УДК 624.042.8

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ СЕЧЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Баев Максим Викторович,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,

г. Пенза,

директор Центра обеспечения информатизации.

Евсеев Александр Евгеньевич,

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,

г. Пенза,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Геотехника и дорожное строительство».

Евсеев Илья Александрович,

ООО «СФ ТЦС»,

г.Москва,

инженер-конструктор.

Аннотация

В статье представлен комплексный анализ современных методов оптимизации сечений строительных конструкций. Рассмотрены различные подходы к решению задачи оптимизации, включая стохастические методы, градиентные алгоритмы и смешанно-целочисленное программирование. Особое внимание уделено применению метаэвристик, машинного обучения и методов искусственного интеллекта. Исследованы особенности оптимизации для различных типов конструкций: стальных, железобетонных и холодногнутых профилей. Проанализированы современные тенденции в области экологической оптимизации и снижения углеродного следа.

Показаны перспективы интеграции методов оптимизации в BIM-среду и цифровые двойники зданий.

Ключевые слова: оптимизация сечений, строительные конструкции, метаэвристики, машинное обучение, железобетонные конструкции, холодногнутые профили, экологическая оптимизация, BIM-технологии, градиентные методы, смешанно-целочисленное программирование.

MODERN METHODS OF CROSS-SECTION OPTIMIZATION IN BUILDING STRUCTURES

Baev Maxim Viktorovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia, Director of the Center for Informatization Support.

Evseev Alexander Evgenievich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Geotechnics and Road Construction,

Evseev Ilya Alexandrovich,

LLC "SF TCS", Moscow, Russia, structural engineer.

Abstract

The article presents a comprehensive analysis of modern methods for cross-section optimization of building structures. Various approaches to solving the optimization problem are considered, including stochastic methods, gradient-based algorithms, and mixed-integer nonlinear programming. Particular attention is paid to the application of metaheuristics, machine learning, and artificial intelligence techniques. The specific features of optimization

are examined for different types of structures: steel, reinforced concrete, and cold-formed profiles. Current trends in eco-friendly optimization and carbon footprint reduction are analyzed. Prospects for integrating optimization methods into the BIM environment and digital twins of buildings are outlined.

Keywords: cross-section optimization, building structures, metaheuristics, machine learning, reinforced concrete structures, cold-formed profiles, eco-friendly optimization, BIM technologies, gradient-based methods, mixed-integer nonlinear programming

Подбор сечений балок, колонн, элементов ферм и рам при заранее заданной конструктивной схеме, особая задача строительной механики: она соединяет нормативную базу проектирования с математическим аппаратом исследования операций. В отличие от топологической оптимизации, где меняются связность и распределение материала по области, здесь варьируются параметры самих элементов. Целевой функцией чаще всего служат масса, объём, стоимость, выбросы CO_2 или embodied energy, а ограничения задают нормы проектирования (Еврокоды, ACI 318, российские своды правил), они охватывают прочность, общую и местную устойчивость, деформативность, конструктивные и технологические требования. Ключевая особенность задачи, смешанная природа переменных, так как непрерывные геометрические размеры соседствуют с дискретными выборками из сортамента проката, диаметров и количества арматурных стержней, классов материалов. По классификации Mei и Wang выделяют размерный уровень (size), оптимизацию формы (shape), топологию и их комбинированные постановки (layout) [19]; статистический разбор публикаций показывает, что среди целей преобладает минимизация стоимости (62% работ), затем улучшение характеристик (22%), многокритериальные постановки (14%) и экологические критерии (2%) [19].

Основным рабочим инструментом последних лет стали стохастические методы: генетические алгоритмы, рой частиц (PSO), гармонический поиск (HS), имитация

отжига (SA). Их сильными сторонами являются отсутствие требования дифференцируемости, естественная работа со смешанными дискретно-непрерывными переменными и способность приближаться к глобальному оптимуму. Недостатки же, большое число обращений к расчёту конструкции: от 85 до 95% машинного времени уходит на определение напряжённо-деформированного состояния, а универсально «наилучшего» алгоритма не существует [16]. Применения метаэвристик к строительным конструкциям, включая железобетонные сечения, систематизированы в обзоре Ghaemifard и Ghannadiasl по четырём семействам: роевым, эволюционным, физически вдохновлённым и «человекоориентированным» алгоритмам [11].

В русскоязычной литературе ту же нишу занимает эволюционная школа Серпика и Алексейцева [7]. Характерный пример, диссертация Мироненко [5], в ней рассматривалась оптимизация железобетонных балок и плоских рам, причём варьировались размеры сечений ригелей и стоек, число и диаметры продольных стержней, классы бетона и арматуры, все на дискретных множествах, отвечающих реальному проектированию. Критерием был минимум плановой производственной себестоимости, ограничения включали прочность, жёсткость, трещиностойкость, устойчивость и живучесть, а напряжённо-деформированное состояние описывалось многослойной конечно-элементной схемой с физической нелинейностью и учётом трещин. В смежных работах решались эволюционная оптимизация стальных ферм с учётом стоимости узловых соединений [1], оптимизация плоских стержневых систем с контролем общей устойчивости за небольшое количество итераций [6] и совместный синтез сечений и систем преднапряжения [2]. По методологии, дискретные сортаментные переменные, расширенные наборы нормативных ограничений, гибридные эволюционные стратегии со штрафными функциями и верификация нелинейным расчётом, эта школа совпадает с мировыми схемами «метаэвристика

плюс точный пересчёт», что говорит о сходимости национальных направлений при различии терминологии.

Развитие метода конечных элементов в 1990-2010-е годы заметно расширило арсенал. Для сложных узлов железобетонных конструкций оказались продуктивны модели «распорок и тяжей» (strut-and-tie), наглядно показывающие силовую схему и рациональные пути передачи нагрузки. Уточнённое моделирование физической и геометрической нелинейности, трещинообразования, ползучести и усадки позволило точнее оценивать варианты и убирать избыточные запасы, прежде закладывавшиеся по интуиции. Распространение получили многокритериальные постановки на основе фронта Парето и взвешенных сумм, а также вероятностные подходы на аппарате теории надёжности: у Дудиной и Камчаткиной оптимизация железобетонных конструкций заводского изготовления учитывает разброс прочности бетона, изменчивость нагрузок и возможные монтажные ошибки [4]. Отдельное направление, энергетическая оптимизация, нацеленная на снижение потерь энергии при знакопеременном нагружении и значимая для сейсмических районов; её основания заложены в работах Бондаренко [3].

Для текущего периода характерно возвращение градиентных методов в обновлённом виде. Направление «дифференцируемой дискретности» сводит выбор сечения из каталога к непрерывной задаче, сохраняя аналитические производные. В методе Discrete Material Optimization (DMO) Крога и соавторов дискретные переменные релаксируются на интервал [0,1], свойства сечений интерполируются весовыми функциями с SIMP/RAMP-штрафами, после чего продолжение по штрафу вытесняет решение к чистым дискретным вариантам [17]. Чангиши и Джалалпур связали площадь двутавровых сечений с моментом инерции и прочими характеристиками квантильной регрессией по каталогу AISC, а максимальные напряжения агрегировали дифференцируемой p-нормой [9]. Метод Gumbel–Softmax (Ebrahimi и соавторы, 2024) делает дифференцируемой саму категориальную

выборку, это открывает анализ чувствительности по сортаментным переменным и совместную оптимизацию категориальных и непрерывных величин [10]. Для крупных рам градиентные формулировки с релаксацией дискретности всё увереннее конкурируют с метаэвристиками, хотя требуют гладких аппроксимаций каталогов и нормативных проверок.

Смешанно-целочисленное нелинейное программирование (MINLP) описывает сортаментность и дискретное армирование без упрощений. В мариборской школе Краваньи разработана двухфазная схема Modified Outer-Approximation/Equality-Relaxation: сначала решается непрерывная релаксация, затем восстанавливается дискретность; на этой основе решались задачи оптимизации нераскреплённых стальных плоских рам по Еврокоду 3 и клеедеревянных двускатных балок переменного сечения по Еврокоду 5 [14]. Для круглых железобетонных колонн Jelušič и Žula (2023) получили показательный результат: при минимизации стоимости оптимум смещается к большей доле бетона и меньшей доле стали, при минимизации CO_2 наоборот, а резервы по осевой силе у стоимостных и углеродных оптимумов различаются [15]. Иначе говоря, смена целевой функции не просто переупорядочивает прежние решения, она меняет саму структуру оптимального проекта.

Для железобетонных сечений по-прежнему критичны дискретность армирования и трудоёмкость нелинейных проверок, трещиностойкости и прогибов. Критический обзор Afzal и соавторов фиксирует смещение акцентов в оптимизации железобетона с минимизации стоимости к экологическим целям, CO_2 и embodied energy: в рассмотренных примерах минимизация выбросов как целевая функция оказалась эффективнее стоимостного критерия по экологическому показателю (снижение выбросов на 4,5%), применение переработанной стали сокращало CO_2 примерно на 30%, а оптимальные решения чувствительны к соотношению цен и эмиссий CO_2 при производстве бетона и стали [8]. Для прямоугольных балок по нормам BS8110 генетические алгоритмы отличались от традиционного подбора

коэффициентами армирования на 12,6–46%, в зависимости от приложенного момента и схемы армирования.

Отдельную линию образуют машинное обучение и обучение с подкреплением. Jeong и Jo (2021) реализовали автоматизированное проектирование железобетонных балок по ACI 318 на связке DDPG и свёрточных нейронных сетей: агент обучается на 100 000 случайно сгенерированных сценариях без разметки данных и выдаёт почти оптимальные параметры геометрии и армирования без итераций с проектировщиком [13]. Сочетание искусственных нейронных сетей с обучением с подкреплением позволяет одновременно выбирать геометрию сечения, армирование и состав бетонной смеси, минимизируя углеродный след [12]. Для тонкостенных профилей двухступенчатые ML-модели (нейронные сети в связке с XGBoost) предсказывают несущую способность составных холодногнутых колонн с коэффициентом детерминации не ниже 0,966, а генетический алгоритм при фиксированном расходе материала даёт прирост несущей способности до 21% для замкнутых и до 91% для открытых сечений [22]. Машинное обучение снимает проблему «дорогого чёрного ящика» нормативных проверок, однако переносит главный риск в зону экстраполяции за пределами обучающего распределения и в вопрос гарантий выполнимости норм.

В тонкостенных и холодногнутых профилях переменной оптимизации становится само очертание сечения. В классической работе Leng, Guest и Schafer форма холодногнутой колонны «открывалась» методом имитации отжига при заданной ширине листовой заготовки и без каких-либо предпосылок о её очертании [18]. Алгоритм Wang и соавторов первым встроил технологические требования прямо в задачу, минимальная длина плоского участка 10 мм, не более двадцати плоских сегментов, выравнивание сегментов преобразованием Хафа, в связке с обработкой методом расширенных лагранжианов; достигнута сходимость к валидационному восьмиугольнику со средней ошибкой площади −0,4% [21]. Оптимизация очертания при постоянном расходе материала даёт прирост несущей способности примерно от

20% до двукратного, а современная типовая постановка объединяет технологические ограничения, методы прямого расчёта (эффективная ширина, Direct Strength Method) как «чёрный ящик» и ML-суррогаты [20, 22].

Перспективы связаны с интеграцией оптимизации в BIM-среду и цифровые двойники зданий на всём жизненном цикле: это позволит уйти от минимизации первоначальных затрат к оптимизации совокупной стоимости владения. Значимы также высокопрочные бетоны, композитная арматура и фибробетоны, технологии 3D-печати бетона и автоматизированного армирования. Нерешёнными вопросами остаются гарантии выполнимости норм при применении ML-методов, включение в постановки полного комплекса ограничений реализуемости (стыки, нахлёсты, унификация типоразмеров), масштабируемость на реальные конструкции и подтягивание русскоязычного сегмента к мировому уровню по экологическим критериям. Дальнейший прогресс определяется не столько совершенствованием отдельных алгоритмов, сколько согласованностью трёх составляющих: математической постановки, нормативного аппарата и технологической реализуемости проектных решений.

Между тем, авторы справедливо подчёркивают, что в проектировании железобетонных конструкций особенно остро стоит проблема баланса между точностью и трудоёмкостью. В отличие от стальных элементов, здесь нужно одновременно учитывать нелинейную работу бетона, развитие трещин, ползучесть, требования по ширине раскрытия трещин и прогибам, а это резко увеличивает число проверок и усложняет перебор вариантов. В результате существующие методы либо упрощают расчёт (рискуя недоучётом отдельных предельных состояний), либо становятся слишком ресурсоёмкими при детальном моделировании.

Поэтому перспективным направлением является разработка алгоритмов, которые на первом этапе быстро отсекают заведомо нерациональные сечения по простым, но надёжным критериям (например, минимальные проценты армирования,

предельные прогибы, базовые требования трещиностойкости). На втором этапе такие алгоритмы проводят точечные, но полные проверки ограниченного числа оставшихся вариантов в расчётной модели, гарантируя соответствие СП и ГОСТ. Такой двухуровневый подход позволяет существенно сократить объём вычислений, сохранив нормативную строгость. Практическим эффектом будет ускорение подбора сечений, более обоснованный выбор вариантов и достоверная оценка расхода бетона и арматуры уже на ранних стадиях, в том числе при формировании спецификаций.

Библиографический список:

1. Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учётом узловых соединений стержней // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 4 (40). DOI: 10.5862/MCE.40.3.

2. Алексейцев А.В., Ахременко С.А. Эволюционная оптимизация предварительно напряженных стальных рам // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 5 (81). DOI: 10.18720/MCE.81.4.

3. Бондаренко В.М. Посылки энергетической оптимизации железобетонных конструкций, воспринимающих знакопеременные нагрузки // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 4. С. 24–31.

4. Дудина И.В., Камчаткина В.М. Пути оптимизации железобетонных конструкций заводского изготовления на основе прикладных методов теории надёжности // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15, № 4. С. 688–701. DOI: 10.21285/2227-2917-2025-4-688-701.

5. Мироненко И.В. Оптимизация конструкций железобетонных балок и рам методом эволюционного моделирования: дис. … канд. техн. наук. Брянск, 2013.

6. Серпик И.Н., Алексейцев А.В., Балабин П.Ю., Курченко Н.С. Плоские стержневые системы: оптимизация с контролем общей устойчивости // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 7 (76). DOI: 10.18720/MCE.76.16.

7. Серпик И.Н., Мироненко И.В., Муймаров К.В., Швачко С.Н. Оптимизация железобетонных конструкций на основе эволюционного поиска: монография. Брянск: Изд-во БГИТУ, 2018. 200 с.

8. Afzal M., Liu K., Cheng J., Gan V.J.L. Reinforced concrete structural design optimization: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 260. Art. 120623. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120623.

9. Changizi N., Jalalpour M. Stress-based topology optimization of steel-frame structures using members with standard cross sections: Gradient-based approach // Journal of Structural Engineering. 2017. Vol. 143, No. 8. Art. 04017078. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001807.

10. Ebrahimi M., Cheong H., Jayaraman P.K., Javid F. Optimal design of frame structures with mixed categorical and continuous design variables using the Gumbel–Softmax method // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2024. Vol. 67. Art. 31. DOI: 10.1007/s00158-024-03745-7.

11. Ghaemifard S., Ghannadiasl A. Usages of metaheuristic algorithms in investigating civil infrastructure optimization models: a review // AI in Civil Engineering. 2024. Vol. 3, No. 1. Art. 17. DOI: 10.1007/s43503-024-00036-4.

12. Hosseinzadeh A., Dehestani M. Intelligent low carbon reinforced concrete beam design optimization via deep reinforcement learning // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-18543-4.

13. Jeong J.H., Jo H. Deep reinforcement learning for automated design of reinforced concrete structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2021. Vol. 36, No. 12. P. 1508–1529. DOI: 10.1111/mice.12773.

14. Jelušič P. Determining optimal designs of timber beams with non-uniform cross-section // WIT Transactions on the Built Environment. 2018. Vol. 175. P. 169–175. DOI: 10.2495/HPSM180171.

15. Jelušič P., Žula T. Sustainable design of circular reinforced concrete column sections via multi-objective optimization // Sustainability. 2023. Vol. 15, No. 15. Art. 11689. DOI: 10.3390/su151511689.

16. Kazemzadeh Azad S., Hasançebi O. Optimum design of skeletal structures using metaheuristics: A survey of the state-of-the-art // International Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. Vol. 6, No. 3. P. 1–11.

17. Krogh P.H., Jungersen S.H., Lund E., Lindgaard E. Gradient-based selection of cross sections: a novel approach for optimal frame structure design // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2017. DOI: 10.1007/s00158-017-1794-1.

18. Leng J., Guest J.K., Schafer B.W. Shape optimization of cold-formed steel columns // Thin-Walled Structures. 2011. Vol. 49, No. 12. P. 1492–1503. DOI: 10.1016/j.tws.2011.06.001.

19. Mei L., Wang Q. Structural optimization in civil engineering: A literature review // Buildings. 2021. Vol. 11, No. 2. Art. 66. DOI: 10.3390/buildings11020066.

20. Mojtabaei S.M., Becque J., Hajirasouliha I. Structural size optimization of single and built-up cold-formed steel beam-column members // Journal of Structural Engineering. 2021. Vol. 147, No. 4. Art. 04021030. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002987.

21. Wang B., Gilbert B.P., Molinier L., Guan H., Teh L.H. Shape optimisation of cold-formed steel columns with manufacturing constraints using the Hough transform // Proceedings of the International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. 2014.

22. Xiao L., Li Q., Li H., Ren Q. Loading capacity prediction and optimization of cold-formed steel built-up section columns based on machine learning methods // Thin-Walled Structures. 2022. Vol. 180. Art. 109826. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109826.