

К вопросу моделирования преднапряжённой стальной балки с перфорированной стенкой

А.А. Чебровский, А.А. Иодчик.

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

Аннотация: Предложена новая строительная конструкция - стальная сварная двутавровая балка с преднапряженной перфорированной стенкой. Преднапряжение в балке создается с помощью вытягивания стенки и последующей сварки с поясами. До преднапряжения в стенке вырезаются отверстия. С применением программного комплекса ЛИРА-САПР, предложена модель, которую можно использовать для исследования работы конструкции преднапряженной перфорированной балки (ПНПБ). Исследуется влияние различной формы пустот в стенке на изменение напряженно-деформированного состояния стальных двутавровых балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки. Проведена предварительная оценка о благоприятном влиянии создания преднапряжения в обычной перфорированной балке на напряженно-деформированное состояние балок с разной формой перфораций в стенке.

Ключевые слова: стальные конструкции, предварительное напряжение, численный эксперимент, нормальные и касательные напряжения, несущая способность

Актуальным направлением в строительстве является создание новых и совершенствование существующих конфигураций строительных конструкций с целью снижения массы, стоимости конструкций и сокращения сроков строительства. Широкое распространение получили стальные балки с перфорациями стенки в виде шестиугольных и круглых вырезов. Применяются в качестве балок перекрытий, где отверстия используются для пропуска коммуникаций. Двутавры с перфорированной стенкой обеспечивают 20-30% экономии металла по сравнению с прокатными двутаврами [1]. Сравнительным анализом эффективности перфорированных балок занимаются многие отечественные специалисты [2], а кроме того, совершенствованием их конструктивной формы, и также особенностями расчета [3, 4]. Исследования в области конечно-элементного моделирования и анализа конструкций балок со сплошной и перфорированной стенкой также сохраняют актуальность [5, 6]. Для иностранных исследователей вопрос работы перфорированных балок также актуален. Это подтверждают

экспериментальные исследования на Н-образных балках из высокопрочной стали с перфорированной стенкой [7], исследования в области оптимизация новых эллиптических форм отверстий в стенках перфорированных стальных балок [8] и расчеты сопротивления продольному изгибу стальных двутавровых балок с синусоидальными проемами в стенках [9]. В настоящий момент внимание авторов статьи направлено на развитие теории расчета и методики проектирования балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки, в том числе, разработку теории расчета напряженного состояния тонкостенных металлических балок с одновременно преднапряженной и перфорированной стенкой (ПНПБ). В отечественных и зарубежных стандартах нет пока решений для определения напряженного состояния указанных конструкций.

Предложен новый вид металлических балок, позволяющий решить технико-экономическую проблему повышения несущей способности строительных конструкций при снижении их массы.

Определим перспективу влияния предварительного напряжения на изменение геометрических размеров сечения балки по сравнению с обычной. Толщину стенки обычной балки t_w получим через уравнение касательных напряжений:

$$t_w = \frac{Q_{zy,\max} S_z}{\tau_{zy,\max} I_z} = \frac{3\sqrt{3}Q_{zy,\max}}{R_y h} \cdot \frac{K(2 - \gamma_w)}{(6K - \gamma_w (K + 1)^2)}; \quad (1)$$

K - коэффициент асимметрии двутавра;

Площадь стенки балки:

$$A_w = \frac{3\sqrt{3}Q_{zy,\max}}{R_y} \cdot \frac{K(2 - \gamma_w)}{(6K - \gamma_w (K + 1)^2)}. \quad (2)$$

Касательное усилие у торца:

$$t_{\max} = -N_0 \lambda \left(\frac{K_0 - 1}{K_0 + 1} \right) th \lambda l = -R_y A_w \lambda \left(\frac{K_0 - 1}{K_0 + 1} \right) th \lambda l. \quad (3)$$

Условие касательных напряжений в преднапряженной балке:

$$\tau_{\max} = \tau_{pr,\max} + \tau_{zy,\max}$$

Тогда:

$$\frac{\sqrt{3}R_y}{3} = \frac{3Q_{zy,\max}}{A} \cdot \frac{K(2-\gamma_w)}{\gamma_w(6K-\gamma_w(K+1))^2} - \frac{R_y A_w \lambda h}{A} \left(\frac{K_0-1}{K_0+1} \right) th \lambda l \cdot \frac{K(2-K)}{(4K-\gamma_w(K+1))(K+1)}, \quad (4)$$

Коэффициент λ определяется выражением:

$$\lambda = \sqrt{\frac{1}{8A_0(1+\nu)} \left(\frac{(K_0+1)^2(7K_0-5)}{(2K_0-1)(K_0-1)} \right)}$$

В итоге получим:

$$\frac{3\sqrt{3}Q_{zy,\max}}{A_w R_y} \cdot \frac{K(2-\gamma_w)}{(6K-\gamma_w(K+1))^2} = 1 + \sqrt{\frac{3\gamma_w^3 n_w}{4(1+\nu)}} \times \sqrt{\frac{K^2(2-K)^2(2K-\gamma_w(K+1))(14K-5\gamma_w(K+1))}{(K+1)(2K+\gamma_w(K+1))(4K-\gamma_w(K+1))^3}}. \quad (5)$$

Высота стенки балки с преднапряжением $h_{w,pr}$:

$$h_{w,pr} = \frac{3\sqrt{3}Q_{zy,\max} K(2-\gamma_w)}{R_y h(6K-\gamma_w(K+1))^2} \div \left[1 + \sqrt{\frac{3\gamma_w^3 n_w K^2(2-K)^2(2K-\gamma_w(K+1))(14K-5\gamma_w(K+1))}{4(1+\nu)(K+1)(2K+\gamma_w(K+1))(4K-\gamma_w(K+1))^3}} \right]. \quad (6)$$

Отношение высот стенки балки с преднапряжением $h_{w,pr}$ и обычной h_w :

$$\frac{h_{w,pr}}{h_w} = \left[1 + \sqrt{\frac{3\gamma_w^3 n_w K^2(2-K)^2(2K-\gamma_w(K+1))(14K-5\gamma_w(K+1))}{4(1+\nu)(K+1)(2K+\gamma_w(K+1))(4K-\gamma_w(K+1))^3}} \right]^{-1}. \quad (7)$$

Таким образом, благодаря преднапряжению возможно уменьшить высоту стенки в опорной зоне балки на величину α_{pr} , тогда:

$$h_{w,pr} = \frac{h_w}{1 + \alpha_{pr}}. \quad (8)$$

Оценим эффект преднапряжения на работу перфорированных балок на примере модели в программном комплексе Lira SAPR. Был поставлен численный эксперимент по расчету балки преднапряженной вытяжкой стенки. На стадии изготовления стенка балки вытягивается до расчетного сопротивления материала стенки. В вытянутом состоянии к стенке присоединяется верхний «анкерный» пояс и усилия преднапряжения снимаются [10]. Эпюра нормальных преднапряжений представлена на рис. 1.

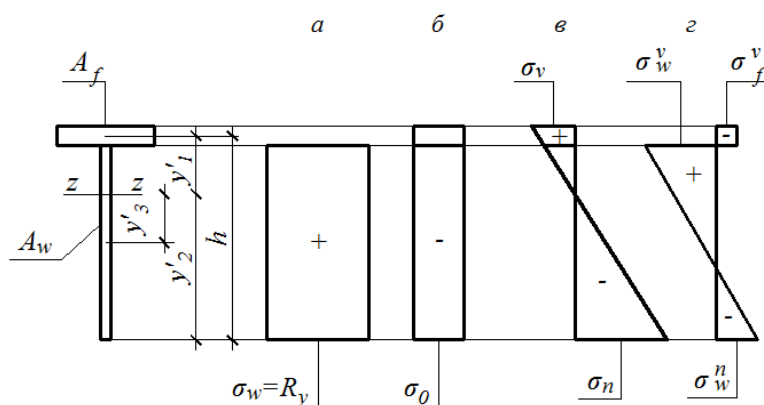


Рис. 1. – Эпюра преднапряжений до приложения внешней нагрузки

Принята балка длиной 156см с перфорацией стенки в один ряд (рис. 2).

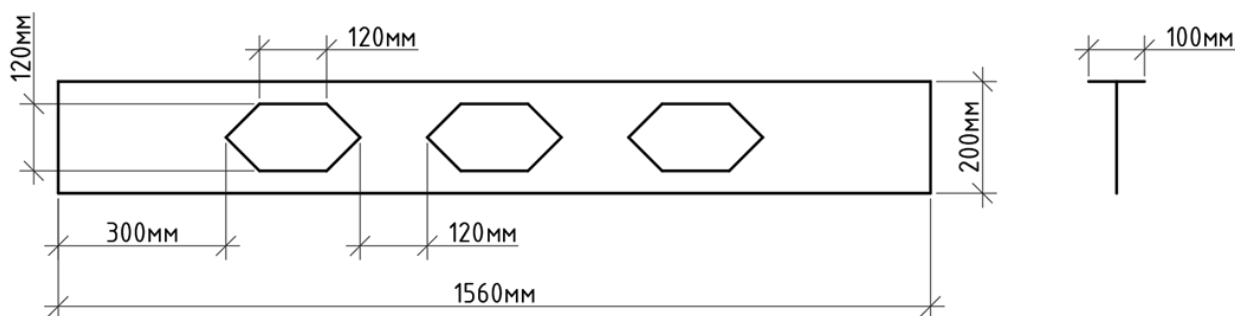


Рис. 2. – Габаритные размеры балки

Кроме того, были рассмотрены балки, в которых пустоты размещены ниже и выше относительно центрального положения (рис.3).

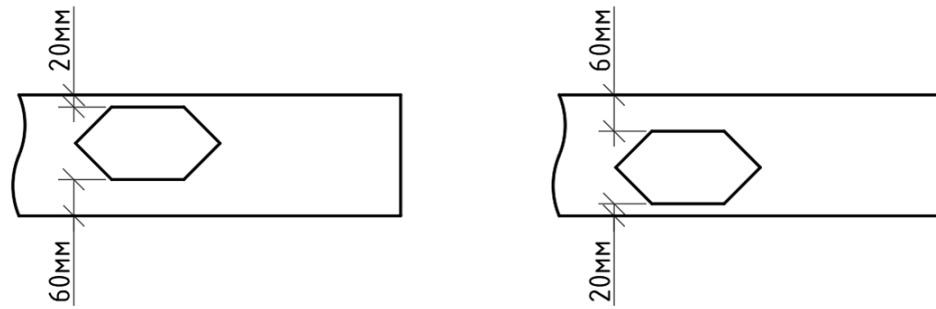


Рис. 3. – Альтернативное положение пустот

В процессе моделирования балка разбивалась на четырехузловые конечные элементы, затем к верхнему и нижнему поясу прикладывается нагрузка в виде температурного воздействия T_{fv} , чтобы (рис. 4):

$$\varepsilon_q = \varepsilon_T \quad (9)$$

где ε_q - относительные деформации от силового воздействия на двутавр,

ε_T - относительные температурные деформации в соответствующих элементах верхней и нижней пластинки.

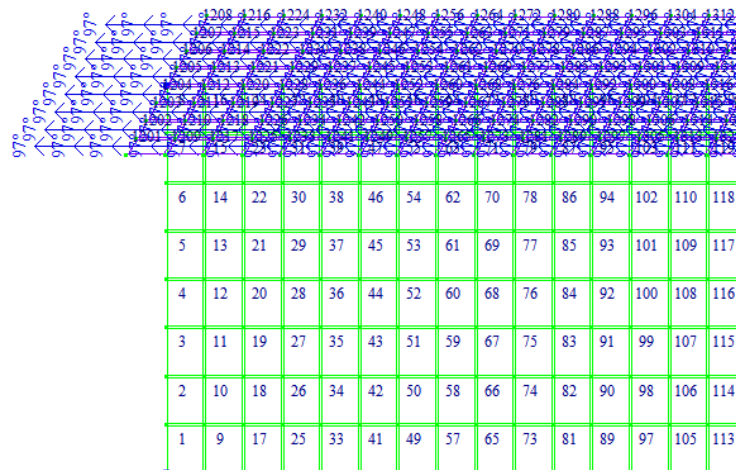


Рис. 4. – Загрузка балки температурной нагрузкой

Температура необходимая для преднапряжения:

$$T_{fv} = \frac{R_y}{E\alpha} = 97^\circ C \quad (10)$$

Выполнены модели двух типов (рис. 5). Балки без перфорации представлены для наглядного сравнения работы конструкции с перфорацией и без неё.

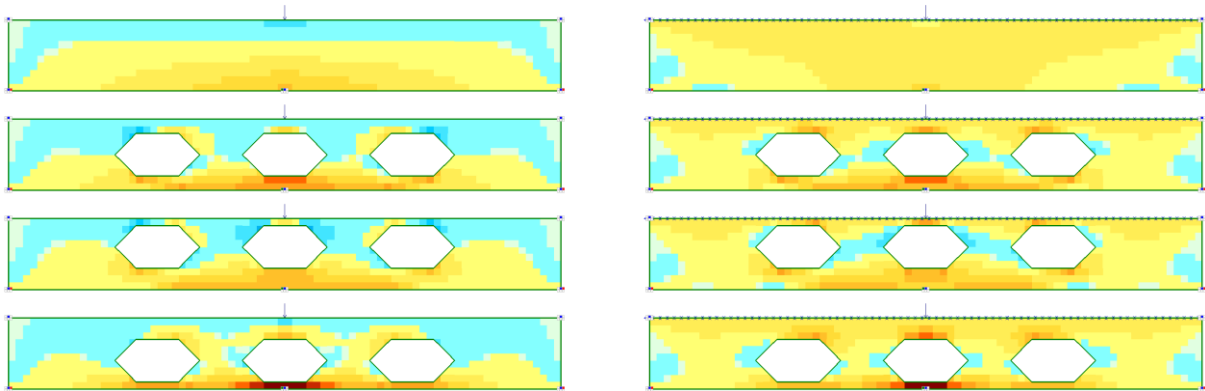


Рис. 5. – Напряжения N_x от сосредоточенной внешней нагрузке (слева: без преднапряжения; справа – с преднапряжением)

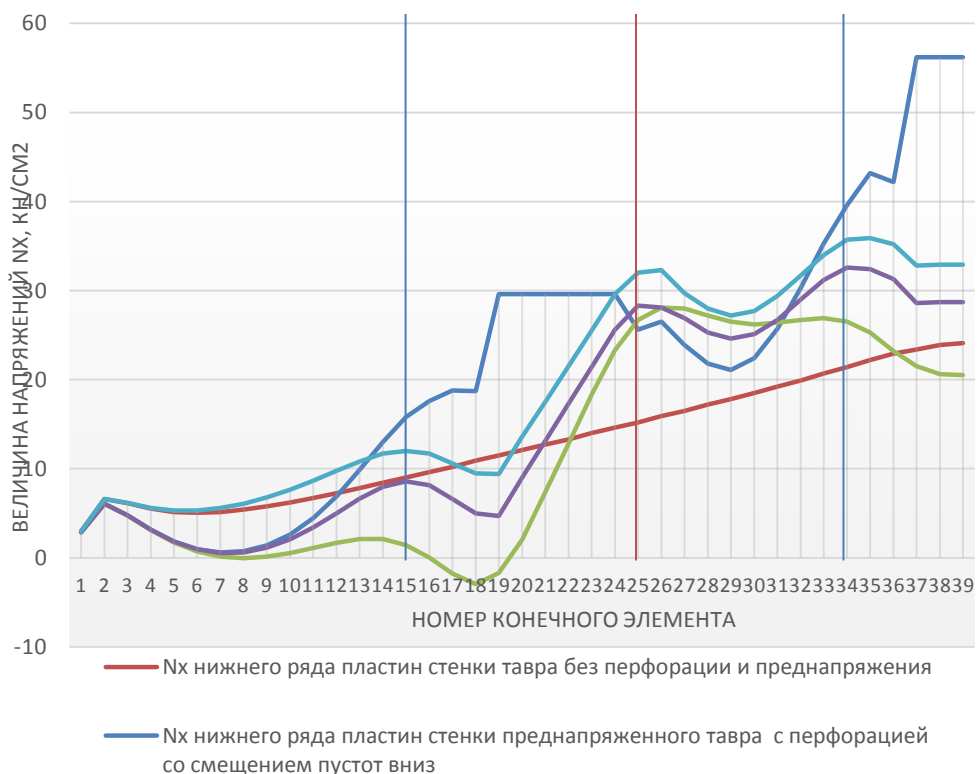


Рис.6. – Распределение напряжений по нижней границе

Для оценки влияния преднапряжения на работу перфорированной балки приведены данные о распределении напряжений N_x в нижней (рис. 6) и верхней (рис. 7) границах стенки преднапряженного тавра от сосредоточенной нагрузки. Приведено сравнение с тавром без перфорации.

Распределение напряжений в тавре с перфорированной стенкой имеет неравномерный характер, а в тавре без перфорации график изменяется равномерно. Модели со смещением пустот вверх и вниз занимают крайние позиции на графике. Напряжения в преднапряженной перфорированной балке (ПНПБ) ниже, чем в балке без преднапряжения.

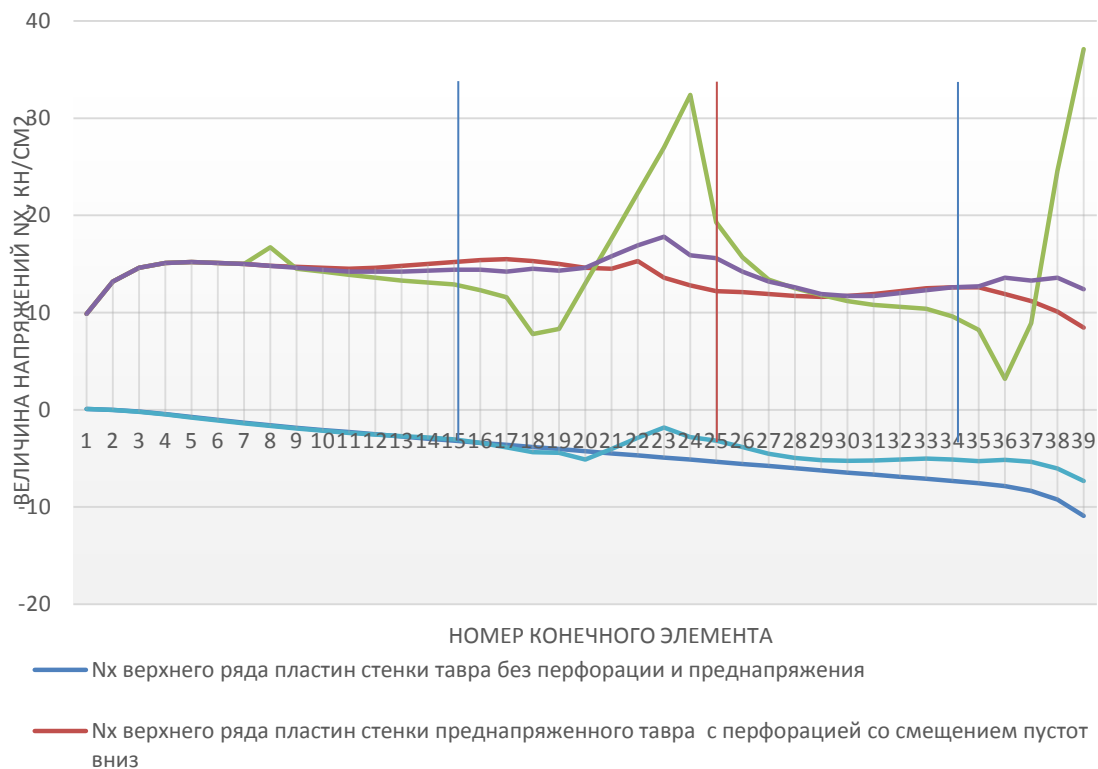


Рис. 7. – Распределение напряжений по верхней границе

Прогибы балки показаны на рис. 8. Для балки с преднапряжением характерны меньшие перемещения, чем для балки без преднапряжения.

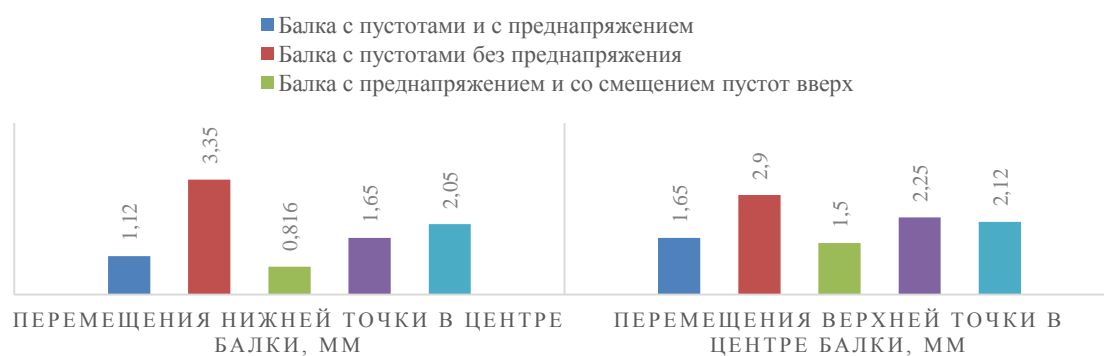


Рис. 8. – Прогибы балки от сосредоточенной нагрузки

Заключение. Численная модель балки позволила сравнить разные конструкции в пределах одного рабочего нагружения. По результатам, полученным в данной работе, можно сделать вывод о благоприятном влиянии создания преднапряжения в обычной перфорированной балке. Проведенное исследование преднапряженных перфорированных конструкций позволяет в будущем рассмотреть новые подходы по оценке их прочности и местной устойчивости, а также в перспективе дать возможность объективно определять несущую способность с учетом особенностей напряженного состояния, параметров разрезки и геометрической формы стенки.

Литература

1. Евдокимцев, О.В. Проектирование и расчет стальных балочных клеток: учеб. пособие. Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 136 с.
2. Новикова, М.А. Сравнительный анализ сварной балки постоянного сечения и перфорированной балки // XI Всероссийский Фестиваль науки : Сборник докладов, Нижний Новгород, 20–21 октября 2021 года. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. С. 187-190.

3. Бузало Н.А. Исследования сжатых перфорированных стоек и совершенствование их конструктивной формы // Инженерный вестник Дона. 2009. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2009/129.
4. Притыкин, А.И. Особенности расчета перфорированных балок МКЭ // Известия КГТУ. 2016. № 43. С. 249-259.
5. Сорокина Е.Н. Анализ результатов численного моделирования конструкций пролетного строения // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/ N2y2020/6332.
6. Притыкин, А.И. Конечноэлементный анализ общей устойчивости балок со сплошной и перфорированной стенкой // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 3(302). С. 55-60.
7. Feng, Ran. Experiments on H-shaped high-strength steel beams with perforated // Engineering Structures. Volume 177, 2018, pp. 374-394.
8. Tsavdaridis, K.D. Optimisation of novel elliptically-based web opening shapes of perforated steel beams // Journal of Constructional Steel Research. Volume 76, 2012. pp. 39-53.
9. Carvalho, A.S. New formulas for predicting the lateral–torsional buckling strength of steel I-beams with sinusoidal web openings // Thin-Walled Structures. Volume 181, 2022. pp. 127-148.
10. Чебровский, А.А. Совершенствование методики расчета стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Улан-Удэ, 2015. 22 с.

References

1. Evdokimcev, O.V. Proektirovanie i raschet stal'nyh balochnykh kletok: ucheb. gosobie [Design and calculation of steel beams]. Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2005. 136 p.
-



2. Novikova, M.A. XI Vserossijskij Festival' nauki: Sbornik dokladov, Nizhnij Novgorod, 20–21 oktyabrya 2021 goda. Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet, 2021. pp. 187-190.
3. Buzalo N.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2009. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2009/129.
4. Pritykin, A.I. Izvestiya KGTU. 2016. № 43. pp. 249-259.
5. Sorokina, E.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2020/6332.
6. Pritykin, A.I. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij. 2022. № 3(302). pp. 55-60.
7. Feng, R. Engineering Structures. Volume 177, 2018, pp. 374-394.
8. Tsavdaridis, K.D. Journal of Constructional Steel Research. Volume 76, 2012. pp. 39-53.
9. Carvalho, A.S. Thin-Walled Structures. Volume 181, 2022. pp. 127-148.
10. Chebrovskij, A.A. Sovershenstvovanie metodiki rascheta stal'nyh balok, predvaritel'no napryazhennyh vytyazhkoj stenki: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Improving the method for calculating steel beams prestressed by stretching a wall]. Ulan-Ude, 2015. 22 p.