

Структура стоимости материалов в ребристых плитах при переменной высоте сечения

В.С. Кузнецов, Ю.А. Шапошникова

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет*

Аннотация: Предложен новый подход к оптимизации ребристых железобетонных плит переменной высоты с предварительным напряжением арматуры. Подход основан на расчетной ситуации, обусловленной требованиями прочности нормальных и наклонных сечений при полном выполнении расчетных и конструктивных требований, с учетом прочностных и стоимостных показателей используемых материалов. В статье изучена оптимизация элементов, которые работают в диапазоне без необходимости установки расчетной сжатой арматуры. Исследование выполнено на основе учета закономерностей сопротивления железобетона и основных положений нормативных документов, регулирующих проектно-конструкторскую деятельность в РФ, а также актуальных трудов отечественных и зарубежных ученых, соответствующих исследованиям данного направления. Использованный метод исследования: структурно-аналитический анализ с использованием корреляционных зависимостей исследуемых факторов. Представлены аналитические зависимости и графические материалы, устанавливающие оптимальные параметры элемента при минимальной стоимости материалов с целью их использования в практике проектирования. Приведены рекомендации по проектированию, обеспечивающие получение конструкции минимальной стоимости и отвечающие требованиям прочности и долговечности.

Ключевые слова: арматура, нормальное сечение, наклонное сечение, оптимизация, преднапряжение, прочность, ребристая плита, стоимость.

Стоимость сборного железобетонного элемента состоит из стоимости материалов: бетона, арматуры, закладных деталей, а также затрат на изготовление элемента. В изделии его составляющие: сталь и бетон, существенно различаются по стоимости, поэтому важно знать, какое соотношение стали и бетона в конструкции наиболее оптимально. Изучение оптимального соотношения компонентов в изделии, для уменьшения его стоимости, является актуальным как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Вопросом оптимальной конструкции железобетонных элементов занимались многие российские и зарубежные ученые. Складнев Н.Н. занимался проблемами оптимального проектирования железобетонных

конструкций с учетом требований надежности, долговечности, технологичности и экономичности [1].

Тамразян А.Г. работал над оптимальным проектированием конструкций исходя из их минимальной стоимости [2], а также над современными методами оптимизации конструктивных решений несущих конструкций, в том числе, с помощью современных генетических алгоритмов [3].

Аксёнов Н.Б., Кузнецов В.С. и другие ученые занимались исследованием влияния отклонений положения рабочей арматуры на прочность и технико-экономические показатели [4-5]. Кузнецов В.С. также занимался решением проблемы выбора оптимальных параметров и изучением структуры стоимости материалов для железобетонных элементов [6-7].

В настоящее время вопросы оптимизации конструкций с учетом надежности и эффективности решают, в том числе, с помощью современных генетических [3, 8] и программных [9-11] алгоритмов.

Железобетонные элементы в Российской Федерации и за рубежом рассчитываются на основе соответствующей нормативной литературы. В Российской Федерации применяются, например, СП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции» и «Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелого бетона». За рубежом применяются такие европейские стандарты, как BS8110 и Еврокод 2.

В настоящем исследовании рассматривалась конструкция железобетонной ребристой плиты, при теоретически требуемых и практически принимаемых количествах арматуры, обеспечивающих прочность изделия и конструктивные требования при различных высотах поперечного сечения элемента. Объем бетона изделия вычислялся по

геометрическим размерам без учета его уменьшения за счет объема арматуры.

Так, стоимость сборной железобетонной плиты элемента C в формуле (1) состоит из стоимости бетона C_b , стоимости арматуры C_s и расходов на изготовление C_u . В данной работе расходы на изготовление C_u не учитывались.

$$C = C_b + C_a \quad (1)$$

Стоимость бетона определяется по формуле (2):

$$C_b = C_b V_b, \quad (2)$$

где V_b - объем изделия; C_b - цена кубометра бетона.

В общем случае, стоимость арматуры C_s плиты складывается из стоимости напрягаемой арматуры (C_{sp}), стоимости продольных стержней каркаса К1 (C_{s1}), стоимости поперечных стержней каркаса К1 (C_{s2}), стоимости поперечных стержней каркаса К2 (C_{s2}), стоимости продольных стержней каркаса К2 (C_{s3}), стоимости продольных стержней сетки С1 (C_{s4}), стоимости поперечных стержней сетки С1 (C_{s5}), стоимости продольных стержней сетки С2 (C_{s6}), стоимости поперечных стержней сетки С2 (C_{s7}), стоимости продольных стержней сетки С3 (C_{s8}), стоимости поперечных стержней сетки С3 (C_{s9}), стоимости опорных закладных деталей (C_{s10}) и может выражаться формулой (3).

$$C_s = \sum C_{si} = C_{s1} + C_{s2} + \dots + C_{s10} \quad (3)$$

Стоимость арматуры определяется ее количеством, выраженным через вес или погонаж, и ценой арматуры, сложившейся в регионе на момент исследования.

В качестве объекта исследования рассматривались ребристые плиты перекрытий с предварительным напряжением арматуры и торцовыми поперечными ребрами. Плиты загружались расчетной равномерно распределенной нагрузкой $v=7,2$ кН/м². Конструктивная длина $l=5,68$ м,

расчетный пролет $l_0=5,54$ м, ширина сечения b , ширина плиты по верху b_f' , высота плиты h , рабочая высота сечения h_0 (рис.1). Класс бетона В25 с расчетным сопротивлением бетона сжатию R_b и растяжению R_{bt} , продольная напрягаемая арматура класса А800, поперечная А240 и В500. Высота плиты варьировалась от 20 до 30 см, через 2,5 см. Основные размеры и армирование плиты показаны на рис.1.

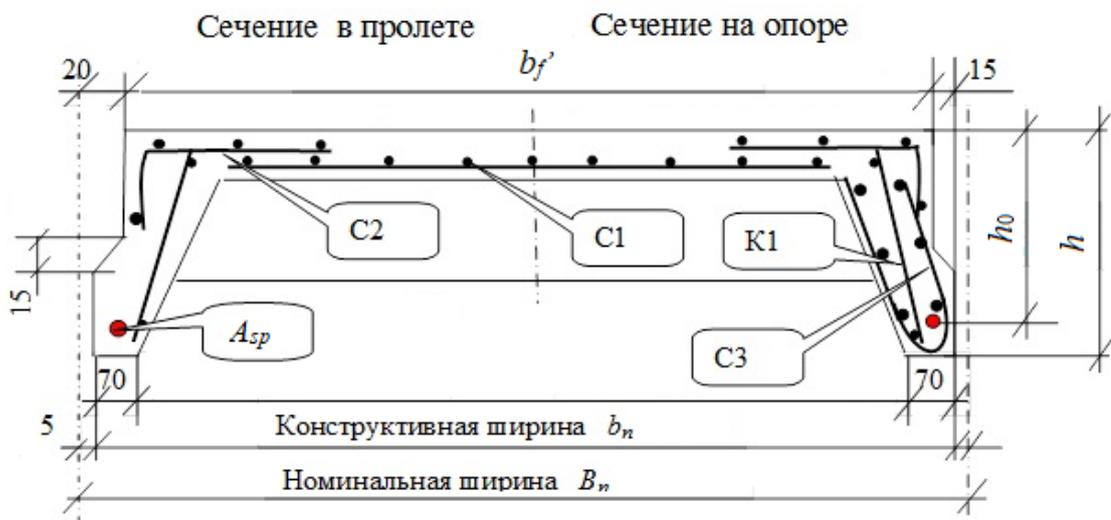


Рис. 1. – Поперечный разрез ребристой плиты перекрытия

Цена бетона и арматуры различных классов устанавливалась на основе изучения рынка продаж арматуры в центральном регионе и в расчетах принималась: для арматуры А400 - 30 тыс. руб./т и для бетона В25 - 6 тыс. руб./м³. Учет различия в ценах арматуры корректировался применением поправочных ценовых коэффициентов. В качестве базовой принята цена арматуры А400 и ценовой коэффициент $k_1=1,0$, для арматуры А800 - $k_2=1,1$ для А240 - $k_3=0,80$, для В500 - $k_4=0,80$. Еще большее уточнение цен на арматуру оставляет возможность получить более достоверные результаты.

Стоимость арматуры в изделии C_s определялась ее ценой C_s и количеством в весовом выражении γV_s в соответствии с формулой (4).

$$C_s = C_s \gamma V_s = k_i C_s G_s \quad (4)$$

Или, более подробно, в соответствии с формулой (5):

$$C_s = k_i \sigma_s G_{s1} + k_i \sigma_s G_{s2} + k_i \sigma_s G_{s3} + k_i \sigma_s G_{s4} + k_i \sigma_s G_{s5} + k_i \sigma_s G_{s6} + k_i \sigma_s G_{s7} + k_i \sigma_s G_{s8} + k_i \sigma_s G_{s9} + k_i \sigma_s G_{s10} \quad (5)$$

Количество напрягаемой продольной арматуры определялось расчетной площадью поперечного сечения арматуры A_{sp} , умноженной на конструктивную длину элемента l .

Расчетная площадь продольной напрягаемой арматуры определялась для расчетных ситуаций в нормальных сечениях, при соблюдении условия $\xi \leq \xi_R$, с учетом работы высокопрочной арматуры выше условного предела текучести, в соответствии с требованиями нормативной литературы из выражения (6).

$$A_s = \frac{R_b b h_0 (1 - \sqrt{1 - 2\alpha_m})}{R_s} \quad (6)$$

Количество ненапрягаемой продольной арматуры определялось расчетной площадью поперечного сечения арматуры A_s , умноженной на конструктивную длину элемента l , минус 20 мм. Расчетная площадь продольной ненапрягаемой арматуры определялась для расчетных ситуаций при соблюдении условия $\xi \leq \xi_R$, основываясь на выражении (8), или принималась по конструктивным требованиям.

Количество поперечной арматуры определяется расчетной площадью поперечных стержней, их количеством и длиной, равной высоте сечения минус 20 мм в соответствии с известными выражениями (7) -(11). Расчетная площадь поперечных стержней определялась в соответствии с нормативной литературой, без рассмотрения вариантов расположения наклонных сечений.

$$Q \leq Q_{b1} + Q_{aw,1}, \quad (7)$$

Здесь

$$Q_{b1} = 0,5 R_{bt} b h_0 \quad (8)$$

$$Q_{aw1} = Q - Q_{b1} \quad (9)$$

$$Q_{aw1} = q_{aw} h_0 \quad (10)$$

$$q_{aw} = R_{aw} A_{aw} / s \quad (11)$$

Принимая шаг поперечных стержней s по конструктивным требованиям, и вычисляя интенсивность погонной нагрузки q_{aw} , определялась расчетная площадь поперечной арматуры A_{aw} по формуле (12).

$$A_{aw} = Q_{aw} s / h_0 R_{aw} \quad (12)$$

Расход конструктивной арматуры, обусловленный требованиями норм, определялся расчетной площадью стержней, их количеством и длиной равной ширине сечения минус 20 мм.

Расчеты прочности плиты по нормальным и наклонным сечениям выполнялись с помощью электронных таблиц *Exel*. Цены на арматуру определялись для московского региона и принимались средними, исходя из цен, представленных несколькими поставщиками.

Структура относительной стоимости арматуры, приведенная к расходу арматуры для плиты высотой 300 мм, представлена на рис.2.

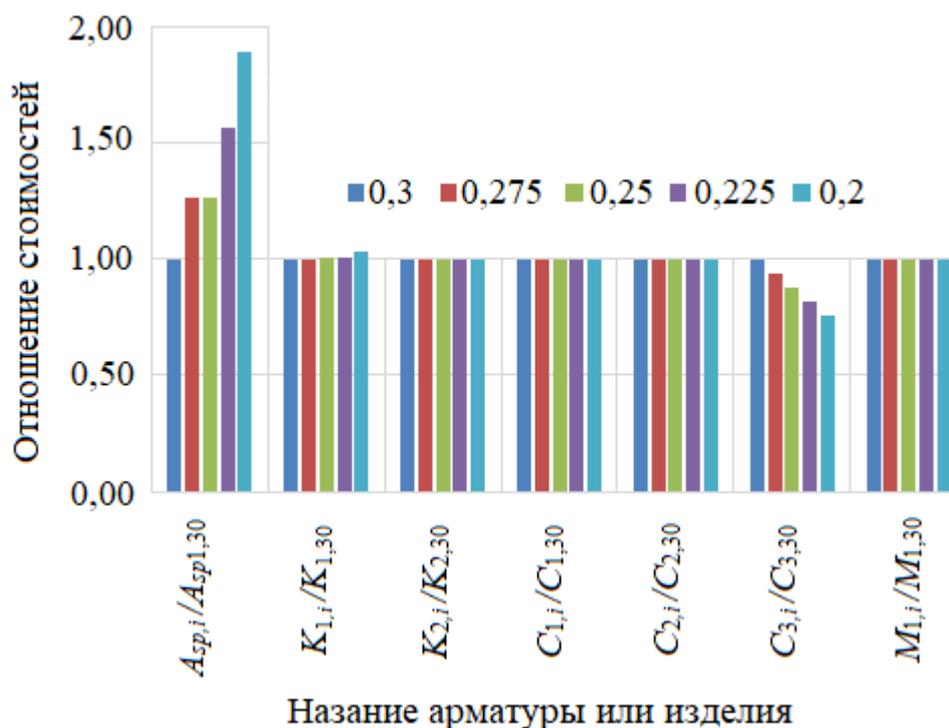


Рис. 2. – Структура относительной стоимости арматуры в плите

Диаграмма показывает, что уменьшение высоты плиты в 1,5 раза существенно влияет на прирост количества и, соответственно, стоимости высокопрочной арматуры ($A_{sp,i}/A_{sp1,30}$) и составляет 1,89.

Для каркасов продольных ребер ($K_{1,i}/K_{1,30}$) увеличение расхода и стоимости арматуры незначительно и составляет 1,03. Очевидно, что стоимость сеток С1 и С2 и каркаса торцового ребра К2 остается постоянной, то есть не зависит от высоты плиты, а зависит только от ширины и действующих нагрузок.

На рис.3 представлены графики относительной стоимости отдельных арматурных изделий.

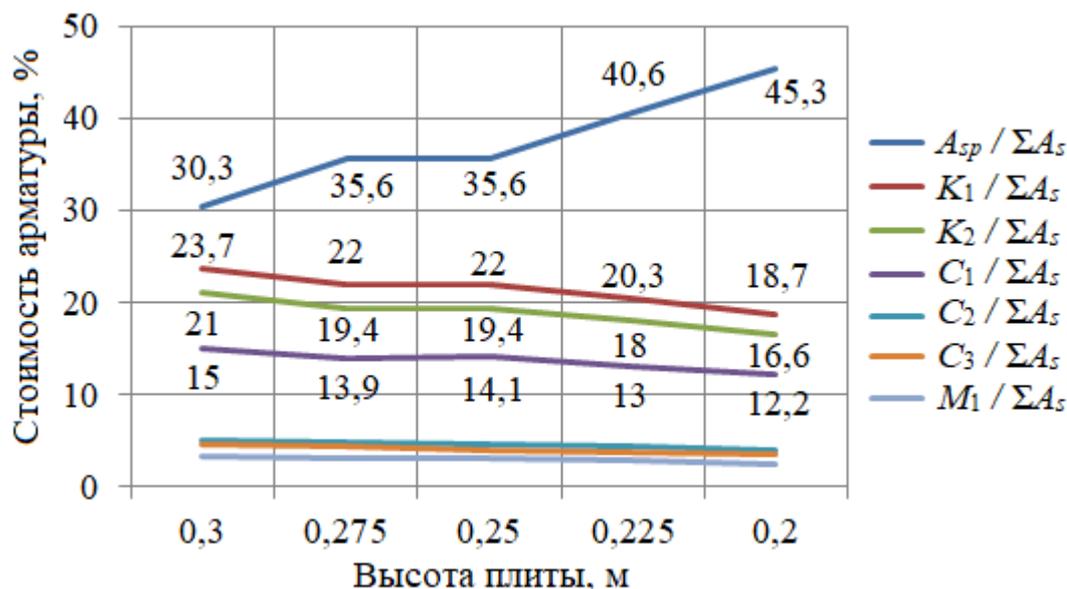


Рис. 3. – Относительная стоимость отдельных арматурных изделий

Графики на рис.3 показывают, что доля преднапряженной арматуры в структуре стоимости всей арматуры ребристой плиты увеличивается по мере уменьшения высоты плиты с 30,3% до 45,3%, доля арматуры каркаса К1 снижается с 21,0% до 16,6%.

Для сеток С1 снижение составляет 23,7% до 18,7%, а для С2 с 21,0% до 16,6%.

Очевидно, что мероприятия по уменьшению стоимости плиты должны быть направлены в первую очередь на снижение стоимости напрягаемой арматуры.

На рис.4 представлены графики соотношения стоимостей арматуры и бетона в плите в %.

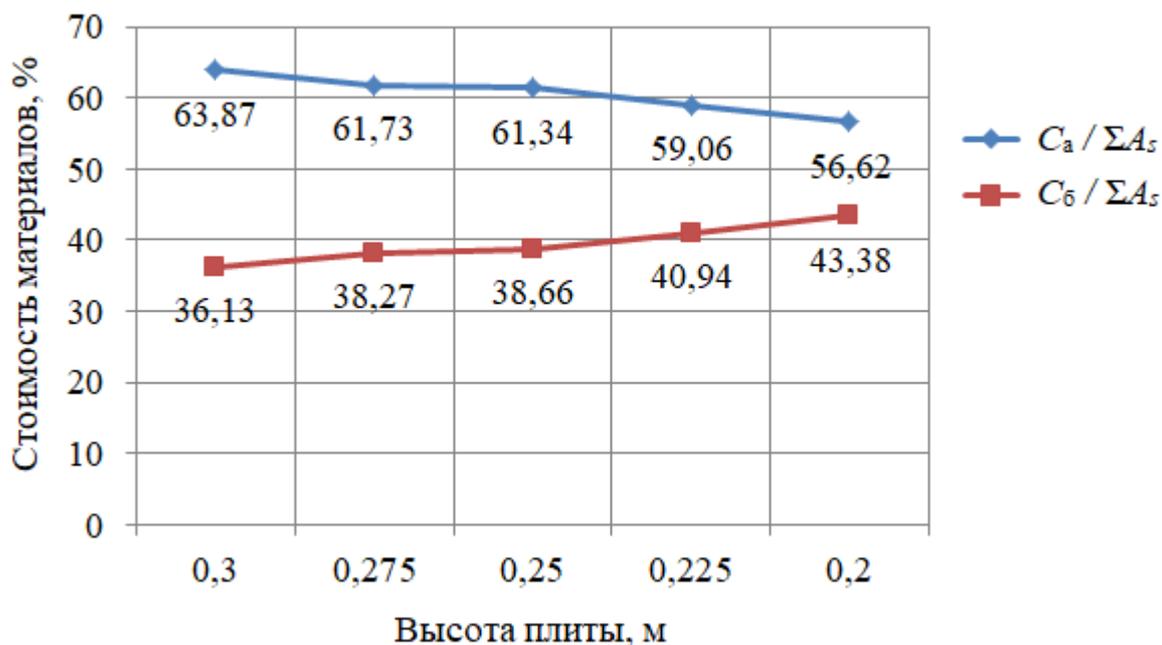


Рис. 4. – Соотношение стоимостей арматуры и бетона в плите в %

На рис.4 представлены графики, показывающие соотношение стоимости бетона и арматуры в ребристой плите при изменении высоты с 0,2 м до 0,3 м. Общим трендом является увеличение стоимости арматуры и снижение стоимости бетона при уменьшении высоты плиты. Так, уменьшение высоты плиты в 1,5 раза с 300 до 200 мм приводит к увеличению стоимости арматуры и уменьшению стоимости бетона на 7,2%.

Проведенные исследования предоставляют возможность на стадии проектирования определить направления снижения стоимости изделия и обосновать выбор путем рационального назначения высоты плиты, а также вариативного применения бетонов и арматуры различных классов.

Литература

1. Складнев Н.Н. Оптимальное проектирование железобетонных конструкций с учетом требований экономичности, технологичности, надежности, долговечности: диссертация доктора технических наук: 05.23.01. Москва, 1979, 354 с.

2. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. Оптимальное проектирование железобетонных плит перекрытий по критерию минимальной стоимости // Сборник трудов «Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия». Международная научная конференция, посвященная 85-летию кафедры железобетонных и каменных конструкций и 100-летию со дня рождения Н.Н. Попова, Москва, 2016, с. 424-433.

3. Коновалова О.О., Тамразян А.Г. К оптимизации проектных параметров ребристых плит перекрытий, опертых по контуру, с использованием генетических алгоритмов // Молодёжные инновации. Сборник материалов семинара молодых учёных в рамках XXIII Международной научной конференции «Строительство - формирование среды жизнедеятельности», Ханой, 2020, с. 127-132.

4. Аксёнов Н.Б., Задорожная А.В., Трофимова В.М., Синицина Т.В., Назаров А.В. Исследование влияния отклонений положения рабочей арматуры от проектного на прочность безбалочных перекрытий // Инженерный вестник Дона, 2018, №2 URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_113_Aksionov.pdf_91646016dd.pdf.

5. Кузнецов В.С., Шапошникова Ю.А. Влияние некоторых нормативных допусков на технико-экономические показатели железобетонных элементов в строительстве // Инженерный вестник Дона, 2021, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6859.

6. Kuznetsov V., Shaposhnikova Yu., Yandiev A. Selection of the optimal parameters of a reinforced concrete rectangular beam with single reinforcement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE), Volume 962, «ICCATS 2020», Sochi, Russia, 2020 URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/962/2/022055.

7. Kuznetsov V., Shaposhnikova Yu. The structure of the content and cost of materials in bending reinforced concrete element with variable section height // Lecture Notes in Civil Engineering Q4. Springer. Volume 151 of the Lecture Notes in Civil Engineering series. International Scientific Conference on Innovations and Technologies in Construction. «BuildInTech BIT 2021», 2021, pp. 181-187 URL: link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-72910-3_26.

8. Coello C., Hernandez F. and Farrera F. Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms // Expert Systems with Applications, 1997, №12(1), pp. 101-108.

9. Yeh J.P. and Yang R.P. Optimal design of continuous reinforced concrete beams using neural networks // Transactions on Machine Learning and Artificial Intelligence, 2015, №3 (4), pp. 1-15.

10. Chakrabarty B.K. Models for optimal design of reinforced concrete beams // Computers and Structures, 1992, №42(3), pp. 447-451.

11. Guerra A. and Kiousis P. Design optimization of reinforced concrete structures // Comput. Concrete, 2006, №3(5), pp. 313-334.

References

1. Skladnev N. Optimal'noe proektirovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy s uchetom trebovaniy ekonomichnosti, tekhnologichnosti, nadezhnosti, dolgovechnosti: dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk: 05.23.01 [Optimal design of reinforced concrete structures taking into account the requirements of profitability, manufacturability, reliability, durability, dissertation, Doctor of technical sciences: 05.23.01]. Moskva, 1979, 354 p.

2. Tamrazyan A.G., Filimonova E.A. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya, posvyashchennaya 85-letiyu kafedry zhelezobetonnykh i kamennykh konstruktsiy i 100-letiyu so dnya rozhdeniya N.N. Popova. Moskva, 2016, pp. 424-433.

3. Konovalova O.O., Tamrazyan A.G. Molodezhnye innovatsii. Sbornik materialov seminara molodykh uchenykh v ramkakh XXIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Stroitel'stvo - formirovanie sredy zhiznedeyatel'nosti». Hanoi, 2020, pp. 127-132.

4. Aksenov N.B., Zadorozhnaya A.V., Trofimova V.M., Sinitsina T.V., Nazarov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_113_Aksionov.pdf_91646016dd.pdf.

5. Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Yu.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6859.

6. Kuznetsov V., Shaposhnikova Yu., Yandiev A. Selection of the optimal parameters of a reinforced concrete rectangular beam with single reinforcement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE), Volume 962, «ICCATS 2020», Sochi, Russia, 2020. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/962/2/022055.

7. Kuznetsov V., Shaposhnikova Yu. Volume 151 of the Lecture Notes in Civil Engineering series. International Scientific Conference on Innovations and Technologies in Construction. «BuildInTech BIT 2021», 2021, pp. 181-187. URL: link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-030-72910-3_26.

8. Coello C., Hernandez F. and Farrera F. Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms. Expert Systems with Applications, 1997, №12(1), pp. 101-108.

9. Yeh J.P. and Yang R.P. Transactions on Machine Learning and Artificial Intelligence, 2015, №3(4), pp. 1-15.



10. Chakrabarty B.K. Computers and Structures, 1992, №42(3), pp. 447-451.
11. Guerra A. and Kiouisis P. Comput. Concrete, 2006, №3(5), pp. 313-334.