

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



УДК 69.07

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-7-20>

Моделирование сопротивления поперечным силам балок из сверхвысокопрочного бетона инструментами статистического обучения

М.М. Тамов¹ , О.В. Руденко² , М.И.Ф. Салиб¹

¹Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация

²Кубанский государственный университет, г. Краснодар, Российская Федерация

✉ murat.tamov@gmail.com



EDN: RSCKOZ

Аннотация

Введение. Сверхвысокопрочный бетон (СВПБ) сочетает в себе высокую прочность и трещиностойкость, низкую проницаемость, что делает его эффективным для конструкций, эксплуатируемых в условиях действия агрессивных сред и высоких нагрузок. Расширение практики применения СВПБ в строительстве требует разработки соответствующих научно обоснованных методов расчета изготовленных с его применением конструкций. Одним из малоизученных вопросов является сопротивление изгибаемых СВПБ-конструкций действию поперечных сил. В настоящей работе предложены расчетные зависимости для определения прочности наклонных сечений двутавровых балок из СВПБ, разработанные с применением методов машинного обучения. Для регрессий составлены и структурированы обширные экспериментальные выборки с широкими диапазонами параметров, оказывающих влияние на сопротивление поперечным силам.

Материалы и методы. При построении моделей использованы искусственные нейронные сети (ИНС) и методы регрессионного анализа. Для решения задач использован инструментарий программы STATISTICA.

Результаты исследования. Разработаны нелинейные зависимости для инженерных расчетов, позволяющие производить расчет сопротивления СВПБ-балок поперечным силам с учетом влияния пролета среза нагружения и конструктивных параметров, включая геометрию сечения, прочностные характеристики СВПБ, а также коэффициенты фибрового и поперечного стержневого армирования. Результаты подтверждают применимость регрессионных моделей и ИНС для расчетов прочности наклонных сечений СВПБ-балок, как для сложно формализуемой задачи. Достоверность полученных моделей подтверждена статистическим анализом, включая проверку адекватности уравнений регрессии и их сравнение с нормативными методиками расчета.

Обсуждение и заключение. Предложенные формулы позволяют снизить расхождение между теоретическими и экспериментальными данными в сравнении с нормативными методиками до 2,4 раза. Формулы применимы как для расчета балок с неармированными наклонными сечениями, так и для балок с фибровым и поперечным стержневым армированием.

Ключевые слова: сверхвысокопрочный бетон, двутавровые балки, регрессионный анализ, искусственные нейронные сети, поперечные силы

Для цитирования. Тамов М.М., Руденко О.В., Салиб М.И.Ф. Моделирование сопротивления поперечным силам балок из сверхвысокопрочного бетона инструментами статистического обучения. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):7–20. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-7-20>

Modeling of Shear Strength of Ultra-High-Performance Concrete Beams Using Statistical Learning Tools

Murat M. Tamov¹ , Olga V. Rudenko² , Mina I.F. Salib¹ 

¹ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

² Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation

✉ murat.tamov@gmail.com

Introduction. Ultra-high-performance concrete (UHPC) combines high strength and crack resistance with low permeability, making it ideal for structures operating under aggressive environmental conditions and high loads. The growing use of UHPC in construction makes necessary the development of scientifically grounded methods for designing structures made with this material. The aim of this study is to develop engineering methods for calculating the shear strength of UHPC I-beams using statistical learning techniques. The models were based on extensive datasets, including both the authors' own experimental results and data from other researchers.

Materials and Methods. Artificial neural networks (ANNs) and regression analysis methods were used to develop the models. The tasks were implemented using the STATISTICA software package.

Results. Nonlinear expressions were developed for engineering calculations, allowing for the determination of the shear strength of UHPC-beams accounting for the shear span and structural parameters, including section geometry, UHPC strength characteristics, and fiber and shear reinforcement ratios. The proposed formulas reduce the discrepancy between theoretical and experimental data by up to 2.4 times compared to calculation by methods adopted in codes. The formulas are applicable to beams unreinforced in shear as well as those with fiber and shear reinforcement.

Discussion and Conclusion. The results confirm the applicability of regression models and ANNs for calculating the shear strength of UHPC beams, particularly in cases where traditional analytical solutions are difficult to formalize. The reliability of the developed models is supported by statistical analysis, including verification of regression equation adequacy and comparison with existing code-based methods.

Keywords: ultra-high-performance concrete, I-beams, regression analysis, artificial neural networks, shear force

For citation. Tamov MM, Rudenko OV, Salib MIF. Modeling of Shear Strength of Ultra-High-Performance Concrete Beams Using Statistical Learning Tools, *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(2):7–20. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-7-20>

Введение Сверхвысокопрочные бетоны (далее — СВПБ) с дисперсным (фибровым) армированием — это относительно новый класс бетонов, характеризующийся высокой прочностью и выносливостью, долговечностью и морозостойкостью. По аналогии с другими видами мелкозернистых бетонов одной из областей рационального применения СВПБ являются конструкции с малыми толщинами профиля поперечного сечения. Примером изгибаемых конструкций такого рода являются двутавровые балки пролетных строений и конструкций настилов сооружений, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред.

Совершенствование подходов к расчету на поперечные силы СВПБ-балок главным образом сосредоточено в двух направлениях: построение конечно-элементных моделей с использованием нелинейных диаграмм деформирования СВПБ и арматуры и уточнение формул для инженерных расчетов прочности балок. В качестве примера существующих нормативных методик расчета изгибаемых СВПБ-конструкций на поперечные силы можно привести формулы руководства NF P18-710. По аналогии с Еврокодом 2 в основе формул NF P18-710 лежит метод ферменной аналогии. При этом методика Еврокода 2 предполагает, что вся поперечная сила в элементах с поперечной арматурой воспринимается только хомутами (сопротивление бетона учитывают только в элементах без поперечной арматуры). В свою очередь, в NF P18-710 сопротивление (вклад) бетона назначают как для элементов с поперечной арматурой, так и без нее. Отдельным слагаемым учитывают вклад фибр. Несколько отличается от Еврокода 2 также и подход NF P18-710 к расчету прочности тонких стенок. Так, Еврокодом 2 этот расчет предусмотрен только для элементов с поперечной арматурой, тогда как NF P18-710 содержит расчетные формулы как для элементов с поперечной арматурой, так и без нее.

Методика расчета на поперечные силы СП 360.1325800 «Конструкции сталефибробетонные» повторяет методику свода правил СП 63.13330 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» с заменой прочностных характеристик обычного бетона аналогичными характеристиками сталефибробетона — в формуле для прочности стенок вместо R_b принято R_{fb} , а в формуле для расчета по наклонным сечениям — вместо R_{bt} ис-

пользуют R_{fbr} . Сопротивление R_{fbr} соответствует вершине диаграммы деформирования сталефибробетона при осевом растяжении.

Недостатком нормативных методик является неполный учет факторов, влияющих на сопротивление балок поперечным силам. Это обуславливает необходимость разработки альтернативных подходов, основанных на анализе экспериментальных данных и применении современных вычислительных технологий.

Целью настоящей работы являлось получение инженерных методик расчета сопротивления поперечным силам двутавровых СВПБ-балок с использованием инструментов статистического обучения — нейросетевого и регрессионного анализа. В качестве обучающих и тестовых выборок моделей приняты репрезентативные базы данных, включающие как собственные испытания авторов, так и опыты других исследователей.

Материалы и методы. В строительной науке известно немало задач, не поддающихся решению традиционными вычислительными методами. В таких случаях ускоренный поиск новых решений возможен при помощи технологий управления данными, задействующими большой накопленный объем результатов натурных и численных экспериментов. В литературе по материаловедению этот этап развития науки называют ее «четвертой парадигмой» [1].

В последние годы для расчета конструкций в качестве подхода, альтернативного классическим методам моделирования, активно применяют технологии искусственного интеллекта [2], определяемого как способность компьютера симулировать разумные действия человека, осуществляя поиск алгоритмов при решении сложных задач. Важной частью искусственного интеллекта является машинное обучение, применяемое для исследования трендов и нацеленное на прогнозирование путем разработки алгоритмов для расчетов на основании задействованных при обучении данных [3]. Известна способность машинного обучения улавливать нелинейные зависимости между входными и выходными данными, математическая формулировка которых является затруднительной. Машинное обучение нашло применение в вопросах обследования и мониторинга строительных конструкций, оптимизации, оценки надежности и прогнозирования свойств материалов [4].

Искусственные нейронные сети (ИНС) — вычислительные модели, имитирующие биологические нейронные структуры. Их базовые элементы (нейроны) обрабатывают информацию, динамически реагируя на входные сигналы. Ключевая особенность таких сетей — адаптивность: в отличие от классических алгоритмов, работающих по жестким правилам, ИНС обучаются на большом количестве данных, корректируя параметры связей. Основу ИНС составляют взвешенные соединения между нейронами, формирующие архитектуру с одним или несколькими слоями. В процессе обучения система итерационно оптимизирует весовые коэффициенты, определяющие силу взаимодействия элементов. Для задач прогнозирования и регрессии часто применяют однослойные ИНС как простейший тип архитектуры с прямыми связями [5, 6].

Анализ взаимосвязей между процессами и факторами требует применения специализированных математических методов. Среди них широкое распространение получил *регрессионный анализ*, позволяющий количественно оценить влияние независимых переменных (факторов-предикторов) на исследуемую зависимую величину (результатирующий отклик).

Данный метод дает возможность:

- определить степень воздействия каждого фактора на конечный результат;
- выявить тесноту корреляционных связей между анализируемыми параметрами;
- построить прогностические модели на основе установленных зависимостей.

В настоящей работе ИНС и регрессионный анализ использованы для получения расчетных формул для вычисления сопротивления поперечным силам двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона и фибробетона. Для решения задач задействован инструментальный программный STATISTICA.

Результаты исследования. С учетом принятой в нормах структуры формул для прочности наклонных сечений регрессионный анализ, направленный на разработку инженерной методики расчета двутавровых СВПБ-балок, выполнен в два этапа. На первом этапе получена регрессионная модель прочности балок без фибрового и стержневого поперечного армирования вида

$$Q = Q_b = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6), \quad (1)$$

где $x_1 (a/h_0)$, $x_2 (b_w)$, $x_3 (h_0)$, $x_4 (R)$, $x_5 (\mu_s)$, $x_6 (\varphi_f)$ — фактор-аргументы; a/h_0 — пролет среза; b_w и h_0 — толщина стенки и рабочая высота сечения; R — прочность бетона; μ_s — коэффициент продольного армирования.

$$\varphi_f = \frac{(b_f - b_w) \cdot t_f}{b_w \cdot h_0},$$

где b_f , t_f — ширина и толщина полки.

Базой данных для первого этапа послужила выборка по представленным в литературных источниках результатам испытаний на поперечную силу прямоугольных и двутавровых балок из высокопрочного и сверхвысокопрочного бетонов без фибрового и поперечного стержневого армирования [7–41].

На втором этапе несущая способность балок, армированных фибрами и не имеющих стержневого поперечного армирования, принята равной:

$$Q = Q_b + Q_f,$$

после чего определена формула для вклада фибр Q_f подбором параметров регрессионной модели вида

$$Q = y + f(x_1, x_2, x_3, x_4),$$

где y — вклад бетона Q_b по формуле (1); $x_1 (b_w)$, $x_2 (h_0)$, $x_3 (R_{bt})$, $x_4 (\mu_s)$.

База данных для второго этапа составлена по результатам наших и чужих испытаний на поперечную силу тавровых и двутавровых СВПБ-балок, армированных фибрами, но не имеющих поперечной арматуры [7, 13, 36, 37, 39, 42–49].

На обоих этапах для получения регрессионных зависимостей установлен порядок:

1. Выбор функциональной формы.
2. Оценка параметров модели.
3. Проверка адекватности модели.

Выбор функциональной формы для Q_b осуществлен визуальным анализом, полезным при первичной оценке данных, выявлении общих паттернов и трендов. Так как возможным является построение только трехмерных графиков (поверхностей), то для визуального анализа зависимости их потребуется несколько. Из рассмотрения этих поверхностей (рис. 1) следует, что уравнение зависимости переменной y от x_1 , x_2 , x_3 и x_4 должно иметь сложную нелинейную форму.

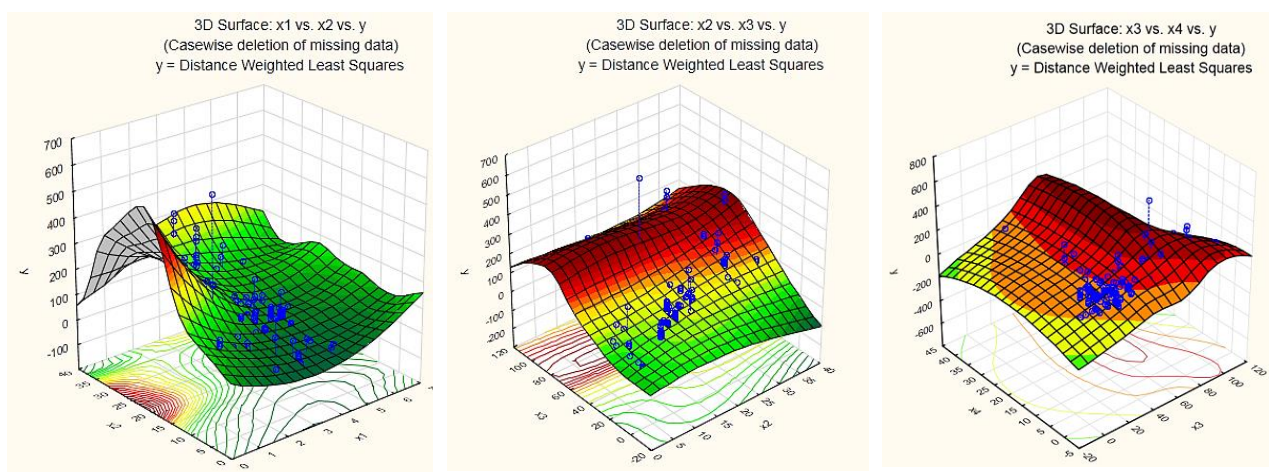


Рис. 1. Трехмерные графики (поверхности) зависимости y от x_1 , x_2 , x_3 и x_4

Для визуализации описательных статистик экспериментальных данных построены так называемые «ящичковые диаграммы» (рис. 2), с помощью которых данные можно оценить на предмет структуры распределения, наличия выбросов, однородности наблюдений и т. д. Как видно, переменные x_1 , x_5 и x_6 тесно расположены около своего среднего значения. Переменные x_2 , x_3 , x_4 и y имеют симметричное распределение. Зависимая переменная y имеет наибольший разброс.

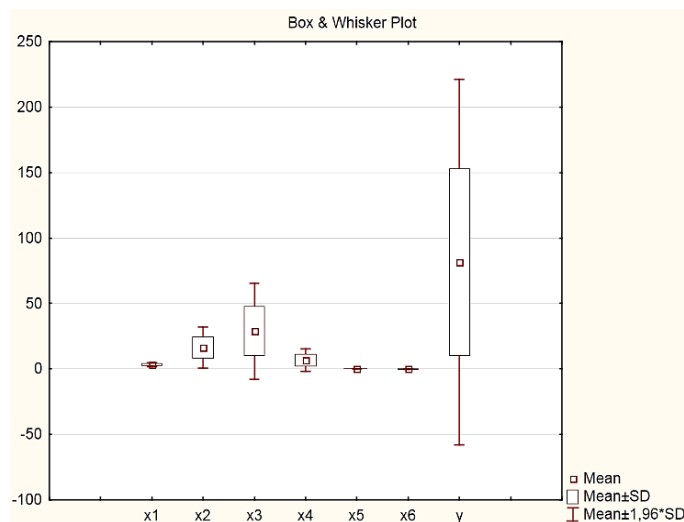


Рис. 2. «Ящичковые» диаграммы

Для исключения явления мультиколлинеарности переменных составлена матрица парных коэффициентов корреляции (рис. 3). Считается, что наличие значений коэффициентов корреляции, по абсолютной величине превосходящих 0,75–0,80, свидетельствует о присутствии мультиколлинеарности между переменными. Чтобы избавиться от мультиколлинеарности, эти факторы необходимо из модели исключить.

Color map of correlations (Spreadsheet1)									
N=217 (Casewise deletion of missing data)									
Variable	x1	x2	x3	x4	x5	x6	y		
x1	1,000000	0,115219	-0,010061	-0,062375	-0,007534	-0,015013	-0,185571		
x2	0,115219	1,000000	0,595526	-0,099337	-0,088854	-0,304818	0,655836		
x3	-0,010061	0,595526	1,000000	-0,015954	-0,089723	-0,014764	0,716017		
x4	-0,062375	-0,099337	-0,015954	1,000000	0,235650	0,420090	0,141043		
x5	-0,007534	-0,088854	-0,089723	0,235650	1,000000	0,158945	0,212631		
x6	-0,015013	-0,304818	-0,014764	0,420090	0,158945	1,000000	-0,069764		
y	-0,185571	0,655836	0,716017	0,141043	0,212631	-0,069764	1,000000		

Рис. 3. Диаграмма корреляций

В нашем случае есть подозрение на мультиколлинеарность между переменными x_2 и x_3 . Для проверки использован метод анализа чувствительности входных переменных при построении модели нейронной сети — процесс оценки влияния входных переменных (признаков) на выход модели, то есть на результат прогнозирования или классификации. Этот анализ позволяет оценить, как изменения входных данных или параметров модели сказываются на выходе нейронной сети, и помогает понять, какие признаки наиболее важны для модели, а какие могут быть исключены (рис. 4).

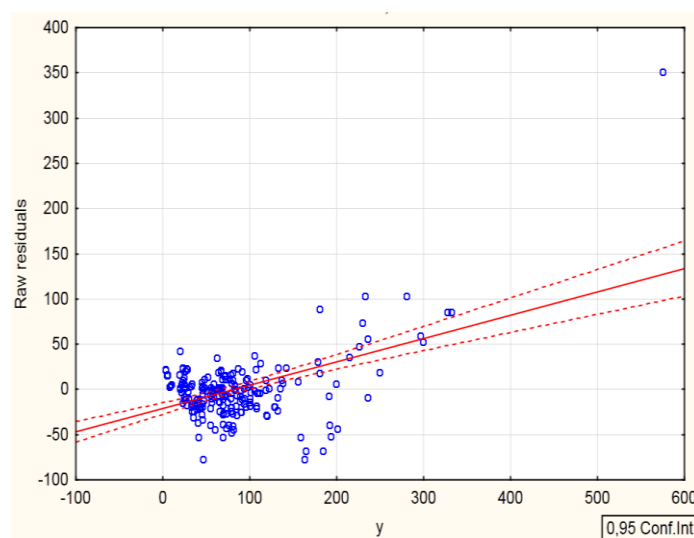
Sensitivity analysis (Spreadsheet1)						
Samples: Train						
Networks	x3	x2	x5	x1	x4	x6
5.MLP 6-3-1	4,656816	3,938443	3,029732	1,856225	1,091346	1,005235

Рис. 4. Анализ чувствительности y

При построении модели нейронной сети все входные переменные получили значения чувствительности больше 1. Это значит, что в нашем уравнении регрессии следует сохранить все 6 входных переменных.

Определение коэффициентов модели Q_b проводилось с использованием метода наименьших квадратов (МНК), который предполагает соблюдение ряда статистических предпосылок. Важнейшим из таких условий выступает гомоскедастичность — постоянство дисперсии случайных ошибок модели. Нарушение этого требования (гетероскедастичность) приводит к следующим последствиям: становится некорректным применение t -критерия Стьюдента и F -критерия Фишера. Таким образом, при наличии гетероскедастичности результаты регрессионного анализа нельзя считать статистически достоверными.

В пакете STATISTICA использован графический анализ для выявления гетероскедастичности. Для этого построен график, где по оси абсцисс отложены значения переменной y , а по оси ординат — ее отклонения (рис. 5). Как видно, значения распределены случайным образом (выходят за доверительные границы), поэтому можно предположить отсутствие гетероскедастичности.

Рис. 5. График зависимости остатков от переменной y

Таким образом, расчет параметров нелинейного уравнения регрессии можно вычислять с помощью МНК. Для этого использован блок пользовательской регрессии программы STATISTICA, который позволяет вводить произвольный вид уравнения. За основу взята сложная нелинейная модель вида

$$y = a_0 x_1^{m_1} x_2 x_3 x_4^{m_2} x_5^{m_3} (1 + a_1 x_6) \left(1 + a_2 \frac{1}{\sqrt{x_3}} \right). \quad (2)$$

Результат работы по оценке параметров a_0 , a_1 , a_2 , m_1 , m_2 и m_3 функции (2) в программе STATISTICA приведен на рис. 6. В первой колонке таблицы приведены оценки параметров регрессии, позволяющие записать аналитическое представление уравнения:

$$y = 1,466 x_1^{-1,14} x_2 x_3 x_4^{0,2} x_5^{0,6} (1 + 1,6 x_6) \left(1 + 9,4 \frac{1}{\sqrt{x_3}} \right). \quad (3)$$

Колонка 3 содержит расчетные значения t-статистики, количественно оценивающей значимость влияния предикторов на зависимую переменную. Данный показатель рассчитывается как отношение:

$$t = (\text{оценка коэффициента}) / (\text{стандартная ошибка коэффициента}).$$

Величина показателя отражает число стандартных отклонений, на которые оценка коэффициента отстоит от нуля. Эмпирически установлено, что коэффициенты с t-значениями за пределами $[-2; 2]$ обладают достаточной надежностью для использования в прогнозных моделях. При этом чем выше абсолютное значение статистики, тем меньше вероятность ошибочного признания коэффициента значимым и стабильнее прогнозы модели.

В четвертой колонке даны p-значения — наименьшие уровни значимости (вероятности отказа от справедливой гипотезы), для которых вычисленная проверочная статистика ведет к отказу от нулевой гипотезы. Для этого p-значение сравнивают с общепринятыми стандартными уровнями значимости 0,05 или 0,01.

Model is: $v7=a0*v1^m1*v2*v3^m2*v4^m3*(1+a1*v6)*(1+a2*v3^{(-0.5)})$ (Spreadsheet105)						
Dep. Var. : Q_b						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 211	p-value	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	1.46615	0.348623	4.2055	0.000038	0.77892	2.15338
m1	-1.13779	0.059233	-19.2086	0.000000	-1.25455	-1.02102
m2	0.19068	0.032669	5.8366	0.000000	0.12628	0.25508
m3	0.59965	0.030337	19.7659	0.000000	0.53984	0.65945
a1	1.60835	0.350377	4.5903	0.000008	0.91766	2.29904
a2	9.37469	2.217515	4.2276	0.000035	5.00337	13.74602

Results: Spreadsheet105

Model is: $v7=a0*v1^m1*v2*v3^m2*v4^m3*(1+a1*v6)*(1+a2*v3^{(-0.5)})$
Dependent variable: Q_b Independent variables: 6
Loss function: least squares
Final value: 107391.0904578
Proportion of variance accounted for: .90184442 R = .9496549

Рис. 6. Результат расчета параметров уравнения регрессии Q_b

По приведенным на рис. 6 величинам вышеописанных параметров и высоким значениям показателя множественной корреляции ($R \approx 0,95$) можно утверждать о статистической значимости параметров уравнения (3).

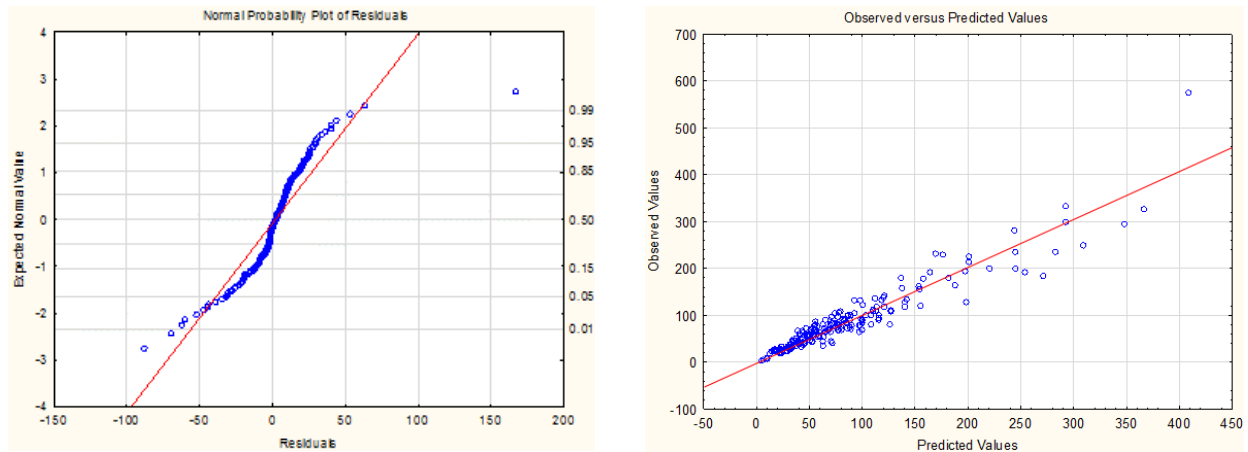
Адекватность модели тесно связана с выполнением основных исходных предпосылок относительно регрессионных остатков ε_i , к которым относится независимость и отсутствие автокорреляции остатков, а также их нормальное распределение. Если выбранная регрессионная модель хорошо описывает истинную зависимость, то остатки должны быть независимыми, нормально распределенными случайными величинами с нулевым средним. На диаграмме распределения остатков (рис. 7 а) точки лежат вдоль прямой — распределение остатков является нормальным. На диаграмме рассеяния (рис. 7 б) точки располагаются близко к прямой, проведенной под углом 45° к осям координат. Это указывает на близость отклика к наблюдаемым значениям.

На *втором этапе* регрессионного анализа построена зависимость для прочности СВГБ-балок с фибровым армированием, не имеющим стержневой поперечной арматуры. Общий вид функции:

$$Q = Q_b + Q_f.$$

Подставив вместо Q_b величину y , рассчитываемую по (3), и заменив вклад фибр функцией от x_1 (b_w), x_2 (h_0), x_3 (R_{bt}), x_4 (μ_s), получим:

$$Q = y + f(x_1, x_2, x_3, x_4). \quad (4)$$



а)

б)

Рис. 7. Диаграммы распределения: а — остатков; б — рассеяния

Для расчета основных статик всех факторов модели построена матрица парных корреляций (рис. 8). Выявлено, что аргументы x_2 и y имеют очень высокую парную корреляцию (больше 0,7).

Correlations (Spreadsheet1)								
Marked correlations are significant at $p < ,05000$								
N=56 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Means	Std.Dev.	x1	x2	x3	x4	y	Q
x1	4,4821	0,9861	1,000000	0,031394	0,216939	-0,508297	0,166597	0,276947
x2	37,6357	18,9912	0,031394	1,000000	0,616026	-0,203521	0,831776	0,783928
x3	1,3526	0,5999	0,216939	0,616026	1,000000	-0,573725	0,597728	0,635939
x4	0,0394	0,0187	-0,508297	-0,203521	-0,573725	1,000000	-0,253158	-0,160484
y	98,9823	53,7237	0,166597	0,831776	0,597728	-0,253158	1,000000	0,834242
Q	279,6782	183,3429	0,276947	0,783928	0,635939	-0,160484	0,834242	1,000000

Рис. 8. Матрица парных корреляций

Анализ парных корреляционных коэффициентов позволяет выявить только явные случаи линейной взаимосвязи между предикторами. Однако основные проблемы при построении множественных регрессионных моделей возникают при наличии мультиколлинеарности — ситуации, когда наблюдается системная линейная зависимость между несколькими факторами одновременно. Для количественной оценки степени мультиколлинеарности применяется анализ определителя корреляционной матрицы факторов. Чем ближе значение определителя к нулю, тем выше степень линейной зависимости между переменными и сильнее выражена проблема мультиколлинеарности, а также менее надежны получаемые оценки параметров модели (рис. 9).

$$R_{ww} := \begin{pmatrix} 1 & 0.031394 & 0.216939 & -0.508297 & 0.166597 & 0.276947 \\ 0.031394 & 1 & 0.616026 & -0.203521 & 0.831776 & 0.783928 \\ 0.216939 & 0.616026 & 1 & -0.573725 & 0.597728 & 0.635939 \\ -0.508297 & -0.203521 & -0.573725 & 1 & -0.253158 & -0.160484 \\ 0.166597 & 0.831776 & 0.597728 & -0.253158 & 1 & 0.834242 \\ 0.276947 & 0.783928 & 0.635939 & -0.160484 & 0.834242 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\det R := |R| \quad \det R = 0.014$$

Рис. 9. Расчет определителя матрицы парных коэффициентов корреляции

Близость к нулю определителя матрицы парных коэффициентов корреляции ($\det R = 0,014$) означает наличие мультиколлинеарности между аргументами. Одним из путей учета внутренней корреляции факторов является переход к совме-

ценным уравнениям регрессии, т. е. к уравнениям, которые отражают не только влияние факторов, но и их взаимодействие. Поэтому включим в модель совмещение наших фактор-аргументов $Q = y + f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4)$ в первой степени, и спецификация вновь будет представлять сложную нелинейную зависимость. Нелинейный характер взаимосвязи модели подтверждается формами построенных трехмерных поверхностей зависимости переменной Q от своих аргументов (рис. 10).

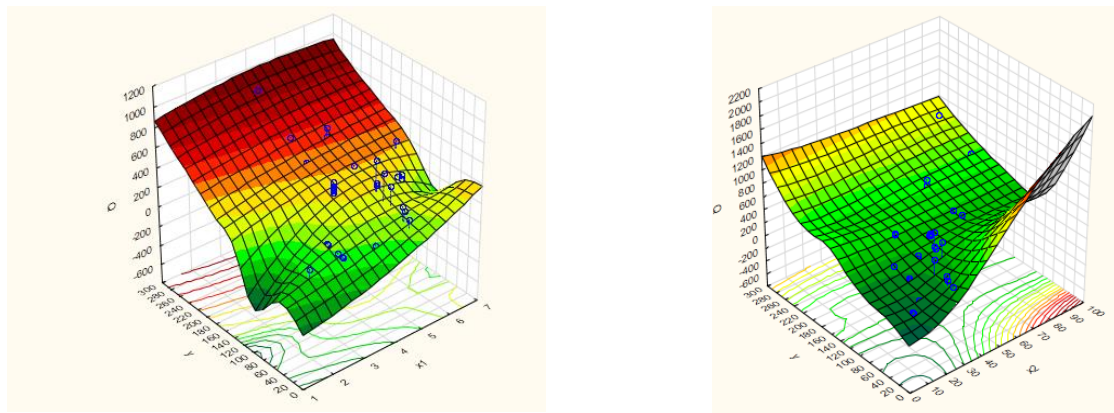


Рис. 10. Трехмерные графики (поверхности) зависимости Q от x_1 и x_2

Анализ чувствительности (рис. 11) указывает на необходимость участия в регрессии всех переменных, при этом наибольший вклад ожидаемо будет вносить переменная y (вклад бетона Q_b).

Sensitivity analysis (Spreadsheet1)					
Samples: Train					
Networks	y	x2	x4	x3	x1
1.MLP 5-4-1	106,7567	30,73866	8,477698	8,374472	2,453012

Рис. 11. Анализ чувствительности Q

В результате проведенных исследований было решено использовать в качестве спецификации модели зависимость:

$$Q = y + a_0 x_1 x_2 x_3^{m_3} x_4^{m_4} \left(1 + 2 \frac{1}{\sqrt{x_2}}\right). \quad (5)$$

Результаты оценки параметров регрессии в программе STATISTICA приведены на рис. 12.

Model is: $v_6 = v_5 + a_0 \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot v_3^{m_1} \cdot v_4^{m_2} \cdot (1 + 2 \cdot v_2^{(-0.5)})$ (Spreadsheet108)						
Dep. Var. : Q						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 53	p-value	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	5.458100	2.014278	2.709706	0.009052	1.417971	9.498230
m1	0.948995	0.205740	4.612603	0.000026	0.536334	1.361656
m2	0.646525	0.127836	5.057442	0.000005	0.390117	0.902932
Results: Spreadsheet108						
Model is: $v_6 = v_5 + a_0 \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot v_3^{m_1} \cdot v_4^{m_2} \cdot (1 + 2 \cdot v_2^{(-0.5)})$						
Dependent variable: Q Independent variables: 5						
Loss function: least squares						
Final value: 322009.0360973						
Proportion of variance accounted for: .82582846 R = .90875105						

Рис. 12. Результат расчета параметров уравнения регрессии Q

После подстановки значения параметров в (5) получен следующий общий вид уравнения:

$$Q = y + 5,46 x_1 x_2 x_3^{0,95} x_4^{0,65} \left(1 + 2 \frac{1}{\sqrt{x_2}}\right).$$

Величины t -значения и p -значения указывают на хороший подбор уравнения регрессии и статистическую значимость его коэффициентов (рис. 13). Показатель множественной корреляции $R = 0,91$ высоко оценивает тесноту совместного влияния факторов на результат.

Model is: $v_6 = v_5 + a_0 \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 \cdot v_4 \cdot m_4 \cdot (1 + 2 \cdot v_2^{-0.5})$ (Spreadsheet1) Dep. Var. : Q					
Effect	1 Sum of Squares	2 DF	3 Mean Squares	4 F-value	5 p-value
Regression	5907108	3,00000	1969036	324,0869	0,00
Residual	322009	53,00000	6076		
Total	6229117	56,00000			
Corrected Total	1848804	55,00000			
Regression vs. Corrected Total	5907108	3,00000	1969036	58,5768	0,00

Рис. 13. Результаты многомерного дисперсионного анализа

В четвертом столбце (рис. 13) приведена F -статистика Фишера, служащая для проверки модели на адекватность. В пятом столбце (p) приведена значимость F -статистики Фишера – критическое значение квантиля распределения Фишера, на котором отвергается нулевая гипотеза отсутствия влияния фактора. Поэтому признаётся статистическая значимость уравнения регрессии, т. е. связь между рассматриваемыми признаками есть, и результаты наблюдений не противоречат предположению о её спецификации. Нормальный вероятностный график (рис. 14) подтверждает нормальное распределение остатков регрессионной модели.

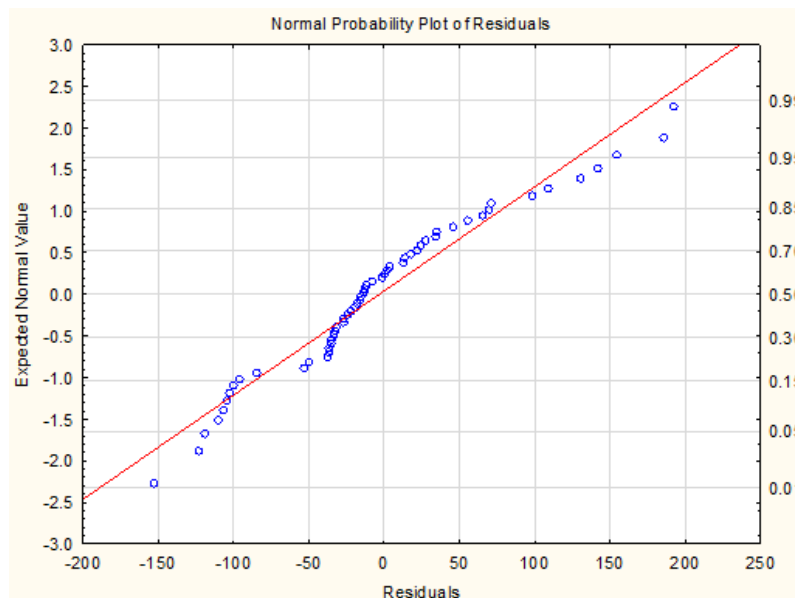


Рис. 14. Диаграммы распределения остатков

Наличие автокорреляции между аргументами модели мешает подтвердить правильность выбора спецификации. В этом случае необходимо провести сравнительный анализ между альтернативными вариантами регрессионной зависимости. Например, в качестве альтернативы можно взять уравнение (6) совместного влияния без учета фактора x_2 :

$$Q = a_0 x_1^{m_1} x_3^{m_3} x_4^{m_4} y \quad (6)$$

Рассчитанные параметры этой регрессии даны на рис. 15.

Model is: $v_6 = a_0 \cdot v_1^{m_1} \cdot v_3^{m_3} \cdot v_4^{m_4} \cdot v_5$ (Spreadsheet1) Dep. Var. : Q Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard error	t-value df = 52	p-value	Lo. Conf Limit	Up. Conf Limit
a0	3,640638	1,354431	2,687946	0,009635	0,922773	6,358504
m1	0,471554	0,205487	2,294819	0,025811	0,059215	0,883893
m3	0,428909	0,123765	3,465514	0,001069	0,180556	0,677261
m4	0,323869	0,089391	3,623062	0,000661	0,144493	0,503245

Рис. 15. Результат расчета параметров уравнения регрессии (6)

Классический коэффициент детерминации R^2 , варьирующийся в диапазоне от 0 до 1, служит базовым показателем объясняющей способности модели. Однако этот показатель обладает существенным ограничением: его значение монотонно возрастает при добавлении любых регрессоров, даже статистически незначимых. Данный эффект обусловлен самой математической природой R^2 , что делает его малоприменимым для сравнения моделей с разным количеством предикторов и выбора оптимальной спецификации. Для преодоления этих недостатков были разработаны альтернативные подходы, такие как применение скорректированного R^2 , который позволяет более объективно сравнивать модели разной размерности, но также охраняет ограничения исходного метода R^2 , и информационные критерии Акаике (AIC) и байесовский критерий Шварца (BIC/SC). Критерий AIC менее строг к числу параметров и предпочтителен для небольших выборок, тогда как BIC/SC жестче штрафует за сложность модели, дает более точные оценки на больших данных и учитывает объем выборки в формуле штрафа. Поэтому оптимальной будет считаться спецификация с минимальным значением информационного критерия (AIC или BIC), что отражает компромисс между точностью описания данных и сложностью модели.

В таблице 1 выполнено сравнение информационных показателей выбранной спецификации модели (5) с (6) расчетными формулами СП 360.1325800, а также с формулами FIB Model code 2010 и RILEM TC 162-TDF. Как видно, все 4 метрики имеют наименьшее значение для выбранной спецификации (5).

Таблица 1

Показатели качества уравнения регрессии

Уравнение	MSE	MAPE	AIC	BIC
(5)	6110,08	26,78 %	500,19	657,57
(6)	7506,72	28 %	511,72	669,11
СП 360.1325800	30528,81	47 %	590,28	757,35
FIB Model code 2010	56070,45	57 %	624,32	811,49
RILEM TC 162-TDF	24092,38	42 %	577,02	750,69

Оценка точности предложенных методик расчета прочности двутавровых СВПБ-балок при действии поперечных сил выполнена сравнением теоретических и опытных значений разрушающих нагрузок по выборке данных, составленной по соответствующим опубликованным экспериментальным исследованиям [7, 13, 32, 36, 37, 42–50]. Значения разрушающих нагрузок определены следующим образом:

$$Q_{\text{пер}} = Q_{b,\text{пер}} + Q_{f,\text{пер}} + Q_{sw},$$

где $Q_{b,\text{пер}}$ и $Q_{f,\text{пер}}$ — вклады бетона и фибр по (3) и (4).

В таблицах 2–4 приведена сравнительная оценка точности по предложенной регрессии и нормативных методик расчета. При этом балки без фибрового армирования рассчитаны по формулам СП 63.13330, ACI 318M и Еврокода 2, а балки с фибровым армированием — по формулам СП 360.1325800, предназначенного для проектирования сталефибробетонных конструкций, и по формулам FIB Model code 2010 и RILEM TC 162-TDF по проектированию СВПБ-конструкций.

Таблица 2

Сравнение опытных Q_{exp} и теоретических Q_{calc} значений прочности СВПБ-балок без фибрового и поперечного стержневого армирования

Показатель	Методика расчета			
	Регрессия	СП 63.13330	ACI 318M	ЕС 2
Среднее отклонение в % $\left(\frac{Q_{\text{exp}} - Q_{\text{calc}}}{Q_{\text{exp}}}\right) \cdot 100$	17	40	29	21
Среднее значение отношения $Q_{\text{exp}}/Q_{\text{calc}}$	1,03	1,45	1,34	1,2
Коэффициент вариации отношения $Q_{\text{exp}}/Q_{\text{calc}}$	0,22	0,43	0,44	0,56

Таблица 3

Сравнение опытных Q_{exp} и теоретических Q_{calc} значений прочности СВПБ-балок с фибрами и без поперечного стержневого армирования

Показатель	Методика расчета			
	Регрессия	СП 360.1325800	FIB Model code 2010	RILEM TC 162-TDF
Среднее отклонение в % $\left(\frac{Q_{exp} - Q_{calc}}{Q_{exp}}\right) \cdot 100$	26	47	57	42
Среднее значение отношения Q_{exp}/Q_{calc}	1	2,46	2,76	1,85
Коэффициент вариации отношения Q_{exp}/Q_{calc}	0,29	0,64	0,42	0,41

Таблица 4

Сравнение опытных Q_{exp} и теоретических Q_{calc} значений прочности СВПБ-балок с фибровым и поперечным стержневым армированием

Показатель	Методика расчета			
	Регрессия	СП 360.1325800	FIB Model code 2010	RILEM TC 162-TDF
Среднее отклонение в % $\left(\frac{Q_{exp} - Q_{calc}}{Q_{exp}}\right) \cdot 100$	28	37	39	39
Среднее значение отношения Q_{exp}/Q_{calc}	1,19	1,71	1,76	1,81
Коэффициент вариации отношения Q_{exp}/Q_{calc}	0,33	0,44	0,43	0,38

Наибольшая точность регрессионной модели достигается в отсутствии фибрового и поперечного стержневого армирования балок: средняя разница между опытным и теоретическими значениями в этом случае равна 17 %. При расчете балок с фибрами и хомутами погрешность ожидаемо возрастает, достигая 28 %. Как видно, при этом среднее значение отношения Q_{exp}/Q_{calc} составило 1,19, т. е. отклонение формируется в сторону запаса.

Обсуждение и заключение. Представленные полученными регрессионными моделями результаты демонстрируют возможность вычисления вклада бетона и фибр в сопротивление СВПБ-балок поперечным силам. Оценка качества и достоверности моделей подтверждена применением набора метрик и сопоставлением с альтернативными моделями. Расчет по разработанным регрессиям улучшает сходимость теоретических и опытных результатов по сравнению с формулами норм до 2,4 раз. Синтез статистических методов и инструментов искусственного интеллекта открывает перспективы для дальнейшего совершенствования методик расчета строительных конструкций, особенно в случаях сложно формализуемых задач, где построение традиционных аналитических решений затруднительно.

Список литературы/References

1. Agrawal A, Choudhary A Perspective: Materials Informatics and Big Data: Realization of the “Fourth Paradigm” of Science in Materials Science. *APL Materials*. 2016;4:1–10. <https://doi.org/10.1063/1.4946894>
2. Jasmine PH, Arun S Machine Learning Applications in Structural Engineering - a Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1114/1/012012>
3. Salehi H Emerging Artificial Intelligence Methods in Structural Engineering. *Engineering Structures*. 2018;171:170–189. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.084>

4. Falcone R, Lima C, Martinelli E Soft Computing Techniques in Structural and Earthquake Engineering: a Literature Review. *Engineering Structures*. 2020;207(4):1–16. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110269>
5. Keshtegar B, Bagheri M, Yaseen ZM Shear Strength of Steel Fiber-Unconfined Reinforced Concrete Beam Simulation: Application of Novel Intelligent Model. *Composite Structures*. 2019;212:230–242. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.004>
6. Hosseini Gh Capacity Prediction of RC Beams Strengthened with FRP by Artificial Neural Networks Based on Genetic Algorithm. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*. 2017;1(1):93–98. <https://doi.org/10.22115/scce.2017.48392>
7. Salib MIF, Tamov MM Strength of Inclined Sections (Shear Strength) of I-shaped Beams Made of Ultra-High-Performance Concrete. *Engineering Journal of Don*. 2024;109(1):369–381. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8952> (accessed: 04.05.2025)
8. Adebar P, Collins MP Shear Strength of Members Without Transverse Reinforcement. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1996;23(1):30–41. <https://doi.org/10.1139/196-004>
9. Ahmad SH, Khaloo AR Shear Capacity of Reinforced High-Strength Concrete Beams. *ACI Journal, Proceedings*. 1986;83(2):297–305.
10. Ahmad SH, Xie Y, Yu T Shear Strength of Reinforced Lightweight Concrete Beams of Normal and High Strength Concrete. *Magazine of Concrete Research*. 1994;46(166):57–66. <https://doi.org/10.1680/mac.1994.46.166.57>
11. Ahmad SH, Park F, El-Dash K Web Reinforcement Effects on Shear Capacity of Reinforced High-Strength Concrete Beams. *Magazine of Concrete Research*. 1995;47(172):227–233. <https://doi.org/10.1680/mac.1995.47.172.227>
12. Arowojolu O, Ibrahim A, Almakrab A, Saras N, Nielsen R Influence of Shear Span-to-Effective Depth Ratio on Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2021;15(1):1–12. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00444-7>
13. Baby F, Marchand P, Toutlemonde F Shear Behavior of Ultrahigh Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams. I: Experimental Investigation. *Journal of Structural Engineering*. 2014;140(5):1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000907](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000907)
14. Bae B-I, Lee M-S, Choi C-S, Jung H-S, Choi H-K Evaluation of the Ultimate Strength of the Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams. *Applied Sciences*. 2021;11(7):1–17. <https://doi.org/10.3390/app11072951>
15. Bazant ZP, Kazemi MT Size Effect on Diagonal Shear Failure of Beams without Stirrups. *ACI Journal*. 1991;88(3):268–276. URL: <http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/273.pdf> (accessed: 04.05.2025).
16. Bohigas AC *Shear Design of Reinforced High-Strength Concrete Beams*. University of the Balearic Islands; 2002. URL: https://www.researchgate.net/publication/263696608_Shear_design_of_reinforced_high-strength_concrete_beams (accessed: 04.05.2025).
17. Bui T, Nana WSA, Doucet-Ferru B, Bennani A, Lequay H, Limam A Shear Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Without Stirrups: Experimental Investigation. *International Journal of Civil Engineering*. 2020;18(5):865–881. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00505-8>
18. Collins MP, Kuchma D How safe are our large, lightly reinforced concrete beams, slabs and footings? *ACI Structural Journal*. 1999;96(4):482–490.
19. Elzanaty AH, Nilson AH, Slate FO Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete. *ACI Journal*. 1986;83(2):290–296.
20. González-Fontboa B *Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante*. Universidad de la Coruña; 2002. (in Spanish)
21. Hamrat M, Boulekbache B, Chemrouk M, Amziane S Shear Behaviour of RC Beams without Stirrups Made of Normal Strength and High Strength Concretes. *Advances in Structural Engineering*. 2010;13(1):29–41.
22. Hasgul U, Yavas A, Birol T, Turker K Steel Fiber Use as Shear Reinforcement on I-Shaped UHP-FRC Beams. *Applied Sciences*. 2019;9(24):1–17. <https://doi.org/10.3390/app9245526>
23. Islam MS, Pam HJ, Kwan AKH Shear Capacity of High-Strength Concrete Beams with their Point of Inflection within the Shear Span. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and buildings*. 1998;128(1):91–99. <https://doi.org/10.1680/istbu.1998.30038>
24. Johnson MK, Ramirez JA Minimum Shear Reinforcement in Beams with Higher Strength Concrete. *ACI Structural Journal*. 1989;86(4):376–382.
25. Kani MW, Huggins MW, Wittkopp PF *Kani on Shear in Reinforced Concrete*. Canada: University of Toronto; 1979.
26. Kim JK, Park YD Shear Strength of Reinforced High Strength Concrete Beams without Web Reinforcement. *Magazine of Concrete Research*. 1994;46:1–8. <https://doi.org/10.1680/mac.1994.46.166.7>

27. Kulkarni SM, Shah SP Response of Reinforced Concrete Beams at High Strain Rates. *ACI Structural Journal*. 1998;95(6):705–715.
28. Kwak Y-K, Eberhard MO, Kim W-S, Kim J Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups. *ACI Structural Journal*. 2002;99:530–538.
29. Mohammed MH Shear Behavior of Reactive Powder Concrete Beams with and without Coarse Aggregate. *Engineering, Materials Science*. 2018;2:86–90. <https://doi.org/10.22060/ceej.2017.12210.5145>
30. Morrow J, Viest IM Shear Strength of Reinforced Concrete Frame Members without Web Reinforcement. *ACI Journal*. 1957;28(9):833–869.
31. Mphonde AG, Frantz GC Shear Tests of High- and Low-Strength Concrete Beams Without Stirrups. *ACI Journal*. 1984;81(4):350–357.
32. Pansuk W, Nguyen T, Sato Y, Den Uijl JA, Walraven JC Shear Capacity of High Performance Fiber Reinforced Concrete I-beams. *Construction and Building Materials*. 2017;157:182–193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.057>
33. Perera R, Barchin M, Arteaga A, De Diego A Prediction of the Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams FRP-Strengthened in Shear Using Neural Networks. *Composites Part B: Engineering*. 2010;41(4):287–298. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.03.003>
34. Reddy LS, Rao NV, Rao TD Shear Response of Fibrous High Strength Concrete Beams without Web Reinforcement. *Civil Engineering Dimension*. 2011;13(1):50–58.
35. Salandra MA, Ahmad SH Shear Capacity of Reinforced Lightweight High-Strength Concrete Beams. *ACI Journal*. 1989;86(6):697–704.
36. Tavio T Experimental Investigation on Size Effect in Shear of High-Strength Concrete Beams. *The Journal for Technology and Science*. 2009;20(1):11–23. <https://doi.org/10.12962/j20882033.v20i1.131>
37. Thiemicke J, Fehling E Experimental and Numerical Investigations on I-Shaped UHPC-Beams with Combined Reinforcement under Shear Load. In book: *Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. 1st Edition. 2016. P. 1363–1367.
38. Thorenfeldt E, Drangsholt G Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Beams. *ACI 2nd International Symposium on HSC, ACI SP 121.8*. 1990. P. 129–154.
39. Yavas A, Goker CO Impact of Reinforcement Ratio on Shear Behavior of I-Shaped UHPC Beams with and without Fiber Shear Reinforcement. *Materials*. 2020;13(7):1–17. <https://doi.org/10.3390/ma13071525>
40. Xie Y, Ahmad SH, Yu T, Hino S, Chung W Shear ductility of reinforced concrete beams of normal and high strength concrete. *ACI Journal*. 1994;91(2):140–149.
41. Yoon Y-S, Cook WD, Mitchell D Minimum Shear Reinforcement in Normal, Medium and High-Strength Concrete Beams. *ACI Structural Journal*. 1996;93(5):576–584.
42. Lee J-H, Hong S-G Shear Strength of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) I-shaped Beams without Stirrup. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2017;29:53–64. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2017.29.1.053>
43. Magureanu C, Sosa I, Negrutiu C, Heghes B Bending and Shear Behavior of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete. *High Performance Structures and Materials V*. 2010;112:79–89. <https://doi.org/10.2495/HPSM100081>
44. Meszoly T, Randl N Shear Behavior of Fiber-Reinforced Ultra-High Performance Concrete Beams. *Engineering Structures*. 2018;168:119–127. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.075>
45. Telleen K, Noshirvani T, Galrito R, Brühwiler E Experimental Investigation into the Shear Resistance of a Reinforced UHPFRC Web Element. In: *8th fib PhD Symposium in Kgs. Lyngby*; 2010. P. 1–6. URL: https://www.researchgate.net/publication/49461300_Experimental_investigation_into_the_shear_resistance_of_a_reinforced_UHPFRC_web_element (accessed: 04.03.2025).
46. Ţibea C, Bompa DV Ultimate Shear Response of Ultra-High-Performance Steel Fibre-Reinforced Concrete Elements. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2020;20(49):1–16.
47. Wu X, Han S-M First Diagonal Cracking and Ultimate Shear of I-Shaped Reinforced Girders of Ultra-high performance fiber reinforced concrete without stirrup. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2009;3:47–56. <https://doi.org/10.4334/IJCSM.2009.3.1.047>
48. Yang I-H, Joh C, Kim B-S Shear Behaviour of Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Beams Without Stirrups. *Magazine of Concrete Research*. 2012;64(11):979–993.
49. Zagon R, Matthy S, Kiss Z Shear behaviour of SFR-UHPC I-shaped beams. *Construction and Building Materials*. 2016;124:258–268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.075>
50. Lee JW, Joh C, Choi ES, Kwak IJ, Kim BS Estimation of Shear Behavior of Ultra High Performance Concrete I Girder without Shear Stirrups. *Key Engineering Materials*. 2013;525–526:557–560. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.557>

51. Qi J, Ding X, Wang Z, Hu Y Shear Strength of Fiber-Reinforced High-Strength Ssteel Ultra-High-Performance Concrete Beams Based on Refined Calculation of Compression Zone Depth Considering Concrete Tension. *Advances in Structural Engineering*. 2019;22:2006–2018. <https://doi.org/10.1177/1369433219829805>

Об авторах:

Мурат Мухамедович Тамов, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), [ORCID](#), murat.tamov@gmail.com

Ольга Валентиновна Руденко, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных технологий Кубанского государственного университета (350040, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149), [ORCID](#), olga_ned@mail.ru

Салиб Мина Ибрахим Фахми, инженер кафедры строительных конструкций Кубанского государственного технологического университета (350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2), [ORCID](#), minaibrahim1234@yahoo.com

Заявленный вклад авторов:

М.М. Тамов: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, формулировка выводов, корректировка текста.

О.В. Руденко: помощь и руководство по использованию программы моделирования и анализу результатов, подготовка текста.

М.И.Ф. Салиб: проведение экспериментальных исследований и анализ их результатов, проведение расчетов, поиск, анализ и систематизация данных, формирование списка литературы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Murat M. Tamov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Building Structures of Kuban State Technological University (2 Moskovskaya str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), [ORCID](#), murat.tamov@gmail.com

Olga V. Rudenko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Computing Technologies of Kuban State University (149 Stavropol Street, Krasnodar, 350040, Russian Federation), [ORCID](#), olga_ned@mail.ru

Mina I.F. Salib, Engineer of the Department of Building Structures of Kuban State Technological University (2 Moskovskaya str., Krasnodar, 350072, Russian Federation), [ORCID](#), minaibrahim1234@yahoo.com

Claimed Contributorship:

MM Tamov: scientific supervision, development of the main concept, formulation of the research goals and objectives, formulation of conclusions, and text editing.

OV Rudenko: assistance and guidance in using the modeling software and analyzing the results, text preparation.

MIF Salib: conducting experimental research and analyzing the results, performing calculations, searching, analyzing, and systematizing data, compiling the list of references.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 22.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.03.2025

Принята к публикации / Accepted 02.04.2025