УДК 624.012.46:691-427.4 DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.76-81

Сравнение способов усиления большепролетных изгибаемых железобетонных конструкций

Артем Алексеевич ДАВИДЮК, кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: Artem@ktbbeton.com

Евгений Александрович АРТЕМЬЕВ, руководитель Центра технической экспертизы и проектирования, e-mail: e.artemiev@ktbbeton.com

Марина Владимировна ШЕВКУНОВА, ведущий инженер-проектировщик, e-mail: m.shevkunova@ktbbeton.com

АО «Конструкторско-технологическое бюро бетона и железобетона» (АО «КТБ ЖБ»), 109428 Москва, 2-я Институтская ул., 6, стр. 64

Аннотация. *Вопросы усиления железобетонных конструкций, находящихся в аварийном состоянии, являются одними из наиболее сложных и наукоемких. Статья посвящена совершенствованию методики проектирования усиления большепролетных железобетонных конструкций при помощи предварительно напряженных канатов. Авторами предложена оригинальная методика расчетного обоснования данного способа усиления посредством выполнения прочностных расчетов конструкций в нелинейной постановке в расчетном программном комплексе. Представлены результаты сравнительного анализа способов усиления большепролетных изгибаемых железобетонных конструкций на примере монолитной решетчатой балки. Сравнивались два способа усиления: путем переопирания балки на обойму из прокатных стальных уголков и усилением балки прямолинейными и криволинейными предварительно напряженными канатами. Сопоставив весовые и стоимостные критерии оценки, авторы пришли к выводу, что усиление балки преднапряженными канатами эффективнее, и этот вариант был принят к реализации. Он также может быть рекомендован для выполнения аналогичных работ.*

Ключевые слова: *большепролетные железобетонные конструкции, аварийное состояние, решетчатые балки, усиление, преднапряженный канат.*

COMPARISON OF METHODS FOR STRENGTHENING LARGE-SPAN BENT REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Artem A. DAVIDYUK, e-mail: Artem@ktbbeton.com

Ewgeniy A. ARTEMIEV, e-mail: e.artemiev@ktbbeton.com

Marina V. SHEVKUNOVA, e-mail: m.shevkunova@ktbbeton.com

Design and Technological Bureau of Concrete and Reinforced Concrete, 2-ya Institutskaya ul., 6, str. 64, Moscow 109428, Russian Federation

Abstract. *The issues of strengthening reinforced concrete structures that are in disrepair are among the most complex and science-intensive. The article is devoted to improving the method for designing reinforcement of large-span reinforced concrete structures using pre-stressed ropes. The authors propose an original method for calculating the justification of this method of reinforcement by performing strength calculations of structures in a nonlinear formulation in a computational software package. The results of a comparative analysis of methods for strengthening large-span bent reinforced concrete structures on the example of a monolithic lattice beam are presented. Two methods of reinforcement were compared: by re-bracing the beam on a cage made of rolled steel corners and strengthening the beam with straight and curved pre-stressed ropes. After comparing the weight and cost evaluation criteria, the authors concluded that strengthening the beam with pre-stressed ropes is more effective, and this option was accepted for implementation. It can also be recommended for similar works.*

Key words: *large-span reinforced concrete structures, emergency condition, lattice beams, reinforcement, pre-stressed rope.*

Введение

На этапе возведения зданий и сооружений нередко допускаются строительные ошибки и отклонения от проекта, что в ряде случаев может привести к возникновению непредвиденных, в том числе аварийных ситуаций. Аварийным ситуациям, как правило, предшествует развитие дефектов и повреждений несущих конструкций в виде сверхнормативных трещин и деформаций не только на этапе эксплуатации, но даже в процессе строительства. В таких случаях встает вопрос — сносить или усиливать? Поскольку, как правило, сроки строительства объектов очень сжатые, целесообразнее прибегнуть к усилению.

Целью данной работы является сравнительный анализ способов усиления большепролетных изгибаемых железобетонных конструкций с точки зрения экономических показателей, трудоемкости и материалоемкости.

© ДАВИДЮК А. А., АРТЕМЬЕВ Е. А., ШЕВКУНОВА М. В., 2020

Рис. 1. ***Детский Музыкальный театр юного актера***

Существует много традиционных методов усиления: наращивание сечения, применение стальных обойм или затяжек, использование композиционных материалов — лент из углеродного волокна, приклеиваемых эпоксидными составами на поверхность конструкции и т. д. Все эти методы достаточно подробно рассмотрены в технической литературе, например в [1—6].

Описание работы

В этой статье рассмотрено усиление монолитных железобетонных большепролетных балок с помощью прямо- и криволинейно расположенной канатной арматуры [3] в ходе реконструкции здания под размещение Государственного бюджетного учреждения культуры г. Москвы «Детский Музыкальный театр юного актера» *(рис. 1).*

В настоящее время здание имеет шесть этажей и подвал. Конструктивная схема реконструированного здания — каркасно-стеновая, с монолитными железобетонными колоннами, стенами и перекрытиями по монолитным железобетонным балкам. Конструктивная схема с учетом устойчивости сооружения решена с жестким сопряжением монолитных стен и колонн с плитой фундамента и плитами перекрытий [2]. Фундамент выполнен плитно-свайным. Толщина фундаментной плиты составляет 0,6 м. Колонны имеют сечение 400×400 мм. Толщина монолитных железобетонных перекрытий — 200 мм. Кровля плоская рулонная с профилированным настилом по металлическим балкам из труб прямоугольных сечений.

Процент площади существующей арматуры от требуемого расчетного значения, %

Элемент	4-й этаж			5-й этаж		
	Ось 4	Ось 6	Ось 7	Ось 3	Ось 4	Ось 7
Нижний пояс:						
пролетный участок	73,6	42	59	59	59	100
опорный участок	37,7	23,6	38	31,4	23,4	38
Верхний пояс:						
пролетный участок	20,1	20,1	20,1	24	41	64
опорный участок	27	27	31,4	38	27	100
Поперечное армирование нижнего пояса:						
пролетный участок	12,6	12,6	12,6	17	20,5	65,4
опорный участок	41	19,7	32,7	25	19,7	53
Поперечное армирование верхнего пояса:						
пролетный участок	20	10	12,6	16	16	40
опорный участок	19,7	19,7	19,7	32,5	41	79
Поперечное армирование столбиков решетки	8	8	8	8	8	20,5

Над 4-м и 5-м этажами выполнены монолитные железобетонные большепролетные балки (пролет балок в осях — 14 450 мм). По длине балки имеются 12 прямоугольных отверстий 800×600(h) мм. Высота балки с учетом монолитной железобетонной плиты перекрытия составляет 1500 мм, ширина — 400 мм. Размер от низа балки и низа плиты перекрытия до отверстий — 300 мм. Материал балок — бетон класса В25, арматура класса А500. Общий вид рассматриваемой большепролетной решетчатой балки представлен на *рис. 2.*

Сотрудниками АО «КТБ ЖБ» проведено обследование строи-

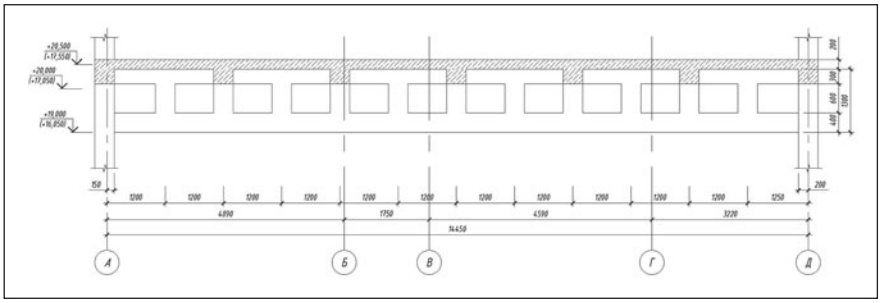

Рис. 2. ***Монолитная железобетонная большепролетная балка***

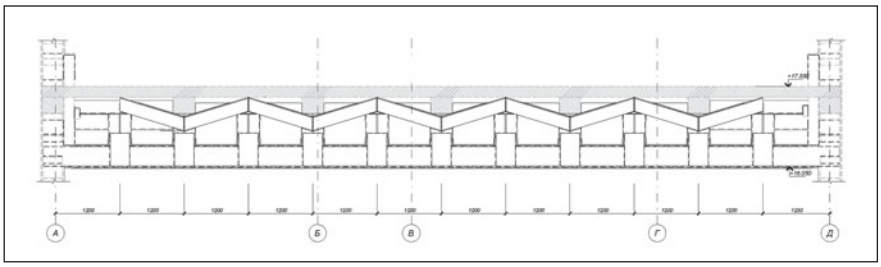

Рис. 3. ***Схема усиления балки стальной обоймой***

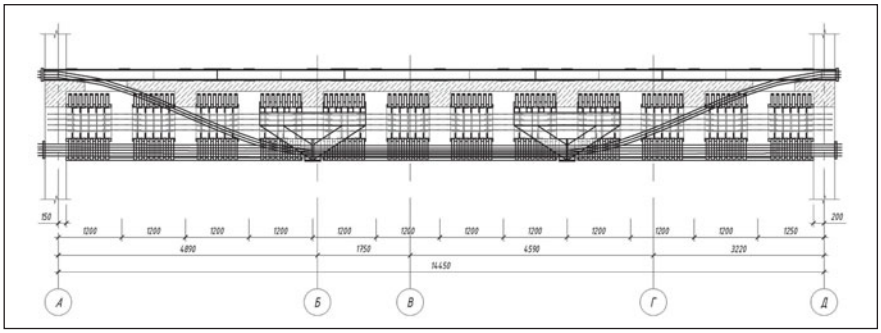

Рис. 4. ***Комбинированная схема усиления элементов балки обоймами и преднапряженными канатами***

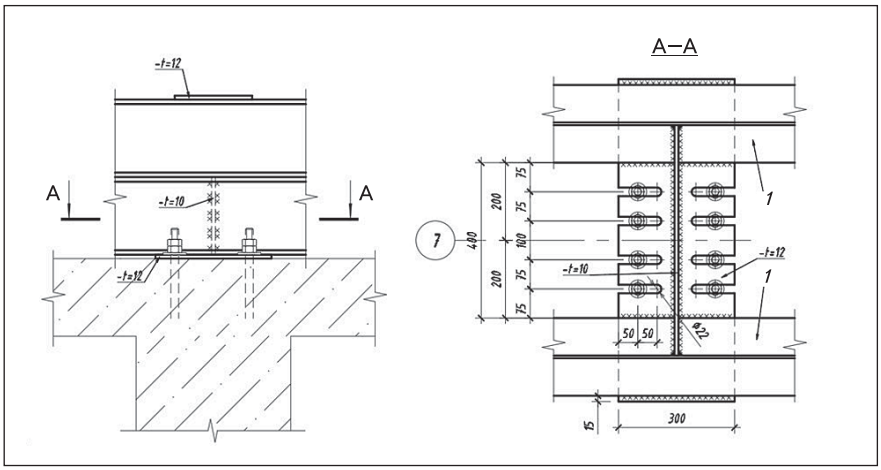

Рис. 5. ***Узел крепления стальной балки к верху железобетонной балки, шаг 1 м (1 — балки 20К2)***

тельных конструкций здания визуально-инструментальным методом, в ходе которого с помощью тахеометрической съемки выявлены прогибы балок, а также зафиксированы трещины в пролетной и опорных зонах шириной раскрытия, превышающей предельно допустимую. В результате обследования балок 4-го этажа в осях 4/А-Д, 6/А-Д, 7/А-Д и 5-го этажа в осях 3/А-Д, 4/А-Д зафиксированы дефекты и повреждения. Во всех обследованных балках отмечено образование трещин в нижнем поясе поперек рабочей арматуры. Направление распространения трещин по боковым граням преимущественно вертикальное, на локальных участках — косое. Наибольшая ширина раскрытия отмечается у трещин, расположенных вдоль центральной поперечной оси балки. Максимальная ширина раскрытия трещин — 0,8 мм, максимальный прогиб — 9 см.

В процессе работы также были выполнены поверочные расчеты основных конструкций с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2019, в ходе которых выявлен значительный дефицит армирования различных зон конструкций *(см. таблицу)*.

Анализ данных расчета

Учитывая наличие трещин во вновь возведенных балках, было необходимо в кратчайшие сроки выполнить усиление [1] по специально разработанному проекту. При принятии решения о выборе способа усиления рассматривались два основных варианта.

Первый вариант (рис. 3). Конструкция балки полностью переопирается на стальную обойму из уголков 200×12 со сплошными накладками из 12 пластин по всем элементам балки, и вводятся раскосы из уголка 250×16 по обе стороны балки. Таким образом, балка фактически исключается из работы.

Второй вариант (рис. 4), принятый к исполнению. Балка усиливается криволинейными и прямолинейными преднапряженными канатами К7-15,7-1860 в

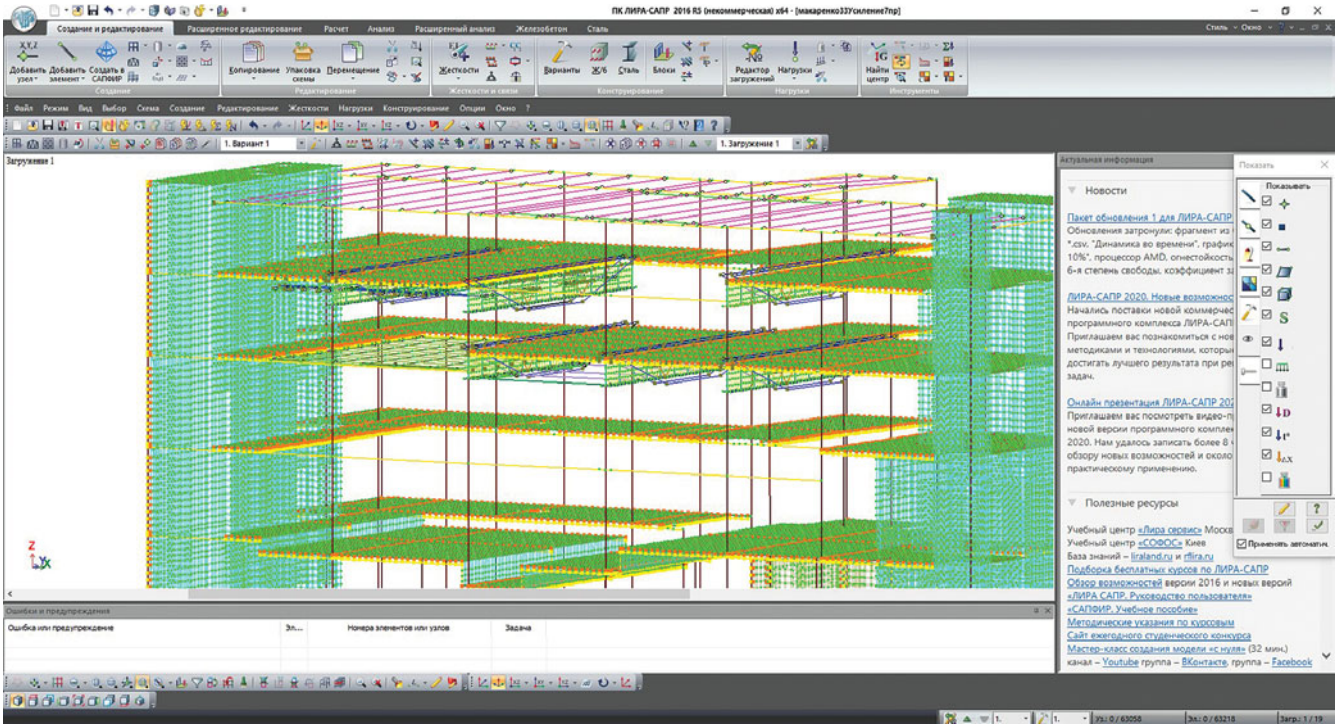

Рис. 6. *Пространственная расчетная схема*

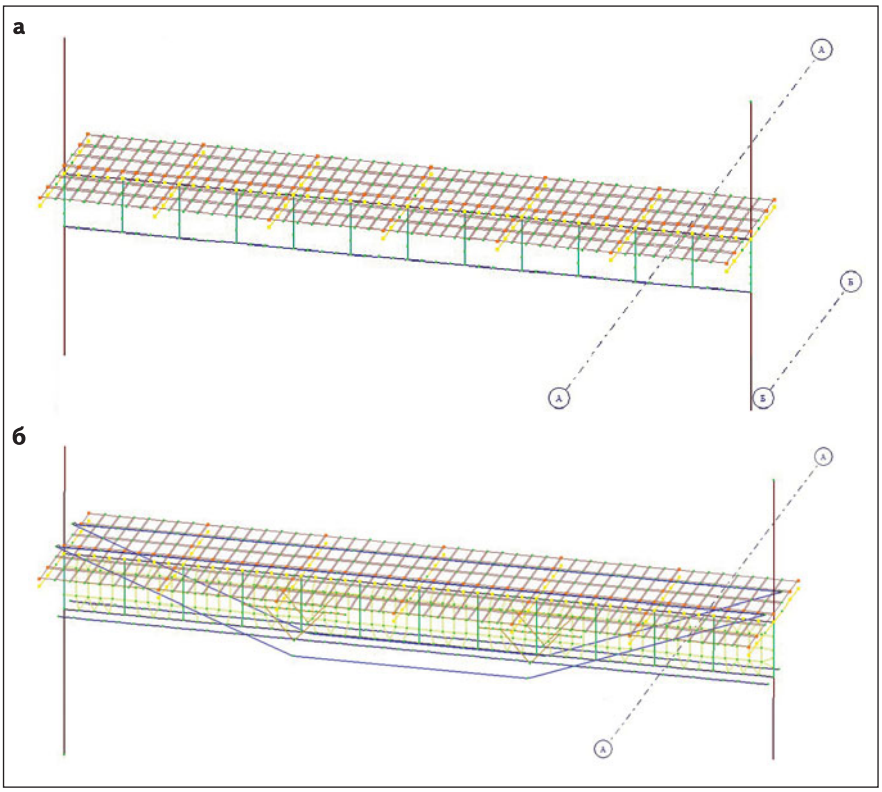

Рис. 7. *Вид балки до усиления (а) и усиленной (б)*

оболочке наряду с облегченной обоймой из уголков 50×5 с накладками из пяти пластин шириной 50 и шагом 100 мм. Криволинейные канаты крепятся к сдвоенным стальным балкам 20К2, расположенным в верхнем поясе по обе стороны балки, и проходят под центральной третью балки. Их задача — перевести балку из аварийного состояния в работоспособное и компенсировать прогиб. Прямолинейные канаты нижнего усиления по обе стороны балки должны компенсировать деформацию колонн, а также увеличить трещиностойкость и несущую способность нижнего пояса. Внутреннее пространство ячеек балки заполняется бетоном В40. Для этого во внутреннем пространстве ячеек устанавливается поперечная арматура диаметром16А500С с шагом 200 мм, чтобы компенсировать вертикальную силу. Горизонтальная арматура того же диаметра служит для обеспечения монолитности конструкции. Такой вариант усиления конструкции позволяет воспринимать необходимую нагрузку [6].

Следует иметь в виду, что в процессе натяжения канатов будет образовываться выгиб балки вверх, поэтому необходимо контролировать выгиб двутавровой балки. Для этого рекомендуется использовать фиксирующие бал-

ку болты и производить замену пластин *(рис. 5)*. Предельное отклонение от горизонтали двутавровой балки составляет 15 мм.

Расчет конструкций усиления

Расчет усиления *(рис. 6, 7)* производился с помощью нелинейного решателя в программном комплексе ЛИРА-САПР, который позволяет учесть последовательность монтажа конструкций усиления с учетом преднапряжения элементов [4]. Полученные усилия в балке с помощью преднапряжения снижены до уровня предельных значений. Усилия перераспределены на канаты и верхние балки.

Последовательность монтажа:

1. Возведение здания до момента усиления.

2. Усиление:

- установка стоек переопирания балок вдоль всего пролета;
- вклейка стержней арматуры, перекрытых V-образными опорами;
- сварка металлоконструкций V-образных опор и двутавровых балок;
- преднапряжение балок наклонными канатами;
- преднапряжение балок горизонтальными канатами;
- дополнительное преднапряжение по результатам мониторинга;
- замоноличивание проемов в балках;
- регулирование преднапряжения балок по результатам мониторинга.

3. Приложение эксплуатационных нагрузок.

Моделирование элементов усиления выполнялось с использованием конечных элементов (КЭ):

- моделирование канатов (КЭ 208) — физически нелинейный специальный двухузловой КЭ предварительного натяжения. В канатах с помощью специального вида нагрузки создавалось предварительное натяжение. В данном натяжении учитывались также их потери, рассчитанные по соответствующим сводам правил и методическим рекомендациям;
- моделирование монолитной заделки (КЭ 44) — универсальный четырехугольный элемент оболочки;
- моделирование стальных балок-распорок (КЭ 10) — универсальный пространственный стержневой элемент.

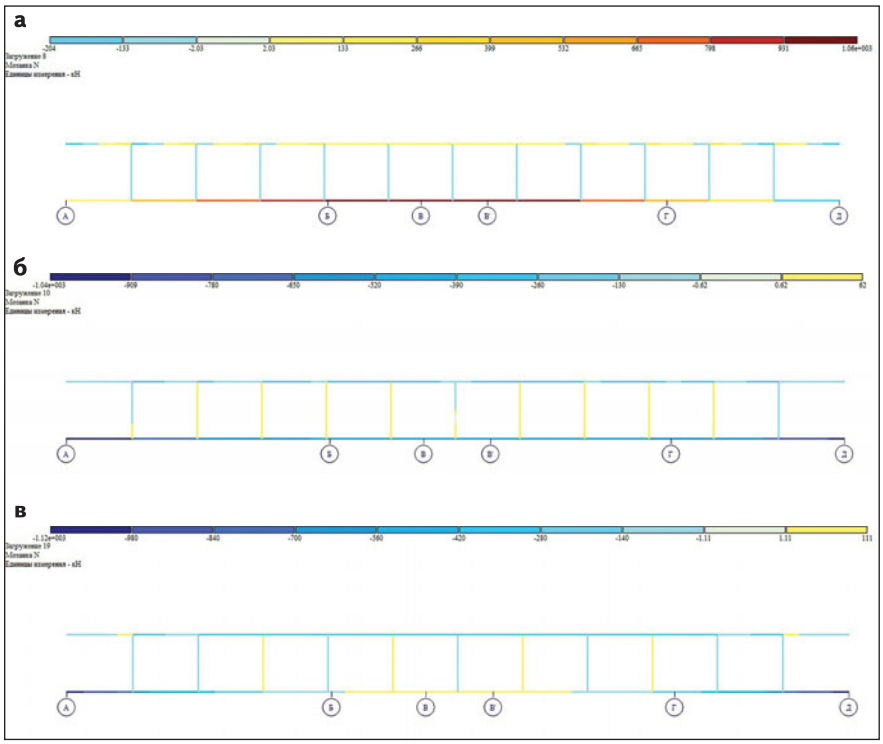

Рис. 8. ***Нормальные усилия, кН, в балке до усиления (а), после преднапряжения канатов (б) и в период эксплуатации (в)***

Усилия в каждом элементе на всех этапах монтажа *(рис. 8)* проверялись с целью предотвращения их недопустимого увеличения. Регулирование усилий производилось подбором усилий в канатах в соответствии с СП 52-102-2003 «Предварительно напряженные железобетонные конструкции», разработанным НИИЖБ.

Сравнительный анализ затрат

Масса стальных конструкций в первом варианте усиления составляет 8,33 т, стоимость монтажа — 4,23 млн р.; во втором варианте соответственно 6,52 т и 1,44 млн р. + стоимость канатов, спецоборудования для их натяжения и инженерного сопровождения по монтажу системы преднапряжения — 1,91 млн р.

Таким образом, итоговые затраты для первого и второго вариантов составляют 4,23 и 3,35 млн р. соответственно. Данные приведены на основе локального сметного расчета на монтаж конструкций, выполненного АО «КТБ ЖБ» [7], и коммерческого предложения ООО «ПСК Строитель» на поставку материалов, инженерно-консультационных услуг и аренду оборудования для монтажа преднапряженных канатов.

Выводы

По результатам выполненного сравнительного анализа установлено, что при применении преднапряженных канатов достигается значительное снижение веса применяемых для усиления конструкций, что позволяет умень-

шить затраты на строительно-монтажные работы по сравнению с другими методами усиления. Кроме того, применение предварительно напряженной канатной арматуры в качестве усиления железобетонных перекрытий и покрытий дает возможность упростить изготовление элементов усиления, сократить время монтажных работ (благодаря отсутствию необходимости поднимать на высоту и монтировать массивные элементы).

Практическое значение исследования заключается в том, что рассмотренный вариант усиления канатами наиболее экономически выгоден для усиления большепролетных железобетонных балок и может быть рекомендован для выполнения аналогичных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по проектированию усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий. Надземные конструкции и сооружения / Харьковский Промстройниипроект, НИИЖБ. М. : Стройиздат, 1992. 191 с.
2. *Сигалов Э. Е., Стронгин С. Г.* Железобетонные конструкции. М. : Стройиздат, 1966. 387 с.
3. Руководство по технологии предварительного напряжения стержневой арматуры железобетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1972. 64 с.
4. *Минкин И., Нахшон Б., Рабинович М.* Опыт строительства мостов средних и больших пролетов из преднапряженного железобетона в Израиле // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2009. № 21. С. 114–119.
5. *Тотоев В. Г., Магомедов А. Ф.* Монолитный железобетон с предварительным натяжением арматуры: история, применение, предпосылки развития // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. статей VII Междунар. науч.-практ. конф. (Пенза, 5 июня 2019 г.). В 4 ч. Пенза, 2019. С. 47–51.
6. *Пиджаков М. В., Пиджаков С. В.* Системы преднапряженного монолитного железобетона в гражданских зданиях // Наука в исследованиях молодежи – 2016 : материалы студенческой научной конференции (Лесниково, 20 апреля 2016 г.). 2016. С. 92–95.
7. ТСН-2001.12. Территориальные сметные нормативы для Москвы. М., 2006. 42 с.

REFERENCES

1. *Rekomendacii po proektirovaniju usilenija zhelezobetonnyh konstrukcij zdanij i sooruzhenij rekonstruiruemyh predprijatij. Nadzemnye konstrukcii i sooruzhenija* [Recommendations for the design of reinforced concrete structures of buildings and structures of reconstructed enterprises. Above-ground structures and facilities]. Har'kovskij Promstrojniiproekt, NIIZhB. Moscow, Strojizdat Publ., 1992. 191 p. (In Russian).
2. Sigalov Je. E., Strongin S. G. *Zhelezobetonnye konstrukcii* [Reinforced concrete structure]. Moscow, Strojizdat Publ., 1966. 387 p. (In Russian).
3. *Rukovodstvo po tehnologii predvaritel'nogo naprjazhenija sterzhnevoj armatury zhelezobetonnyh konstrukcij* [A guide to the technology of pre-stressing rod reinforcement of concrete structures]. NIIZhB Gosstroja SSSR. Moscow, Strojizdat Publ., 1972. 64 p. (In Russian).
4. Minkin I., Nahshon B., Rabinovich M. Experience in building bridges of medium and large spans of prestressed reinforced concrete in Israel. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija*, 2009, no. 21, pp. 114–119. (In Russian).
5. Totoev V. G., Magomedov A. F. Monolithic reinforced concrete with pre-tensioned reinforcement: history, application, development background. *Sovremennaja nauka: aktual'nye voprosy, dostizhenija i innovacii. Sb. statej VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern science: current issues, achievements and innovations: collection of articles of the VII international scientific and practical conference (Penza, June 5, 2019)]. Penza , 2019, pp. 47–51. (In Russian).
6. Pidzhakov M. V., Pidzhakov S. V. Sistemy prednaprjazhennogo monolitnogo zhelezobetona v grazhdanskih zdanijah. *Nauka v issledovanijah molodezhi – 2016: materialy studencheskoj nauchnoj konferencii* [Science in youth research-2016: materials of the student scientific conference (Lesnikovo, April 20, 2016)]. Lesnikovo, 2016, pp. 92–95. (In Russian).
7. TSN-2001.12. *Territorial'nye smetnye normativy dlja Moskvy* [Territorial estimates for Moscow]. Moscow, 2006. 42 p. (In Russian).

Для цитирования: *Давидюк А. А., Артемьев Е. А., Шевкунова М. В.* Сравнение способов усиления большепролетных изгибаемых железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 76–81. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.76-81.

For citation: Davidyuk A. A., Artemiev E. A., Shevkunova M. V. Comparison of Methods for Strengthening Large-Span Bent Reinforced Concrete Structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 12, pp. 76–81. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.76-81.