

Численное моделирование стальной балки, усиленной методом изменения изгибной жесткости

А.А. Чебровский

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

Аннотация: Статья содержит результаты анализа напряжений в опасных сечениях однопролетной стальной балки коробчатого сечения, выполненной из двух швеллеров, усиленной двумя металлическими полосами, приваренными вверху и внизу между швеллерами, при разных геометрических характеристиках элементов усиления. Представлены результаты проведенного численного эксперимента усиленных балок. По результатам численного эксперимента установлено, что выравнивание напряжений в опасных сечениях позволяет уменьшить материалоемкость конструкции по сравнению с балками, подобранными по сортаменту по требуемому моменту сопротивления.

Ключевые слова: стальная балка, несущая способность, напряжения, перемещения, метод конечных элементов, усиление конструкций.

Необходимость усиления строительных конструкций в процессе эксплуатации возникает не только при реконструкции и техническом перевооружении предприятий, но и вследствие ошибок при проектировании, преждевременного коррозионного или механического их износа, в результате усложнений или не предусмотренных проектом изменений условий технологического процесса производства, накоплением различных дефектов и повреждений и т.п. Повышенный интерес автора статьи к исследованию стальных конструкций и отдельных элементов, усиленных до загрузки под нагрузкой вызывают работы отечественных ученых [1-3], а также рекомендации по проектированию и приближенным методам расчёта усиления стальных конструкций, указанные в работах [4, 5].

В рамках работы предлагается рассмотреть две балки с разными расчетными схемами.

1. Балка, один конец которой жестко зашцеplen, а другой шарнирно оперт. Балка изготовлена из стали С245, выполнена из двух швеллеров №33П пролетом 6 м. Расстояние между швеллерами 250 мм. Конечно-элементная

модель балки представлена на рисунке 1. Балка нагружена равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью $q=108$ кН/м. Принятые жесткостные характеристики элементов приведены в таблице 1.

Расчет балок производился в ПК ЛИРА-САПР - многофункциональный программный комплекс для проектирования и расчета строительных конструкций различного назначения. Реализованный метод расчета - метод конечных элементов (МКЭ), благодаря которому у современной науки есть предложения по анализу работы стальных балок со значительным разнообразием форм и сечений, например [6, 7], в том числе иностранные исследования [8-10]. Результаты представлены на рисунках 2-7.

Таблица 1. Жесткостные характеристики элементов

Имя	Комментарий	$E(E1)$, кН/см ²	$V12(V)$	H , мм
Пластина Н 1.1	Полка швеллера	20600	0,28	11
Пластина Н 0.7	Стенка швеллера	20600	0,28	7
Пластина Н 0.7	Ребра жесткости	20600	0,28	7
Пластина Н 2.2	Пластины усиления	20600	0,28	23

Зеруаки 1

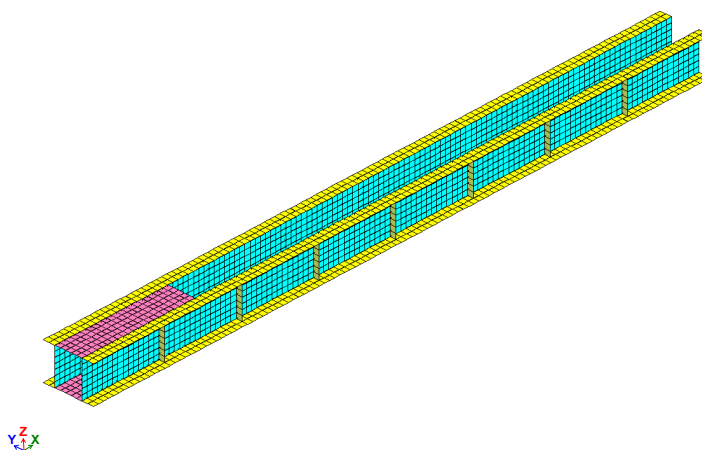


Рис. 1. Конечно-элементная модель балки

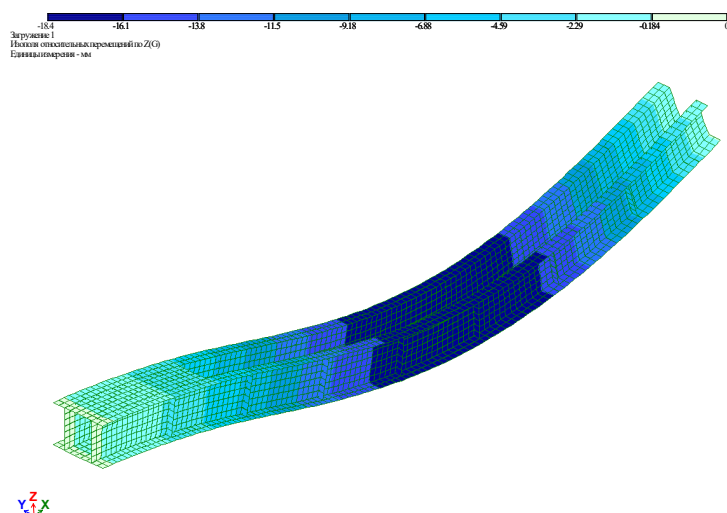


Рис. 2. Изополю относительных перемещений по Z, мм

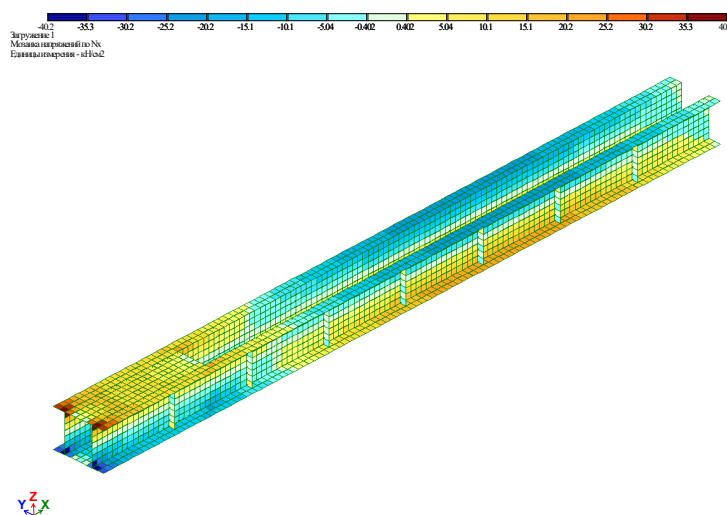


Рис. 3. Мозаика напряжений N_x , кН/см^2

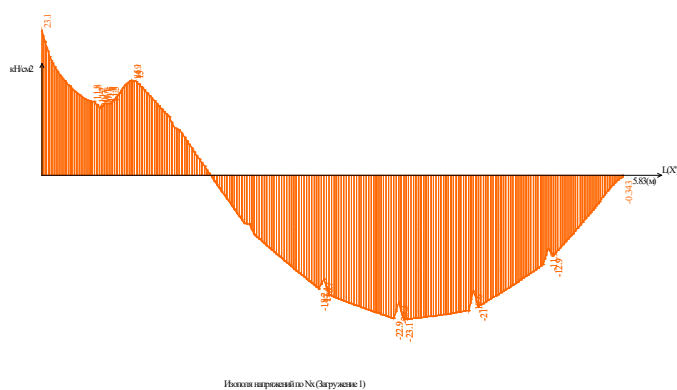


Рис. 4. Эпюра напряжений N_x в верхней полке, кН/см^2

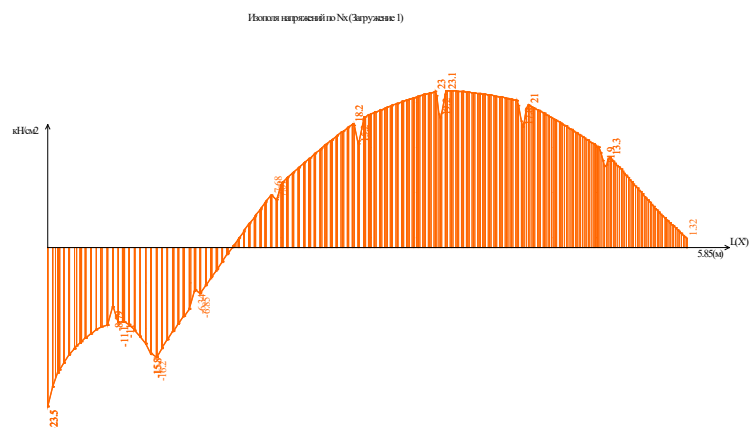


Рис. 5. Эпюра напряжений N_x в нижней полке, кН/см^2

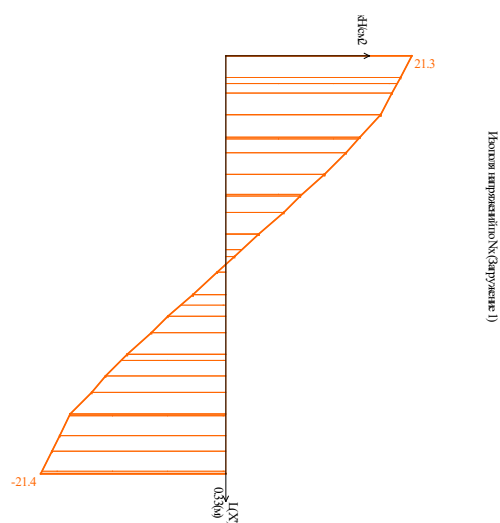


Рис. 6. Эпюра напряжений N_x в сечении 1-1, кН/см^2

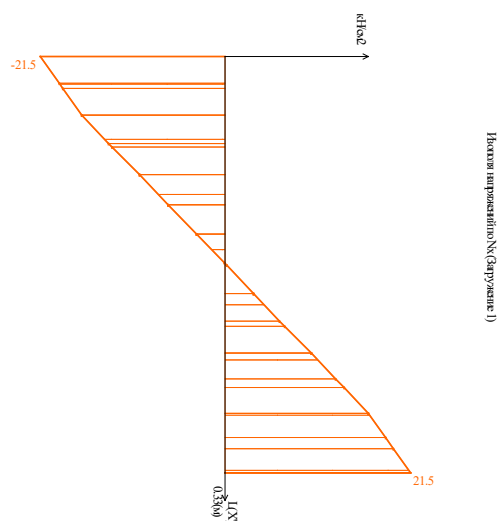


Рис. 7. Эпюра напряжений N_x в сечении 2-2, кН/см^2

В результате расчета получены напряжения в сечениях 1-1, 2-2:

- максимальные значения напряжений в сечении 1-1: в верхней полке 231 МПа, в нижней. 235 МПа;
- максимальные значения напряжений в сечении 2-2: в верхней полке 231 МПа, в нижней. 231 МПа.

2. Балка, жестко заземленная с обоих концов. Балка изготовлена из стали С245, выполнена из двух швеллеров №33П пролетом 6 м. Расстояние между швеллерами 350 мм. Конечно-элементная модель и балки представлена на рисунке 8. Балка нагружена равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью $q=245$ кН/м. Принятые жесткостные характеристики элементов приведены в таблице 2. Результаты расчета балки в ПК ЛИРА САПР представлены на рисунках 9-14.

Таблица 2. Жесткостные характеристики элементов

Имя	Комментарий	$E(E1)$, кН/см ²	$V12(V)$	H , мм
Пластина Н 1.1	Полка швеллера	20600	0,28	11
Пластина Н 0.7	Стенка швеллера	20600	0,28	7
Пластина Н 0.7	Ребра жесткости	20600	0,28	7
Пластина Н 2.2	Пластины усиления	20600	0,28	30

Зеруване 1

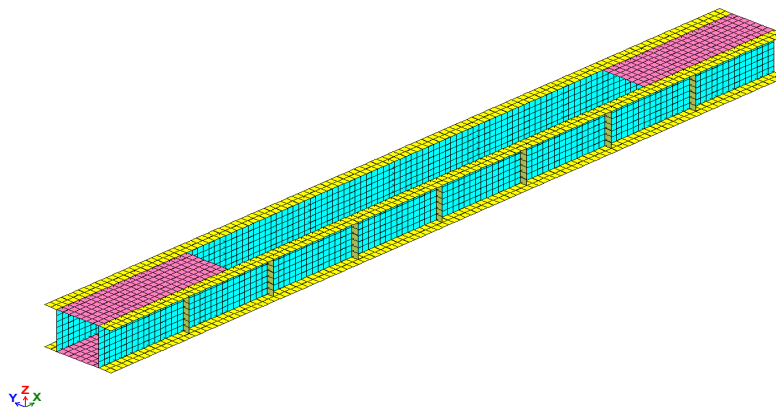


Рис. 8. Конечно-элементная модель балки

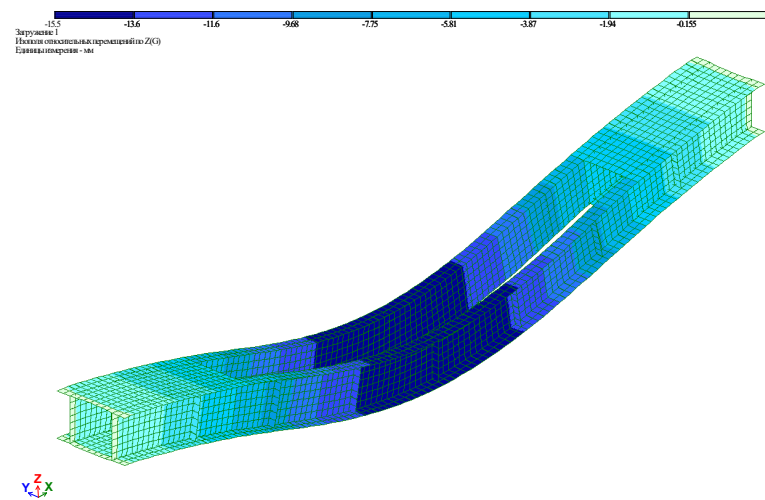


Рис. 9. Изополя относительных перемещений по Z, мм

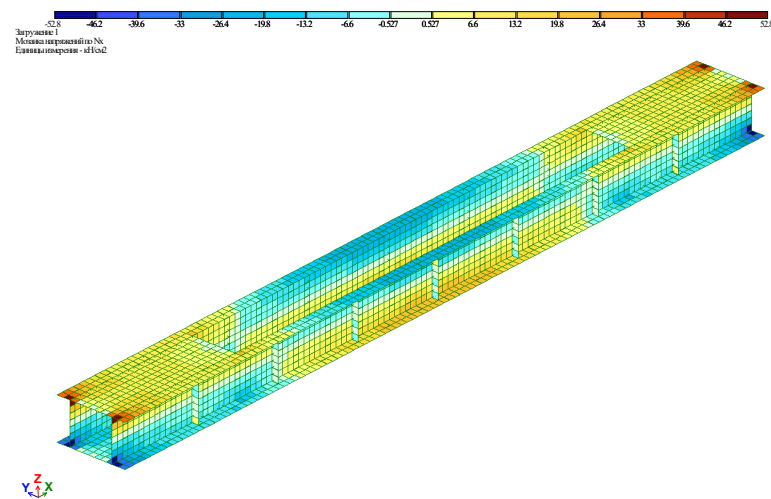


Рис. 10. Мозаика напряжений N_x , кН/см²

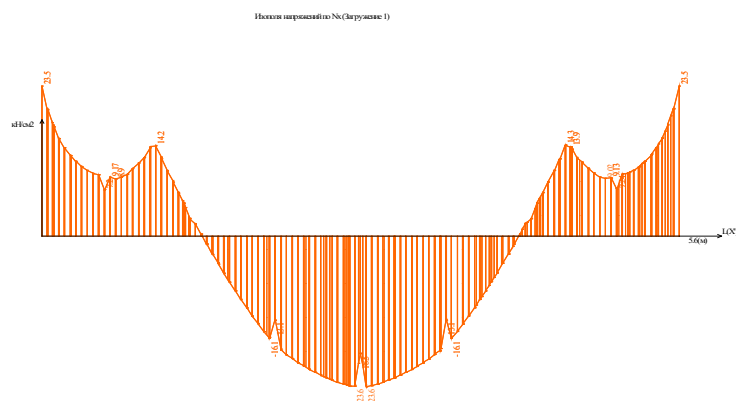


Рис. 11. Эпюра напряжений N_x в верхней полке, кН/см^2

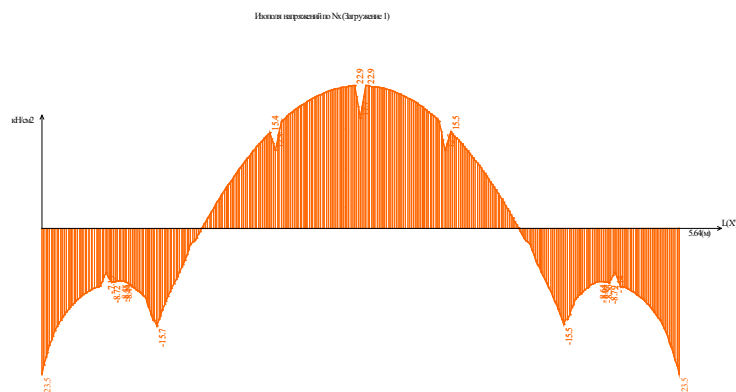


Рис. 12. Эпюра напряжений N_x в нижней полке, кН/см²

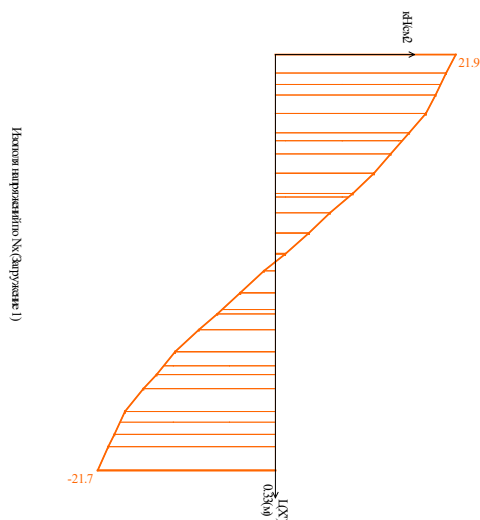


Рис. 13. Эпюра напряжений N_x в сечении 1-1, кН/см²

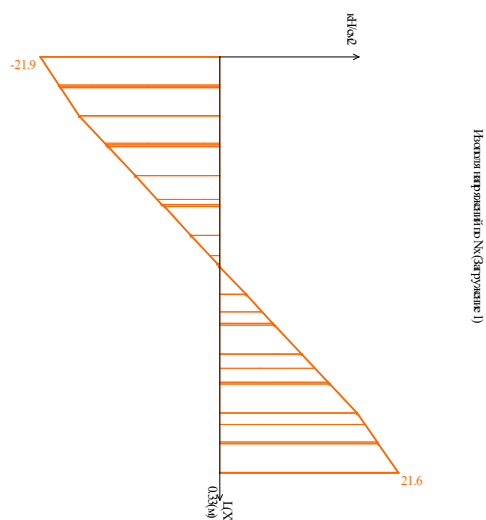


Рис. 14. Эпюра напряжений N_x в сечении 2-2, кН/см²

В результате расчета получены напряжения в сечениях 1-1, 2-2, 3-3:

- максимальные значения напряжений в сечении 1-1: в верхней полке 235 МПа, в нижней. 235 МПа;
- максимальные значения напряжений в сечении 3-3: в верхней полке 236 МПа, в нижней. 229 МПа.

Закключение. По результатам численного эксперимента было выявлено, что выравнивание напряжений в опасных сечениях позволяет уменьшить материалоемкость по сравнению с балками, подобранными по сортаменту по требуемому моменту сопротивления.

По результатам расчета несущей способности можно сделать вывод, что для балки с жестким защемлением и шарнирным опиранием наиболее рационально применение рассмотренного метода усиления при увеличении нагрузки на величину $q/[q] \in (2,01; 2,39)$, а для балки с жестко защемленными концами $q/[q] \in (3,07; 4,35)$, так как при этом удастся добиться равенства максимальных напряжений и расчетного сопротивления, то есть максимально полно использовать несущую способность сечений усиленной балки (здесь $[q]$ - предельная нагрузка для не усиленной балки). При других значениях $q/[q]$ невозможно получить равенство максимальных напряжений и расчетного сопротивления, поэтому несущая способность усиленной балки будет использоваться лишь частично.

По результатам анализа напряжения в опасных сечениях при разных геометрических характеристиках элементов усиления одинаковой массы выявлено, что только балка, усиленная по предложенной методике, имеет в сечениях небольшие недонапряжения. В сечениях остальных балок с элементами усиления такой же массы, но с другими параметрами n и k , возникают напряжения больше расчетного сопротивления или сечения значительно недогружены.

Литература

1. Колесников В.М. Исследование работы некоторых стальных конструкций и отдельных элементов, усиленных под нагрузкой. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Л., 1967. 24 с.
2. Шепельский М.Я. Исследование упругопластической работы стальных балок, усиленных до загрузки и под нагрузкой. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. - Харьков, 1959. 18 с.
3. Зверев В.В. Эффективные строительные металлоконструкции на основе объемно-формованного тонколистового проката: исследование, проектирование, изготовление. Автореферат дис. ... докт. техн. наук. Воронеж, 2000. 43 с.
4. Ребров И.С. Усиление стержневых металлических конструкций: проектирование и расчет. Л.: Стройиздат, 1988. 288 с.
5. Абовский Н.П. Регулирование, синтез, оптимизация (избранные задачи по строительной механике и теории упругости). Учебное пособие для ВУЗов. Красноярск: Изд-во Красноярск, ун-та, 1985. 384с.
6. Трифунович И.З., Рыбакова Л.Ю. Анализ z-образных балок из холоднокатаной стали методом конечных элементов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7094.
7. Решетников А.А., Корнет В.Ю., Леонова Д.А. Сравнительный анализ методик расчета тонкостенных стальных балок с-образного профиля по отечественным и зарубежным нормам // Инженерный вестник Дона. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4788.
8. El-Hacha Raafat. Bond characteristics of high-strength steel reinforcement. ACI Structural Journal. Vol. 103 No. 6. 2006. pp. 771-782.
9. Kim T. Experimental evaluation of plate-reinforced steel moment-resisting connections. Journal of structural engineering. Vol. 128 No. 4. 2002. pp. 483-491.
10. Sakano M. Reinforcement of a steel beam using a heated high-strength steel plate. Technol Rep Kansai Univ. No. 44. 2002. pp. 113-117.

References

1. Kolesnikov V.M. Issledovanie raboty nekotoryh stal'nyh konstrukcij i otdel'nyh elementov, usilennyh pod nagruzkoy. Avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk [Study of the work of some steel structures and individual elements reinforced under load. Abstract of dis. ... cand. of technical sciences]. L., 1967. 24 p.
2. Shepel'skij M.Ya. Issledovanie uprugoplasticheskoy raboty stal'nyh balok, usilennyh do zagruzheniya i pod nagruzkoy. Avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk [Study of elastic-plastic behavior of steel beams reinforced before loading and under load. Abstract of dis. ... cand. of technical sciences]. Har'kov, 1959. 18 p.
3. Zverev V.V. Effektivnye stroitel'nye metallokonstrukcii na osnove ob'emno-formovannogo tonkolistovogo prokata: issledovanie, proektirovanie, izgotovlenie. Avtoreferat dis. ... dokt. tekhn. nauk [Efficient building metal structures based on volumetrically formed thin sheet metal: research, design, manufacturing. Abstract of dis. ... doctor of technical sciences]. Voronezh, 2000. 43 p.
4. Rebrov I.S. Usilenie sterzhnevyyh metallicheskih konstrukcij: proektirovanie i raschet [Strengthening of rod metal structures: design and calculation]. L.: Strojizdat, 1988. 288 p.
5. Abovskij N.P. Regulirovanie, sintez, optimizaciya (izbrannye zadachi po stroitel'noj mekhanike i teorii uprugosti). Uchebnoe posobie dlya VUZov [Regulation, synthesis, optimization (selected problems in structural mechanics and elasticity theory). Textbook for universities]. Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyarsk, un-ta, 1985. 384p.
6. Trifunovich I.Z., Rybakova L.YU. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7094.
7. Reshetnikov A.A., Kornet V.YU., Leonova D.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4788.
8. El-Hacha Raafat. ACI Structural Journal Vol. 103 No. 6 2006. pp. 771-782.
9. Kim T. Journal of structural engineering. Vol. 128 No. 4. 2002. pp. 483-491.
10. Sakano M. Technol Rep Kansai Univ. No 44. 2002. pp. 113-117.

Дата поступления: 3.07.2025 Дата публикации: 25.08.2025
