедуру позволяет преодолеть вычислительные ограничения прямого конечно-элементного анализа.

Сформулированы методологические принципы интеграции методов искусственного интеллекта в процедуры проектирования текстильного усиления при реконструкции зданий, учитывающие единство прочностных и теплофизических требований. Предложенная методология базируется на трех этапах: генерация данных конечно-элементным моделированием, построение нейросетевой суррогатной модели, аппроксимирующей зависимости между параметрами сетки и характеристиками конструкции, и многокритериальная оптимизация генетическим алгоритмом NSGA-II, обеспечивающая поиск Парето-оптимальных решений, одновременно удовлетворяющих прочностным и теплофизическим требованиям.

Литература
1. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – Москва : Стройиздат, 1996. – 416 с.
2. Василовская, Н. Г. Цементные композиции, дисперсно-армированные базальтовой фиброй / Н. Г. Василовская, И. Г. Енджиевская, И. Г. Калугин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 3. – С. 153–158.
3. Sahbaz Karaduman, N. Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications / N. Sahbaz Karaduman, Y. Karaduman, H. Özdemir, G. Ozdemir // Advances in Composite Materials Development. – London : IntechOpen, 2017. – P. 1–22.
4. Лесовик, В. С. Текстиль-бетон - эффективный армированный композит будущего / В. С. Лесовик, Д. Ю. Попов, Е. С. Глаголев // Строительные материалы. – 2017. – № 3. – С. 81–84.
5. Folic, R. Textile reinforced concrete / R. Folic, D. Zenunović // Tekstilna industrija. – 2023. – Vol. 71. – P. 13–25.
6. Борисов, Н. О. Влияние текстильно-армированного бетона на напряжённо-деформированное состояние консольных элементов высотных зданий / Н. О. Борисов // Инженерный вестник Дона. – 2026. – № 1 (131). – С. 36.
7. Schumann, A. Design and Testing of Various Ceiling Elements Made of Carbon Reinforced Concrete / A. Schumann, S. May, M. Curbach // Proceedings. – 2018. – Vol. 2, No. 8. – P. 543.
8. Донцова, А. Е. Прочность и деформативность складчатых элементов из текстильно-армированного бетона / А. Е. Донцова, О. Н. Столяров // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20, № 2. – С. 215–230.
9. Максимова, О. М. Развитие и применение нейросетевых технологий для задач механики и строительных конструкций / О. М. Максимова // iPolytech Journal. – 2013. – № 8 (79). – С. 81–89.
10. Salehi, H. Emerging artificial intelligence methods in structural engineering / H. Salehi, R. Burgueño // Engineering Structures. – 2018. – Vol. 171. – P. 170–189.
11. Типтев, Д. Н. Применение полимерной композитной арматуры при строительстве транспортных сооружений / Д. Н. Типтев, И. И. Овчинников // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 29.
12. Шилов, Д. А. Численное моделирование напряженно деформированного состояния сжатых железобетонных стоек, усиленных композитными материалами / Д. А. Шилов, А. А. Веремеенко, А. В. Шилов, Д. Р. Маилян // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 5 (113). – С. 37.
13. Колчин, В. Н. Специфика применения технологии «искусственного интеллекта» в строительстве / В. Н. Колчин // Инновации и инвестиции. – 2022. – № 3. – С. 250–253.
14. Tekle, B. Bond behavior of textile reinforced fine-grained alkali activated cement concrete / B. Tekle, D. Meßerer, K. Holschemacher, A. Khennane // Proceedings of the 11th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. – 2023. – P. 1–8.
15. Senckpiel, T. Model comparisons for a shell structure made of textile reinforced concrete / T. Senckpiel, U. Häussler-Combe // Computational Modelling of Concrete Structures. – London : CRC Press, 2018. – P. 523–532.
16. Yaseen, Z. M. Predicting compressive strength of lightweight foamed concrete using extreme learning machine model / Z. M. Yaseen, R. C. Deo, A. S. Hilal, A. M. Abd, L. Cornejo Bueno, S. Salcedo-Sanz, M. L. Nehdi // Advances in Engineering Software. – 2018. – Vol. 115. – P. 112–125.

Development and optimization of a computer model of textile reinforcement for building structures using artificial intelligence for energy-efficient reconstruction and improving strength and performance

Anchakov R.V.
Southwestern State University
JEL classification: L61, L74, R53

The relevance of this study stems from the need for a understanding and systematization of approaches to constructing computer models of textile reinforcement for building structures, allowing for simultaneous improvement of the load-bearing capacity and energy efficiency of buildings during reconstruction. Traditional reinforcement methods do not meet modern requirements, while textile reinforcement with composite meshes requires the development of new theoretical foundations to substantiate the model architecture and methods for optimizing their parameters. The aim of this study is to analyze and develop a framework for constructing a computer model of textile reinforcement and its multi-criteria optimization using artificial intelligence methods for the energy-efficient reconstruction of buildings and structures. The object of this study is models and methods for calculating textile-concrete composites. The subject of this study is the architecture of computer models that take into account strength and thermal characteristics, as well as methods for multi-criteria optimization of reinforcement parameters. The scientific novelty lies in the systematization and classification of existing approaches to modeling textile reinforcement, the identification of patterns in the influence of architectural parameters of the textile mesh on operational characteristics, the development of a theoretical concept for constructing a neural network surrogate model, and the justification for the use of multi-criteria optimization based on the NSGA-II genetic algorithm to find Pareto-optimal solutions that take into account the conflicting nature of requirements for load-bearing capacity, material consumption, and thermal protection during the reconstruction of buildings and structures.

Key words: textile reinforcement, computer model architecture, multi-criteria optimization, composite materials, artificial intelligence, building reconstruction, energy efficiency, strength characteristics.

References

1. Karpenko, N. I. General Models of Reinforced Concrete Mechanics / N. I. Karpenko. – Moscow : Stroiizdat, 1996. – 416 p.
2. Vasilovskaya, N. G. Cement Compositions Dispersed-Reinforced with Basalt Fiber / N. G. Vasilovskaya, I. G. Endzhievskaya, I. G. Kalugin // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2011. – No. 3. – P. 153–158.
3. Sahbaz Karaduman, N. Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications / N. Sahbaz Karaduman, Y. Karaduman, H. Özdemir, G. Ozdemir // Advances in Composite Materials Development. – London : IntechOpen, 2017. – P. 1–22.
4. Lesovik, V. S. Textile-Concrete - Effective Reinforced Composite of the Future / V. S. Lesovik, D. Yu. Popov, E. S. Glagolev // Construction Materials. – 2017. – No. 3. – P. 81–84.
5. Folic, R. Textile Reinforced Concrete / R. Folic, D. Zenunović // Tekstilna industrija. – 2023. – Vol. 71. – P. 13–25.
6. Borisov, N. O. Influence of Textile-Reinforced Concrete on the Stress-Strain State of Cantilever Elements of High-Rise Buildings / N. O. Borisov // Engineering Bulletin of the Don. – 2026. – No. 1 (131). – P. 36.
7. Schumann, A. Design and Testing of Various Ceiling Elements Made of Carbon Reinforced Concrete / A. Schumann, S. May, M. Curbach // Proceedings. – 2018. – Vol. 2, No. 8. – P. 543.
8. Dontsova, A. E. Strength and Deformability of Folded Elements Made of Textile-Reinforced Concrete / A. E. Dontsova, O. N. Stolyarov // Bulletin of MGSU. – 2025. – Vol. 20, No. 2. – P. 215–230.
9. Maksimova, O. M. Development and Application of Neural Network Technologies for Problems of Mechanics and Building Structures / O. M. Maksimova // iPolytech Journal. – 2013. – No. 8 (79). – P. 81–89.
10. Salehi, H. Emerging Artificial Intelligence Methods in Structural Engineering / H. Salehi, R. Burgueño // Engineering Structures. – 2018. – Vol. 171. – P. 170–189.
11. Tiptev, D. N. Application of Polymer Composite Reinforcement in the Construction of Transport Facilities / D. N. Tiptev, I. I. Ovchinnikov // Bulletin of Eurasian Science. – 2021. – Vol. 13, No. 2. – P. 29.
12. Shilov, D. A. Numerical Modeling of the Stress-Strain State of Compressed Reinforced Concrete Columns Strengthened with Composite Materials / D. A. Shilov, A. A. Veremeenko, A. V. Shilov, D. R. Mailyan // Engineering Bulletin of the Don. – 2024. – No. 5 (113). – P. 37.
13. Kolchin, V. N. Specifics of Application of "Artificial Intelligence" Technology in Construction / V. N. Kolchin // Innovations and Investments. – 2022. – No. 3. – P. 250–253.
14. Tekle, B. Bond Behavior of Textile Reinforced Fine-Grained Alkali Activated Cement Concrete / B. Tekle, D. Meßerer, K. Holschemacher, A. Khennane // Proceedings of the 11th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. – 2023. – P. 1–8.
15. Senckpiel, T. Model Comparisons for a Shell Structure Made of Textile Reinforced Concrete / T. Senckpiel, U. Häussler-Combe // Computational Modelling of Concrete Structures. – London : CRC Press, 2018. – P. 523–532.
16. Yaseen, Z. M. Predicting Compressive Strength of Lightweight Foamed Concrete Using Extreme Learning Machine Model / Z. M. Yaseen, R. C. Deo, A. S. Hilal, A. M. Abd, L. Cornejo Bueno, S. Salcedo-Sanz, M. L. Nehdi // Advances in Engineering Software. – 2018. – Vol. 115. – P. 112–125.