

DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-6-509-523

EDN: ECJWUG

Научная статья / Research article

Рациональные размеры прямоугольной трубобетонной колонны при внецентренном сжатии

А.С. Чепурненко[✉], С.Х. Аль-Згуль^{id}, Б.М. Языев^{id}

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ anton_chepurnenk@mail.ru

Поступила в редакцию: 20 июля 2025 г.

Доработана: 27 августа 2025 г.

Принята к публикации: 5 сентября 2025 г.

Аннотация. Разработан алгоритм формирования обучающего датасета, а также модель машинного обучения для подбора размеров поперечного сечения внецентренно сжатых трубобетонных колонн. Представлена прогнозная модель на основе алгоритма CatBoost для определения оптимальных геометрических параметров (ширины b и высоты h) поперечного сечения прямоугольных трубобетонных колонн с соблюдением нормативных требований по прочности. В качестве входных параметров использованы класс бетона по прочности на сжатие B согласно российским стандартам, величина продольной силы F , толщина стенки стального профиля t и эксцентриситет приложения нагрузки e . Обучение модели проводилось на синтетической выборке, сформированной с учетом условий предельного равновесия при комбинированном действии продольной силы и изгибающего момента, ограничений на габариты сечения в диапазоне от 100 до 500 мм, условия прочности, а также требования минимизации стоимости конструкции. Применение алгоритма CatBoost позволило достичь высокой точности прогнозирования с усредненным по двум целевым переменным метрикам: коэффициентом детерминации $R^2 = 0,999122$ и средней ошибкой определения размеров сечения 2,485 мм. Полученные результаты демонстрируют значительный потенциал использования разработанной модели в практической деятельности проектных организаций, обеспечивая точность расчетов при одновременной оптимизации материальных затрат и сокращении времени выполнения проектных решений.

Ключевые слова: внецентренное сжатие, трубобетонная колонна, несущая способность, предельное равновесие, оптимизация размеров поперечного сечения, машинное обучение, Catboost

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление о доступности данных. Обучающий датасет доступен для скачивания по ссылке: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10073.99683>

Вклад авторов: Чепурненко А.С. — программное обеспечение, подготовка текста статьи, рецензирование и редактирование; Аль-Згуль С.Х. — проведение исследования, программное обеспечение, обработка данных, графическое оформление, написание текста статьи; Языев Б.М. — общее научное руководство, формулировка концепции исследования. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.


Для цитирования: Чепурненко А.С., Аль-Згуль С.Х., Языев Б.М. Рациональные размеры прямоугольной трубобетонной колонны при внецентренном сжатии // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 6. С. 509–523. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-6-509-523> EDN: ECJWUG

Чепурненко Антон Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры строительной механики и теории сооружений, Донской государственный технический университет, Российская Федерация, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; eLIBRARY SPIN-код: 7149-7981, ORCID: 0000-0002-9133-8546; e-mail: anton_chepurnenk@mail.ru

Аль-Згуль Самир Хусейнович, аспирант кафедры строительной механики и теории сооружений, Донской государственный технический университет, Российская Федерация, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; eLIBRARY SPIN-код: 4483-8340, ORCID: 0000-0001-6182-786X; e-mail: samiralzgulfx@gmail.com

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор кафедры строительной механики и теории сооружений, Донской государственный технический университет, Российская Федерация, 344003, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; eLIBRARY SPIN-код: 5970-5350, ORCID: 0000-0002-5205-1446; e-mail: ps62@yandex.ru

© Чепурненко А.С., Аль-Згуль С.Х., Языев Б.М., 2025

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Rectangular Concrete-Filled Steel Tube Rational Dimensions under Uniaxial Eccentric Compression

Anton S. Chepurnenko [✉], Samir H. Al-Zgul , Batyr M. Yazyev 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ anton_chepurnenk@mail.ru

Received: July 20, 2025

Revised: August 27, 2025

Accepted: September 5, 2025

Abstract. An algorithm for generating the training dataset and the machine learning model for selecting the cross-sectional dimensions of eccentrically compressed concrete filled steel tubular (CFST) columns have been developed. The paper presents a predictive model based on the CatBoost algorithm for determining the optimal geometric parameters (width b and height h) of the cross-section of rectangular CFST columns in compliance with regulatory strength requirements. The input parameters used were the concrete compressive strength class B according to Russian standards, the magnitude of the longitudinal force F , the wall thickness of the steel section t and the eccentricity of load application e . The model was trained on a synthetic sample formed taking into account the conditions of limit equilibrium under the combined action of the axial force and bending moment, restrictions on the cross-sectional dimensions in the range from 100 to 500 mm, strength conditions, as well as the requirements for minimizing the cost of the structure. The application of the CatBoost algorithm allowed achieving high forecasting accuracy with an average of two target variable metrics: the determination coefficient $R^2 = 0.999122$ and the average error in determining the section dimensions of 2.485 mm. The obtained results demonstrate the significant potential for using the developed model in the practical activities of design organizations, ensuring the accuracy of calculations while simultaneously optimizing material costs and reducing the time for implementing design solutions.

Keywords: bearing capacity, limit equilibrium, cross-section optimization, machine learning, Catboost

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution: *Chepurnenko A.S.* — software, writing, review and editing; *Al-Zgul S.H.* — conducting research, software, data processing, graphic design, text writing; *Yazyev B.M.* — supervision, conceptualization. All of the authors read and approved the final version of the article.

Data Availability Statement. The training dataset is available for download at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10073.99683>

For citation: *Chepurnenko A.S., Al-Zgul S.H., Yazyev B.M.* Rectangular concrete-filled steel tube rational dimensions under uniaxial eccentric compression. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(6):509–523. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-6-509-523> EDN: ECJWUG

1. Введение

Авторами исследованы прямоугольные трубобетонные колонны (ТБК) при одноосном внецентренном сжатии. Широкое применение подобных конструкций в современном строительстве объясняется рядом ключевых преимуществ: синергетическим эффектом совместной работы стального профиля и бетонного заполнения [1], повышенной огнестойкостью [2], высокой энергоемкостью при динамических нагрузках и экономической эффективностью на всех этапах возведения и существования сооружения. Благодаря высокой пространственной жесткости и способности сопротивляться комбинированным нагрузкам эти конструкции широко применяются в строительстве в качестве несущих элементов как в России [3] так и за рубежом [4]. Однако их повсеместное внедрение сталкивается с серьезными трудностями, связанными с отсутствием надежных методов расчета, которые бы адекватно учитывали сложный характер взаимодействия стальной оболочки и бетонного заполнения при различных видах нагружения.

Фундамент современных исследований в области расчета ТБК составляют экспериментальные данные, получаемые в ходе натурных и лабораторных испытаний [5; 6]. Эти данные служат основой для разработки более точных аналитических методов, которые учитывают нелинейное поведение материалов [7]. Для детального анализа напряженно-деформированного состояния исследователи широко используют численное моделирование, такое как метод конечных элементов. Чтобы эффективно работать с растущими массивами информации, создаются специализированные базы данных для систематизации экспериментальных результатов [8–10]. С начала XXI в. активно развивается

применение искусственного интеллекта и машинного обучения. Эти технологии используются для прогнозирования несущей способности конструкций и оптимизации их параметров. В совокупности все эти направления дают возможность комплексно изучать поведение ТБК и разрабатывать усовершенствованные расчетные методики.

Развитие методов машинного обучения для проектирования трубобетонных колонн во многом обусловлено фундаментальными ограничениями как нормативных, так и численных методов расчета. С одной стороны, традиционные нормативные подходы (Еврокод 4¹, AISC 360-16², СП 266.1325800.2016³), несмотря на их широкое распространение в практике проектирования, обладают существенными недостатками — они применимы лишь для узкого диапазона характеристик материалов, не позволяют решать обратные проектные задачи, ограничены определенными типами сечений и не учитывают сложные случаи нагружения.

С другой стороны, численные методы, реализуемые в современных конечно-элементных комплексах (ABAQUS, ANSYS, SCAD, ЛИРА-САПР и др.), хотя и обеспечивают более точное моделирование нелинейного поведения конструкций [11], требуют значительных вычислительных ресурсов, трудоемкой калибровки моделей и обладают недостаточной эффективностью для практического использования в проектной работе [12; 13].

Эти ограничения традиционных подходов создали предпосылки для внедрения инновационных технологий анализа, в частности искусственных нейронных сетей и других методов искусственного интеллекта, способных адекватно учитывать сложные нелинейные взаимодействия в конструкции.

Впервые искусственная нейронная сеть для расчета несущей способности квадратных трубобетонных колонн при осевом сжатии была применена в исследовании Н. Gao [14], где трехслойная сеть прямого распространения, обученная на экспериментальных данных, показала высокую точность прогнозирования при валидации на независимой выборке. Данное исследование подтвердило принципиальную возможность использования нейросетевых моделей в качестве эффективного вспомогательного инструмента инженерных расчетов.

Последующие исследования [15–19] существенно расширили область применения искусственных нейронных сетей для анализа ТБК. В этих работах представлены усовершенствованные архитектуры нейросетей, обученные как на экспериментальных данных, так и на результатах численного моделирования.

Параллельно с развитием нейросетевых подходов значительный прогресс наблюдается в области алгоритмов градиентного бустинга, которые демонстрируют сопоставимую точность при большей вычислительной эффективности и интерпретируемости результатов.

В [20] проведено сравнительное исследование точности прогнозирования несущей способности ТБК с использованием пяти алгоритмов машинного обучения: AdaBoost, GBR, XGBoost, LightGBM и CatBoost. Для анализа использована база экспериментальных данных, включающая, в частности, 401 испытание прямоугольных внецентренно сжатых колонн, содержащая следующие параметры: геометрические характеристики (размеры сечения, толщина стенки, длина элемента), физико-механические свойства материалов, величины эксцентриситетов, предельные значения несущей способности. Статистический анализ подтвердил репрезентативность данных для широкого диапазона параметров. Данная база была ранее валидирована в работе Thai et al. [21] для оценки нормативных методов (AISC 360, Еврокод 4, AS/NZS 2327⁴), что свидетельствует о ее надежности.

Сравнительный анализ показал, что CatBoost обеспечивает наивысшую точность прогнозирования для внецентренно нагруженных прямоугольных колонн, тогда как LightGBM демонстрирует несколько меньшую точность, но превосходит по скорости обучения в 1,5–2 раза. Несмотря на то, что алгоритм LightGBM отличается высокой скоростью обучения при работе с большими объемами

¹ EN 1994-1-1 (2004) (English): Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1994.1.1.2004.pdf>

² ANSI/AISC 360-22. An American National Standard Specification for Structural Steel Buildings. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2022. 780 p. URL: <https://www.aisc.org/publications/steel-standards/aisc-360/>

³ СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования.

⁴ AS/NZS 2327:2017. Composite structures — Composite steel-concrete construction in buildings. URL: <https://www.standards.org.au/standards-catalogue/standard-details?designation=as-nzs-2327-2017> (accessed: 13.06.2025).

данных благодаря оптимизации процесса построения деревьев и поддерживает распределенные вычисления, в данной работе предпочтение было отдано CatBoost. Ключевым фактором выбора стала необходимость одновременного прогнозирования двух взаимосвязанных геометрических параметров — высоты и ширины сечения трубобетонных колонн. В отличие от LightGBM, CatBoost обладает встроенными механизмами для многомерной регрессии, что исключает необходимость создания сложных пользовательских функций потерь. Важным преимуществом CatBoost является его устойчивость к переобучению, обеспечиваемая комбинацией упорядоченного бустирования и автоматической L2-регуляризации, что особенно значимо при работе с синтетическими данными. Таким образом, несмотря на отсутствие категориальных признаков в анализируемых данных и потенциальные преимущества LightGBM в скорости обработки, выбор CatBoost оказался методически обоснованным, так как он наилучшим образом соответствует специфике решаемой задачи при том, что для рассматриваемого объема набора данных выигрыш в скорости обработки не является определяющим фактором, тогда как преимущества CatBoost в точности и устойчивости прогнозов приобретают первостепенное значение.

Также следует отметить, что, несмотря на значительное количество исследований, посвященных трубобетонным колоннам, большинство из них сосредоточено на поперечных расчетах по определению несущей способности [22; 23], тогда как вопросы определения требуемых размеров поперечного сечения остаются недостаточно изученными. Более того, если единичные работы и затрагивают проектные задачи, то они в основном ограничиваются случаями центрального сжатия колонн круглого сечения, тогда как вопросы оптимального проектирования ТБК прямоугольного сечения при внецентренном нагружении практически не рассматриваются, несмотря на значимость подобных расчетов.

В данной связи представляется особенно актуальной разработка новых подходов к решению указанных задач для прямоугольных сечений при внецентренном сжатии. Эта статья явилась продолжением исследований [24–28], направленных на получение наиболее удобного и достоверного инструментария для выполнения поперечных и проектных расчетов трубобетонных колонн.

Предложенная в статье модель может быть использована для автоматизированного проектирования трубобетонных колонн, сокращая время расчетов и повышая экономическую эффективность строительных решений. Результаты исследования представляют интерес для инженеров-проектировщиков, занимающихся разработкой и внедрением ТБК, а также для дальнейших научных исследований в области оптимизационного проектирования этих конструкций.

2. Методы

Рассматриваются короткие колонны, для которых деформации малы и не приводят к существенному изменению эксцентриситета продольной силы. В качестве входных параметров модели машинного обучения были приняты следующие величины:

- 1) класс бетона по прочности на сжатие B , МПа согласно Межгосударственному стандарту, действующему на территории РФ ГОСТ 18105-2018⁵;
- 2) величина сжимающей силы F , кН;
- 3) толщина стенки трубы t , мм;
- 4) эксцентриситет сжимающей силы e , мм.

Выходными параметрами модели выступают ширина поперечного сечения b , мм и высота поперечного сечения h , мм.

Для обучения модели были сгенерированы синтетические данные. Класс бетона варьировался от В15 до В80. Сжимающая нагрузка варьировалась от 500 до 10 000 кН с шагом 100 кН, толщина стенки менялась от 3 до 22 мм с шагом 1 мм, а эксцентриситет продольной силы менялся от 10 до 250 мм с шагом 10 мм. Выбор указанных диапазонов для класса бетона определялся возможностью приобретения бетонных смесей с заявленной прочностью у массовых производителей (сверхвысокопрочные бетоны и бетоны низкого класса не рассматривались). Выбранный диапазон изменения толщины

⁵ ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. Москва : Стандартинформ, 2019. 19 с.

стенки обусловлен действующими на территории Российской Федерации сортаментами прокатной стали. 10 мм для минимального значения эксцентриситета в обучающем наборе соответствуют минимальному значению случайного эксцентриситета по СП 63.13330.2018⁶. Верхняя граница эксцентриситета в 250 мм обосновывается тем, что при больших эксцентриситетах продольной силы, когда конструкция работает преимущественно на изгиб, а не на сжатие, использование трубобетонных конструкций становится нерациональным. Для каждого набора значений $[B, F, t, e]$ решалась задача определения оптимальных размеров b и h при минимальной стоимости конструкции с учетом ограничения на выполнение условия прочности.

Поскольку большинство выпускаемых на российском рынке прямоугольных профильных труб изготавливается из стали марки 09Г2С, предел текучести металла трубы R_y принимался постоянным. Для указанной марки стали он составляет в среднем 345 МПа.

Стоимость 1 погонного метра конструкции S определяется по формуле

$$S = S_b b h + S_s \rho_s 2(b + h)t \rightarrow \min, \quad (1)$$

где S_b — стоимость 1 м³ бетона; S_s — стоимость 1 т стали; $\rho_s = 7,85 \text{ т/м}^3$ — плотность стали.

Величина S_s принималась равной 86 800 рублей за тонну как среднее значение для профильных труб из стали марки 09Г2С по данным АО «Металлоторг»⁷ по состоянию на 27.03.2025 для города Ростова-на-Дону. Величина S_b зависит от класса бетона. В табл. 1 приведены значения S_b для рассматриваемых в настоящей работе классов бетона по данным компании «Астрагал»⁸. Также в данной таблице представлены значения расчетного сопротивления бетона в зависимости от его класса на основе российского свода правил СП 63.13330.2018⁹.

Таблица 1. Стоимость 1 м³ бетона в зависимости от его класса по прочности при сжатии, а также расчетные сопротивления при сжатии

Класс бетона В	Стоимость 1 м ³ бетона, S_b , руб.	Расчетное сопротивление при сжатии R_b , МПа
B15	5300	8,5
B20	5700	11,5
B25	6250	14,5
B30	6650	17
B35	6900	19,5
B40	7700	22
B45	8700	25
B50	9200	27,5
B55	10200	30
B60	10800	33
B70	12700	37
B80	13400	41

И с т о ч н и к: выполнено С.Х. Аль-Згуль.

Для решения проектной задачи подбора поперечного сечения необходимо записать условие прочности трубобетонного элемента при внецентренном сжатии. Рассмотрим далее условие прочности трубобетонного элемента при внецентренном сжатии, а именно случай действия изгибающего момента только в одной плоскости. Эффект прироста прочности за счет работы бетона в стеснен-

⁶ СП 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (accessed: 13.06.2025).

⁷ Металлоторг. URL: <https://www.metallotorg.ru/> (дата обращения: 27.03.2025).

⁸ Астрагал. URL: <https://www.astragal.su/> (дата обращения: 27.03.2025).

⁹ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции.

ных условиях не учитывается. Толщина стенки трубы считается малой по сравнению с размерами поперечного сечения b и h . Наружные размеры колонны считаются примерно равными размерам бетонного ядра.

Для определения предельной нагрузки при внецентренном сжатии используется метод предельного равновесия. Ранее этот метод для трубобетонных колонн был валидирован на экспериментальных данных в работе [29]. Напряжения в сжатой зоне бетонного ядра принимаются равными R_b . Напряжения в растянутой зоне бетонного ядра не учитываются. Напряжения в сжатой и растянутой зоне стальной трубы принимаются равными R_y с соответствующими знаками (рис. 1).

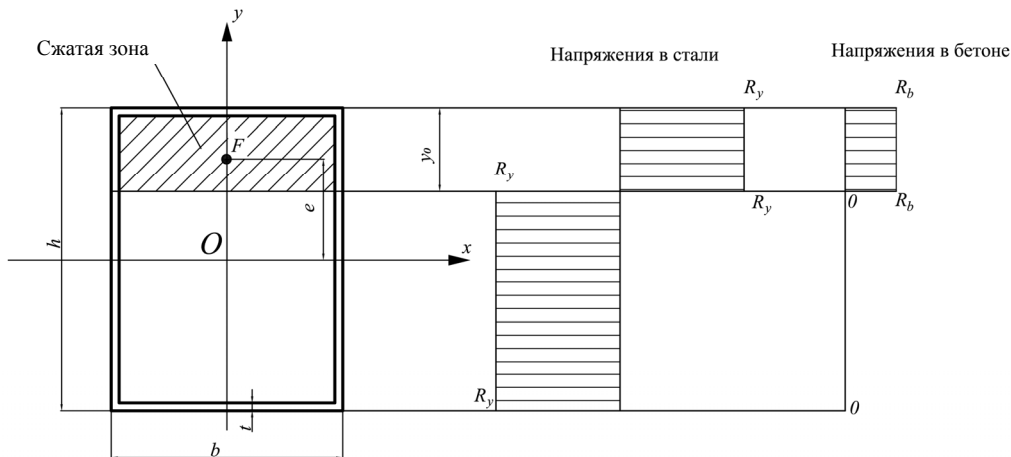


Рис. 1. Схема для определения предельной нагрузки

Источник: выполнено С.Х. Аль-Згуль.

Условие равновесия внутренних и внешних сил в проекции на продольную ось колонны имеет вид

$$F = R_b b y_0 + 2R_y t y_0 + R_y t b - R_y t b - 2R_y t (h - y_0). \quad (2)$$

Из (2) величина y_0 выражается в виде

$$y_0 = \frac{F + 2R_y t h}{R_b b + 4R_y t}. \quad (3)$$

Условие равновесия внутренних и внешних моментов относительно оси x в предельном состоянии записывается в виде

$$F e = R_b b y_0 \left(\frac{y_0}{2} - \left(y_0 - \frac{h}{2} \right) \right) + 2R_y t b \frac{h}{2} + 2R_y t y_0 \left(\frac{y_0}{2} - \left(y_0 - \frac{h}{2} \right) \right) + 2R_y t (h - y_0) \left(y_0 - \frac{h}{2} + \frac{h - y_0}{2} \right). \quad (4)$$

Или после упрощения:

$$F e = \frac{1}{2} R_b b y_0 (h - y_0) + R_y t (b h + 2 y_0 (h - y_0)). \quad (5)$$

Подставив (3) в (5), можно получить квадратное уравнение относительно F , из которого определяется предельная нагрузка F_{ult} как минимальный положительный корень этого уравнения, удовлетворяющий условию

$$y_0 = \frac{F_{ult} + 2R_y t h}{R_b b + 4R_y t} \leq h. \quad (6)$$

Если же ни один из положительных корней квадратного уравнения не удовлетворяет условию (6), это говорит о том, что сжатая зона охватывает все бетонное ядро и нейтральная линия проходит либо на границе бетонного ядра и нижней стороны трубы (рис. 2), либо непосредственно в нижней стороне трубы. Данные варианты возможны в случае малых эксцентриситетов продольной силы.

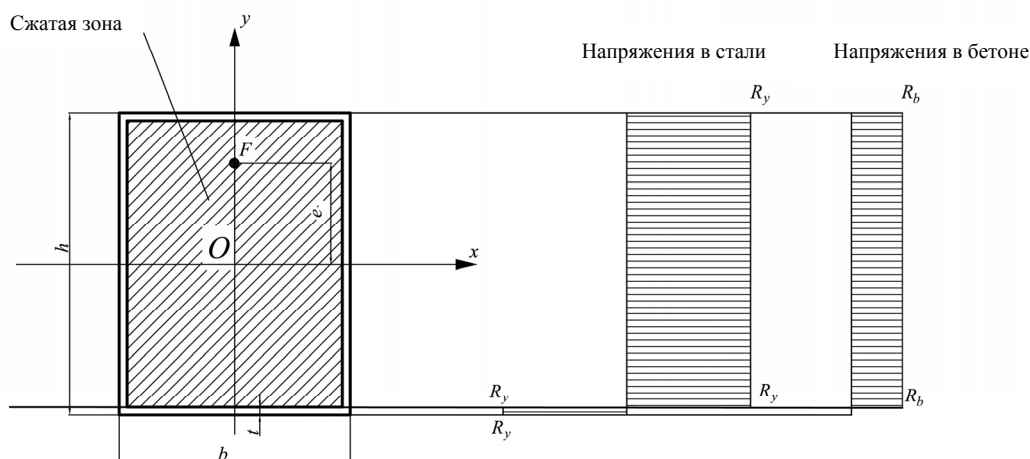


Рис. 2. Случай, когда сжатая зона охватывает все бетонное ядро
И с т о ч н и к: выполнено С.Х. Аль-Згуль.

Для варианта на рис. 2 предельная нагрузка определяется по формуле

$$F_{ult2} = R_b b h + 2R_y h t. \quad (7)$$

Если же нейтральная линия оказывается внутри нижней стороны трубы, то F_{ult} примет промежуточное значение между величиной F_{ult2} и величиной F_{ult0} , соответствующей случаю центрального сжатия:

$$F_{ult0} = R_b b h + 2R_y (h + b) t. \quad (8)$$

Если при вычислении y_0 получалось, что $y_0 > h$, то предельная нагрузка определялась по формуле (7), что шло в запас прочности.

Задача поиска величин b и h из условия минимума целевой функции S при ограничении $F \leq F_{ult}$ решалась нами как задача нелинейной оптимизации с использованием метода внутренней точки [30] в среде MATLAB R2024b (пакет Optimization Toolbox, функция fmincon). Помимо ограничения $F \leq F_{ult}$ вводились ограничения на минимальные и максимальные значения размеров b и h . Эти ограничения продиктованы возможностью укладки бетона внутрь трубы (ограничение на минимальные размеры) и актуальными сортаментами прямоугольных профильных труб (ограничение на максимальные размеры):

$$\begin{aligned} 100 \text{ mm} &\leq b \leq 500 \text{ mm}; \\ 100 \text{ mm} &\leq h \leq 500 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (9)$$

В обучающий датасет записывались только те наборы данных, для которых удавалось найти решение задачи оптимизации при указанных ограничениях. Общий объем обучающего датасета в итоге составил 504 841 строк. Фрагмент обучающего датасета приведен в табл. 2.

Таблица 2. Фрагмент обучающего датасета

No.	B , МПа	F , kN	t , mm	e , mm	b , mm	h , mm
1	15	500	3	10	100	171
2	15	500	3	20	100	171
3	15	500	3	30	100	171
4	15	500	3	40	100	178
5	15	500	3	50	100	191
6	15	500	3	60	100	204
7	15	500	3	70	100	217
8	15	500	3	80	100	229
9	15	500	3	90	100	240
10	15	500	3	100	100	252
...
504832	80	10000	22	160	259	500
504833	80	10000	22	170	272	500
504834	80	10000	22	180	285	500
504835	80	10000	22	190	299	500
504836	80	10000	22	200	312	500
504837	80	10000	22	210	326	500
504838	80	10000	22	220	341	500
504839	80	10000	22	230	355	500
504840	80	10000	22	240	369	500
504841	80	10000	22	250	384	500

Источники: выполнено С.Х. Аль-Згуль.

В настоящем исследовании разработана программа на языке Python с поддержкой версии 3.11+, реализующая алгоритм градиентного бустинга (Catboost) для прогнозирования двух физически взаимосвязанных геометрических характеристик (ширина и высота) сечений трубобетонных колонн на основе четырех исходных характеристик (расчетное сопротивление бетона на сжатие, величина сжимающей силы, толщина стенки трубы, эксцентриситет сжимающей силы). Ввиду того, что представленная модель имеет небольшое количество параметров, ее обучение и применение может быть выполнено на большинстве современных (на 2025 г.) потребительских GPU или даже в облачных средах с бесплатными квотами (например, Google Colab, Kaggle). При постановке задачи регрессии была использована метрика MultiRMSE (Composite RMSE) — обобщенный аналог стандартного RMSE для одновременной оптимизации функции потерь по двум целевым переменным — ширины (b) и высоты (h) сечения (10):

$$\text{MultiRMSE} = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left[(b_i - \hat{b}_i)^2 + (h_i - \hat{h}_i)^2 \right]}, \quad (10)$$

где N — количество наблюдений (колонн) в выборке; 2 — количество целевых переменных; b_i — истинная ширина сечения i -го сечения колонны, мм; h_i — истинная высота сечения i -го сечения колонны, мм; \hat{b}_i — предсказанная ширина сечения i -ого сечения колонны, мм; \hat{h}_i — предсказанная высота сечения i -го сечения колонны, мм.

В рамках исследования исходный набор данных был разделен на три независимые подвыборки. Первоначальное разделение осуществлялось в пропорции 80 на 20 %, где 20 % данных были выделены в качестве изолированной тестовой выборки для финальной оценки качества модели. Оставшиеся 80 % данных, составляющие обучающий пул, подвергались дальнейшему разделению: 25 % отводилось для валидационной выборки (что соответствует 20 % от общего объема данных), а оставшиеся 75 % (60 % от общего объема) формировали финальную тренировочную выборку.

В качестве контрольных метрик были выбраны: композитная метрика MultiRMSE на валидационном наборе данных для оценки общей предсказательной способности модели, а также индивидуальные метрики по каждой переменной: MAE для оценки средней точности модели (в понятных интерпретируемых единицах), RMSE — позволяет обнаружить влияние выбросов при выборе окончательной модели, а также коэффициент детерминации — R^2 демонстрирует преимущество текущей модели по сравнению с предсказанием по среднему.

Разбиение было выполнено с фиксацией параметра random seed при помощи функции `train_test_split` из библиотеки `scikit-learn`. Это делает процедуру полностью детерминированной и воспроизводимой.

Для верификации качества разбиения проводился статистический тест на однородность распределений (Kruskal — Wallis) для категориальных/непрерывных признаков) между выборками по ключевым признакам. Результаты теста ($p_value > 0,05$) не выявили статистически значимых различий, что подтверждает корректность случайного разбиения.

3. Результаты и обсуждение

График кривой обучения модели (рис. 3) демонстрирует практически идентичное поведение тренировочной и валидационной кривых. На начальном этапе (до ~500 итераций) наблюдается резкое снижение RMSE с ~1,2 до ~0,1, после чего процесс переходит в фазу плавной оптимизации с выходом на стабильное плато после ~2000 итераций.

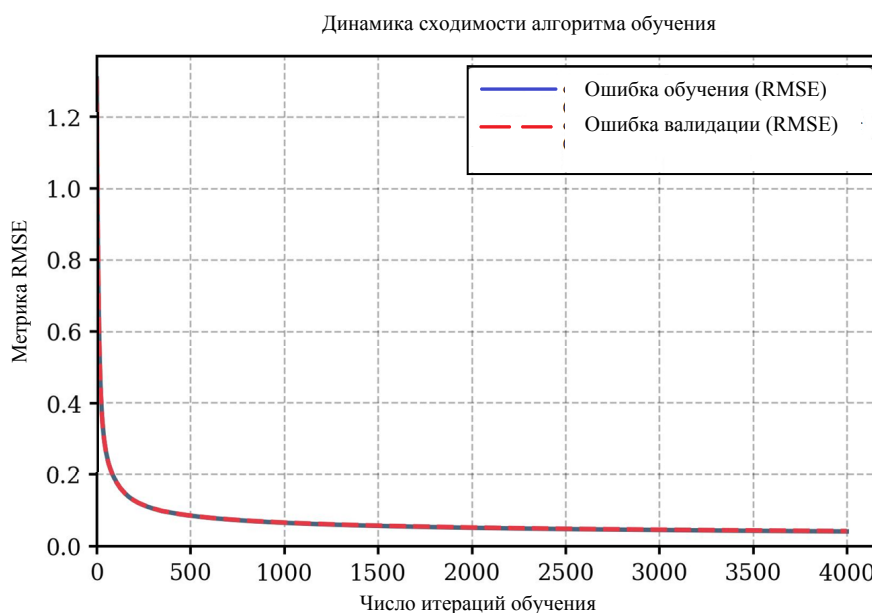


Рис. 3. График кривой обучения для тренировочной и валидационной выборок
Источник: выполнено С.Х. Аль-Згуль.

Анализ точности модели (рис. 4, 5) показал, что коэффициент детерминации достигает $R^2 = 0,999033$ для ширины сечения (b) и $R^2 = 0,999211$ для высоты сечения (h), что свидетельствует о практически идеальном соответствии предсказанных значений целевым величинам. Особого внимания заслуживает равномерное распределение ошибок по всему диапазону исследуемых размеров (100–500 мм). Данный факт, наряду с небольшой дисперсией, подтверждает высокую надежность алгоритма. При этом следует подчеркнуть, что разница в точности прогнозирования между параметрами не превышает 2 %, что указывает на сбалансированность предсказательной силы модели по двум целевым переменным. Поскольку применение алгоритма Catboost — это, по сути, решение задачи многомерной нелинейной интерполяции, пределы применения модели определяются диапазоном входных параметров в обучающем датасете.

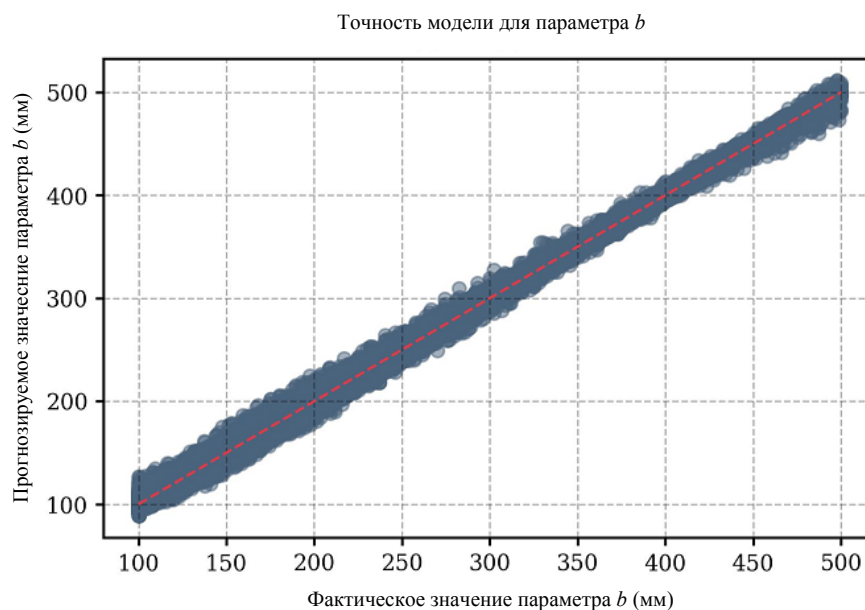


Рис. 4. Точность прогнозирования ширины сечения (b)

И с т о ч н и к: выполнено А.С. Чепурненко, С.Х. Аль-Згуль.

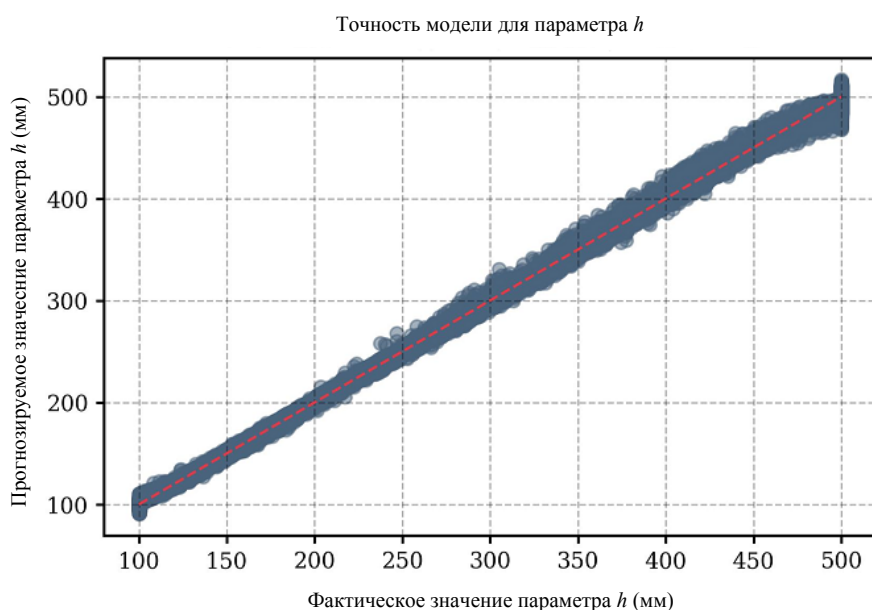


Рис. 5. Точность прогнозирования высоты сечения (h)

И с т о ч н и к: выполнено А.С. Чепурненко, С.Х. Аль-Згуль.

Для оценки вклада отдельных признаков в итоговый результат было принято решение использовать SHAP-анализ. Данный метод, основанный на принципах теории игр, позволяет точно определить независимый вклад каждого признака, в отличие от стандартных показателей важности признаков (feature importances), которые могут давать искаженные результаты из-за возможного неравномерного распределения Gain при разбиении изначально сбалансированных подвыборок.

Для вычисления SHAP-значений необходимо на вход подать обученную модель и тестовый датасет. SHAP-значения были вычислены для всей тестовой выборки. Применен TreeExplainer, который использует алгоритм TreeSHAP для эффективного точного расчета. В качестве фонового распределения, необходимого для определения базового математического ожидания модели $E[f(x)]$, исполь-

зовались 100 случайно отобранных объектов из обучающей выборки (100 объектов — это оптимальный компромисс между точностью и вычислительной эффективностью). Важность признаков оценивалась как среднее абсолютное значение SHAP (mean |SHAP|) по всем объектам тестовой выборки.

Результаты анализа важности признаков с использованием SHAP-значений демонстрируют четкую физически обоснованную иерархию влияния входных параметров (или лучше признаков) на геометрические характеристики сечения (рис. 6, 7). При этом графики зависимости SHAP демонстрируют характер влияния отдельных переменных на целевую величину (рис. 8, 9).



Рис. 6. Анализ важности признаков для прогнозирования ширины сечения (b)

И с т о ч н и к: выполнено А.С. Чепурненко, С.Х. Аль-Згуль.

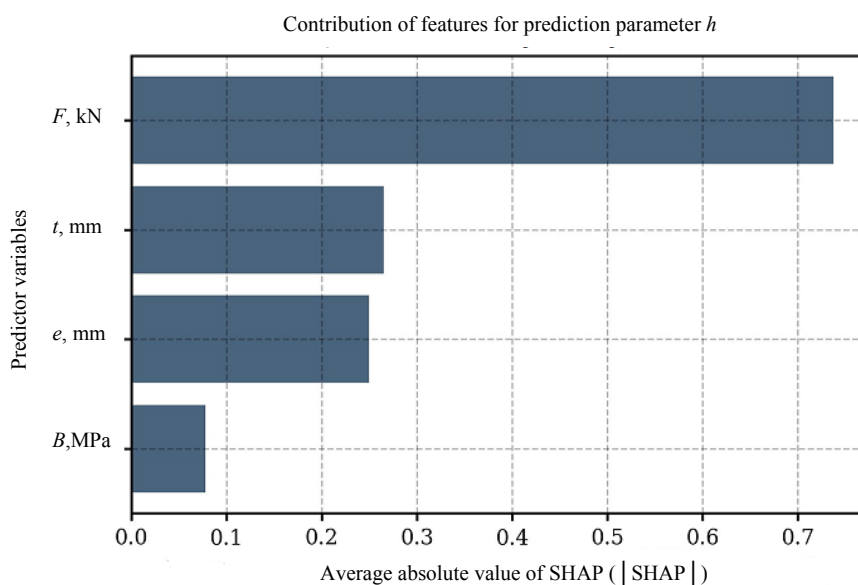


Рис. 7. Анализ важности признаков для прогнозирования высоты сечения (h)

И с т о ч н и к: выполнено А.С. Чепурненко, С.Х. Аль-Згуль.

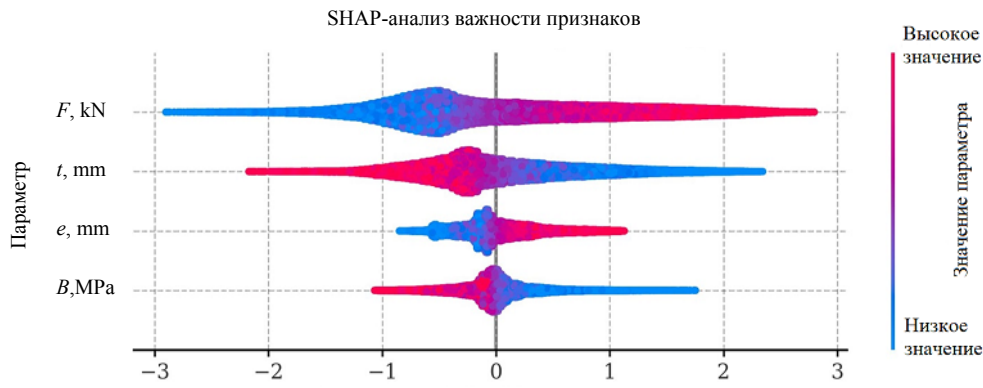


Рис. 8. SHAP-анализ влияния факторов на ширину сечения
И с т о ч н и к: выполнено А.С. Чепурненко, С.Х. Аль-Згуль.

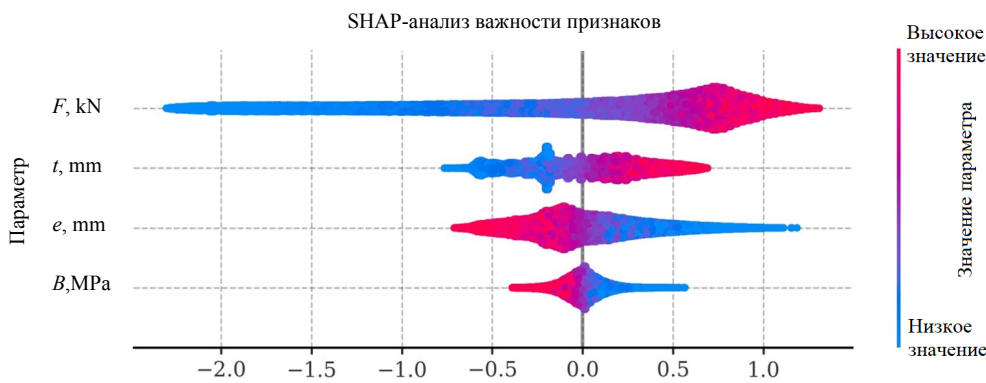


Рис. 9. SHAP-анализ влияния факторов на высоту сечения
И с т о ч н и к: выполнено А.С. Чепурненко, С.Х. Аль-Згуль.

Анализ данных выявил доминирующее влияние продольной силы (F) на геометрические параметры сечения, что подтверждается максимальными значениями SHAP-показателей (0,79 для ширины и 0,75 для высоты). Данная закономерность полностью согласуется с фундаментальными принципами расчета несущей способности сжатых элементов. Примечательно, что характер влияния нагрузки различается для рассматриваемых параметров: ширина сечения демонстрирует более выраженную зависимость SHAP-значения в диапазоне $\approx \pm 3$ по сравнению с высотой $\approx \pm 2$, что объясняется особенностями распределения напряжений в прямоугольном сечении при внецентренном сжатии. Результаты показывают положительную зависимость между увеличением нагрузки и ростом геометрических параметров сечения (ширина b и высота h), что подтверждается данными графика (рис. 8, 9).

Анализ выявляет существенное различие в степени влияния эксцентриситета (e) на параметры сечения. Хотя эксцентриситет значим для обоих размеров, его воздействие на высоту выражено сильнее (2-е место по значимости), чем на ширину (3-е место по значимости). Это объясняется квадратичной зависимостью момента сопротивления от высоты сечения, что делает увеличение h более эффективным для противодействия внецентренным нагрузкам (рис. 6, 7). Графическая визуализация подтверждает необходимость пропорционального увеличения обоих размеров при росте эксцентриситета, что соответствует механике сопротивления конструкции совместному действию изгибающих моментов и продольных сил.

Исследование с использованием SHAP-value позволило установить большее влияние толщины стенки (t) на ширину сечения (SHAP~0,51) по сравнению с высотой (SHAP~0,25) (рис. 6, 7). Согласно результатам, увеличение толщины стенки приводит к уменьшению обоих геометрических параметров (b и h), что вполне закономерно, так как при увеличении толщины стенки возрастает доля усилий, воспринимаемых стальной оболочкой.

Класс бетона (B) демонстрирует статистически значимое, но относительно слабое влияние на геометрические параметры сечения, особенно выраженное для высоты (рис. 6, 7). Такое поведение полностью соответствует механике работы композитных трубобетонных конструкций, где бетонное ядро включается в работу преимущественно на предельных стадиях нагружения. Анализ выявил четкую обратную зависимость между классом бетона и размерами сечения — с ростом прочностных характеристик бетона наблюдалось закономерное уменьшение как ширины, так и высоты сечения (рис. 8, 9).

Результаты анализа выявляют значимые зависимости между конструктивными параметрами (толщина стенки), механическими свойствами материалов (класс бетона, прочность стали) и условиями нагружения (продольная сила, эксцентриситет), с одной стороны, и геометрическими характеристиками трубобетонных колонн — с другой.

4. Заключение

По итогам проведенного исследования были получены следующие научные результаты.

1. Разработана и валидирована регрессионная модель на основе алгоритма CatBoost для прогнозирования оптимальных геометрических параметров (ширины b и высоты h) прямоугольных трубобетонных колонн при внецентренном сжатии. Модель демонстрирует высокую точность прогнозирования с общей композитной метрикой MultiRMSE $\approx 3,6$ мм (на валидационном наборе данных), а также показателями MAE = 2,503 мм для ширины b , MAE = 2,467 мм для высоты h (на тестовом наборе данных) при коэффициенте детерминации $R^2 > 0,999$ для обоих целевых параметров. Расчетные значения высоты и ширины сечения, полученные с помощью нейросети, носят рекомендательный характер. Окончательный выбор геометрических параметров должен соответствовать требованиям ГОСТ, СП или других нормативных документов и согласовывается проектировщиком на основе детальных расчетов и технико-экономического обоснования.

2. Разработана методика многокритериальной оптимизации, учитывающая условия прочности, конструктивные ограничения и экономическую эффективность путем минимизации функции стоимости S .

3. Метод внутренней точки доказал свою эффективность для решения данной нелинейной задачи, обеспечивая оптимальный баланс между несущей способностью, габаритными размерами и экономическими показателями конструкции, а также позволяя учесть проектные требования и технологические ограничения уже на этапе формирования обучающей выборки.

4. SHAP-анализ позволил установить четкую иерархию значимости входных параметров, где продольная сила демонстрирует доминирующее влияние (SHAP-значения в диапазоне 0,75–0,79), что количественно подтверждает ее ключевую роль при назначении габаритов конструкции. При этом выявлено дифференцированное воздействие эксцентриситета на геометрические параметры — его влияние на высоту сечения h оказалось более выраженным по сравнению с шириной b . Полученное распределение значимости факторов полностью соответствует фундаментальным теоретическим положениям механики строительных конструкций, что свидетельствует о физической обоснованности разработанной модели.

Разработанный подход обеспечивает оптимальное проектирование прямоугольных трубобетонных конструкций при внецентренном сжатии при соблюдении требований надежности и экономической эффективности в том диапазоне входных параметров, на котором было проведено обучение модели.

Полученные результаты формируют научно-методическую основу для автоматизации процессов проектирования трубобетонных конструкций, открывая перспективные направления дальнейших исследований, включающие расширение модели для учета длительных нагрузок и сложных условий нагружения, интеграцию с BIM-технологиями, а также разработку нормативных рекомендаций по внедрению методов машинного обучения в проектную практику. Данные направления значительно повысят эффективность проектирования строительных конструкций, обеспечивая требуемые показатели надежности и экономичности.

Список литературы

1. Римиин В.И., Семенова М.Н., Шубин И.Л., Кришан А.Л., Астафьева М.А. Исследования несущей способности внецентренно сжатых сталебетонных колонн // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 8–14. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-8-14> EDN: YHDXCL
2. Pan Y.C., Wang G.H., Xiang K. Overview of research progress for concrete-filled steel tubular columns after exposure to fire // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 638–640. P. 197–201. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.638-640.197>
3. Кришан А.Л., Кришан М.А., Сабиров П.П. Перспективы применения трубобетонных колонн на строительных объектах России // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1. P. 137–140. EDN: RZPTUD
4. Hirakawa K., Saburi K., Kushima S., Kojima K. Performance-based design of 300 m vertical city “Abeno Harukas” // *International Journal of High-Rise Buildings*. 2014. Vol. 3. No. 1. P. 35–48. URL: https://civil808.com/sites/default/files/performance_based_design_of_300.pdf (accessed: 10.03.2025)
5. Knowles R.B., Park R. Strength of concrete filled steel tubular columns // *Journal of the Structural Division*. 1969. Vol. 95. P. 2565–2588.
6. Sakino K., Nakahara H., Morino S., Nishiyama I. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns // *Journal of Structural Engineering*. 2004. Vol. 13. No. 2. P. 180–188. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:2\(180\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(180))
7. Tran V.-L., Thai D.K. A new empirical formula for prediction of the axial compression capacity of CCFT columns // *Steel and Composite Structures*. 2019. Vol. 33. No. 2. P. 181–194. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.33.2.181>
8. Tao Z., Uy B., Han L.-H., He S.-H. Design of Concrete-Filled Steel Tubular Members According to the Australian Standard AS 5100 Model and Calibration // *Australian Journal of Structural Engineering*. 2008. Vol. 8. No. 3. P. 197–214. <https://doi.org/10.1080/13287982.2008.11464998>
9. Goode C.D. Composite columns-1819 tests on concrete-filled steel tube columns compared with Eurocode 4 // *The Structural Engineer*. 2008. Vol. 86. N. 16. P. 33–38.
10. Gao P., Zhou X., Liu J., Lin X., Wang X., Chen Y.F. Experimental assessment on the size effects of square concrete-filled steel tubular columns under axial compression // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 281. Article no. 115706. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115706>
11. Chepurnenko A., Yazyev B., Khashkhozhev K., Chepurnenko V., Meskhi B., Beskopylny A. Simplified 2D finite element model for calculation of the bearing capacity of eccentrically compressed concrete-filled steel tubular columns // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11. No. 24. Article no. 11645. <https://doi.org/10.3390/app112411645> EDN: AKSSMM
12. Lu D., Chen Zh., Ding F., Chen Zh., Sun P. Prediction of mechanical properties of the stirrup-confined rectangular CFST stub columns using fem and machine learning // *Mathematics*. 2021. Vol. 9. No. 14. Article no. 1643. <https://doi.org/10.3390/math9141643> EDN: MXXJFT
13. Mustafa R., Ahmad M.T. Appraisal of numerous machine learning techniques for the prediction of axial load carrying capacity of rectangular concrete column // *Asian J Civ Eng*. 2024. Vol. 25. P. 4471–4486. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01060-6>
14. Gao H. Calculation of load-carrying capacity of square concrete filled tube columns based on neural network // *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 71–78. P. 847–850. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.71-78.847>
15. Ahmadi M., Naderpour H., Kheyroddin A. Utilization of artificial neural networks to prediction of the capacity of CCFT short columns subject to short term axial load // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2014. Vol. 14. No. 3. P. 510–517. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.01.006> EDN: IUXPQY
16. Wang H.J., Zhu H.B., Wei H. Bearing capacity of concrete filled square steel tubular columns based on neural network // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 502. P. 193–197. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.502.193>
17. Du Y., Chen Z., Wang Y.-B., Liew J.Y.R. Ultimate resistance behavior of rectangular concrete-filled tubular beam-columns made of high-strength steel // *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 133. P. 418–433. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.02.024>
18. Le T.T., Asteris P.G., Lemonis M.E. Prediction of axial load capacity of rectangular concrete-filled steel tube columns using machine learning techniques // *Engineering with Computers*. 2022. Vol. 38. P. 3283–3316. <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01461-0>
19. Zarringol M., Patel V.I., Liang Q.Q. Artificial neural network model for strength predictions of CFST columns strengthened with CFRP // *Engineering Structures*. 2023. Vol. 281. Article no. 115784. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115784> EDN: AEKDAT
20. Degtyarev V.V., Thai H.T. Design of concrete-filled steel tubular columns using data-driven methods // *Journal of Constructional Steel Research*. 2023. Vol. 200. Article no. 107653. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107653> EDN: AUPVMJ
21. Thai H.T., Thai S., Ngo T., Uy B., Kang W.H., Hicks S.J. Reliability considerations of modern design codes for CFST columns // *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. Vol. 177. Article no. 106482. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106482> EDN: FYAXTF

22. *Megahed K.* Strength prediction of ECC-CES columns under eccentric compression using adaptive sampling and ML techniques // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article no. 1202. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83666-z>
23. *Zarringol M., Naser M.Z.* Explainable machine learning model for prediction of axial capacity of strengthened CFST columns // *Interpretable Machine Learning for the Analysis, Design, Assessment, and Informed Decision Making for Civil Infrastructure*. Elsevier Publ., 2024. P. 229–253. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824073-1.00016-2>
24. *Chepurnenko A., Yazyev B., Khashkhozhev K., Chepurnenko V., Meskhi B., Beskopylny A.* Simplified 2D finite element model for calculation of the bearing capacity of eccentrically compressed concrete-filled steel tubular columns // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11. No. 24. Article no. 11645. <https://doi.org/10.3390/app112411645> EDN: AKSSMM
25. *Chepurnenko A., Turina V., Akopyan V.* Simplified method for calculating the bearing capacity of slender concrete-filled steel tubular columns // *CivilEng*. 2023. Vol. 4. No. 3. P. 1000–1015. <https://doi.org/10.3390/civileng4030054> EDN: TDQHJD
26. *Chepurnenko A., Al-Zgul S., Tyurina V.* Machine learning for predicting required cross-sectional dimensions of circular concrete-filled steel tubular columns // *Buildings*. 2025. Vol. 15. No. 9. Article no. 1438. <https://doi.org/10.3390/buildings15091438>
27. *Al-Zgul S., Tyurina T., Chepurnenko A., Chepurnenko A., Akopyan V.* Artificial neural network models for predicting required cross-section dimensions of concrete filled steel tubular columns // *The Open Civil Engineering Journal*. 2025. Vol. 19. No. 1. <https://doi.org/10.2174/0118741495387193250411105201>
28. *Chepurnenko A., Yazyev B., Al-Zgul S., Tyurina V.* Simplified finite element model for rectangular CFST columns strength calculation under eccentric compression // *Magazine of Civil Engineering*. 2025. Vol. 18. No. 2. Article no. 13406. <https://doi.org/10.34910/MCE.134.6>
29. *Al-Zgul S., Tyurina V., Chepurnenko A.* A simplified method for determining the bearing capacity of eccentrically compressed rectangular CFST columns with eccentricities in two planes // *Open Construction & Building Technology Journal*. 2025. Vol. 19. Article no. e18748368402845. <https://doi.org/10.2174/0118748368402845250709060829>
30. *Chepurnenko A., Turina V., Akopyan V.F.* Optimization rectangular and box sections in oblique bending and eccentric compression // *Construction Materials and Products*. 2023. Vol. 6. No. 5. P. 1–14. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-5-2>