

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 692.522.2

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ ПОЭТАПНОМ СОЗДАНИИ ПОСТНАПРЯЖЕНИЯ***Т.Р. Баркая¹, С.Л. Субботин¹, А.В. Гавриленко¹, С.И. Казимиров²*¹ *Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*² *ООО КБ «Калинин» (г. Тверь)*© Баркая Т.Р., Субботин С.Л.,
Гавриленко А.В., Казимиров С.И., 2022

Аннотация. Рассмотрены особенности моделирования постнапряженных конструкций, возводимых с применением поэтапного натяжения монострендов. Указано, что разделение расчетного усилия обжатия на этапы производится для сокращения сроков оборачиваемости опалубки и более полного использования механических свойств арматурных канатов за счет раннего включения в работу бетона и компенсации потерь напряжения первого этапа. Сделан вывод: в результате того, что на бетон, не достигший проектной прочности и деформативности, действует как собственный вес, так и монтажные нагрузки, конструкция приобретает начальные деформации (прогиб), которые по окончании твердения сохраняются в ней, следовательно, на этапе вторичного обжатия (а тем более к моменту загрузки эксплуатационной нагрузкой) элемент уже имеет некоторые геометрические несовершенства. Отмечено, что возникает вопрос об учете этого фактора при составлении расчетных схем постнапряженных конструкций и влиянии начального напряженного состояния на распределение усилий в элементе.

Ключевые слова: железобетон, монолитный бетон, постнапряжение, арматура без сцепления, моностренд, геометрическая нелинейность, выдерживание бетона.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-5-11

Технология предварительного напряжения монолитных конструкций с упором на бетон позволяет прикладывать к ним усилие обжатия в несколько этапов. Одним из распространенных способов проведения работ является приложение усилия обжатия в два этапа. На первом этапе к напрягаемой конструкции прикладывается усилие, составляющее порядка 25–60 % от полного, заданного в проекте. При этом конструкция приобрела уровень несущей способности и жесткости, необходимый для демонтажа части стоек опалубки и использования этих стоек на другой захватке. В то же время в конструкции начинают развиваться потери предварительного напряжения, обусловленные ползучестью бетона. Интенсивность этих потерь наиболее существенна в первые часы и дни после приложения обжатия.

Второй этап преднапряжения имеет место через несколько дней после первого, то есть когда бетон набрал достаточную прочность, в том числе и на действие местных нагрузок [3–5]. К конструкции прикладывается полное усилие обжатия, причем успевшие возникнуть потери преднапряжения частично компенсируются. После завершения натяжения канатов на втором этапе конструкция приобретает достаточные для восприятия собственного веса и технологических нагрузок (перемещения рабочих, кратковременного размещения материалов и инструментов) несущую способность и жесткость. Опалубка окончательно демонтируется.

Применение технологии предварительного напряжения, включающей приложение обжимающего усилия в два этапа, позволяет ускорить процесс производства работ, уменьшить требуемое количество стоек переопирания, более полно использовать свойства арматуры и бетона, компенсировать часть вторых потерь. Данному подходу присущи и определенные сложности. В частности, после приложения первой части усилия обжатия и сохранения ряда стоек переопирания конструкция под действием собственного веса и технологических нагрузок может получить некоторый прогиб. Далее бетон конструкции набирает прочность и образовавшийся начальный прогиб фиксируется, вследствие чего получается плита или балка, имеющая начальные несовершенства. При дальнейшем приложении второй части усилия обжатия результирующий изгибающий момент в конструкции необходимо подсчитывать с учетом поправки на ее начальный прогиб.

При составлении расчетных схем рассматриваемых конструкций одним из распространенных способов моделирования преднапряжения выступает введение условных вывешивающих нагрузок [6, 7]. Как правило, при этом этапность создания обжатия и сопутствующее этому развитие деформированного состояния, изменение геометрии схемы не учитываются. При этом может возникать некоторая взаимная компенсация продольного изгиба и вывешивающей нагрузки. В рамных каркасах с жестким сопряжением балок и колонн сочетание небольших начальных деформаций и обжатия второго этапа не сможет существенно повлиять (что очевидно) на результат расчета, выполненного без учета фактической нелинейности. Однако в общем случае (например, для неполных (безбалочных) монолитных каркасов или при шарнирном опирании плиты на кирпичную стену) влияние начального несовершенства может оказаться более значительным. В данной работе представлен анализ достоверности указанного подхода с целью решения задачи для произвольной изогнутой оси балки при малых прогибах.

Рассматриваемая железобетонная балка с прямолинейным расположением моностренда изображена на рис. 1 и 2. Расчетная схема соответствует нагружению балки на втором этапе постнапряжения с приобретенным прогибом f и под воздействием усилия обжатия второго этапа. Подразумевается, что моностренды в балке расположены в плоскости yOz так, что вывешивающие силы на первом этапе преднапряжения отсутствуют (рис. 1).

На балку действуют сжимающая сила, сжимающая сила, действующая на втором этапе, N и дополнительная вывешивающая сила $q = w_f$, образовавшаяся в результате прогиба и увеличения кривизны каната. Поскольку угол φ_0 невелик, можно считать, что

$$\sin(\varphi_0) = \varphi_0; \quad \cos(\varphi_0) = 1; \quad \operatorname{tg}(\varphi_0) = \varphi_0.$$

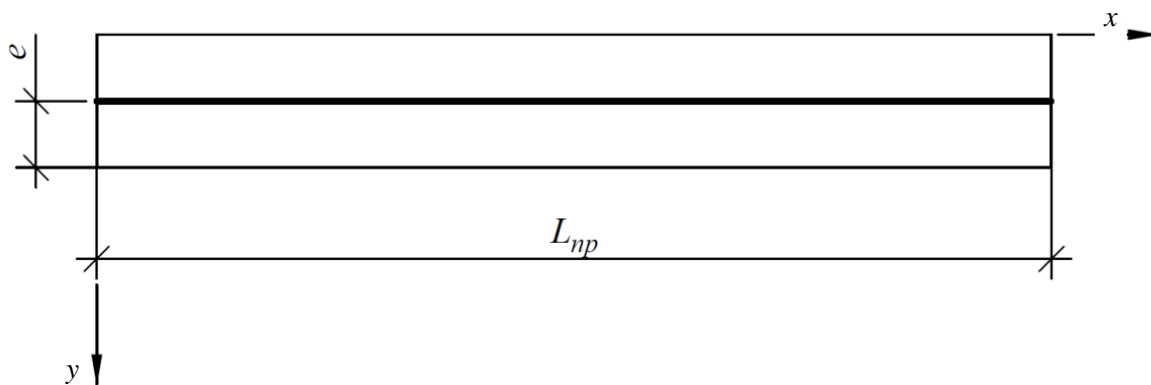
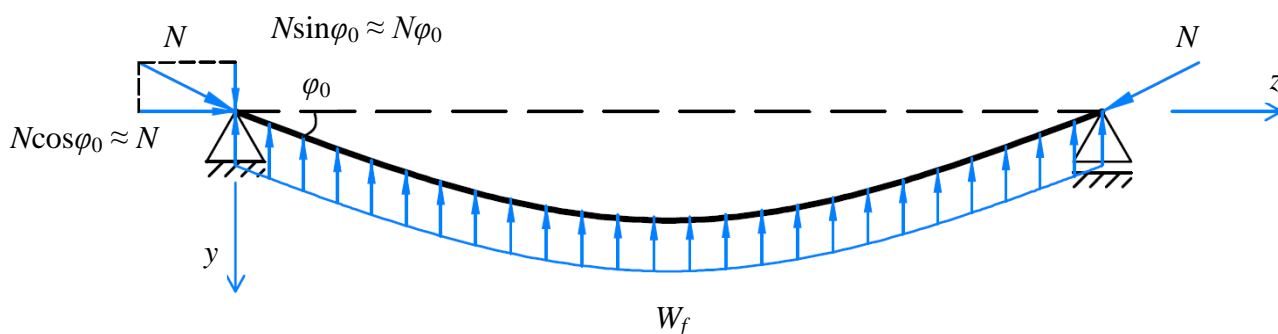
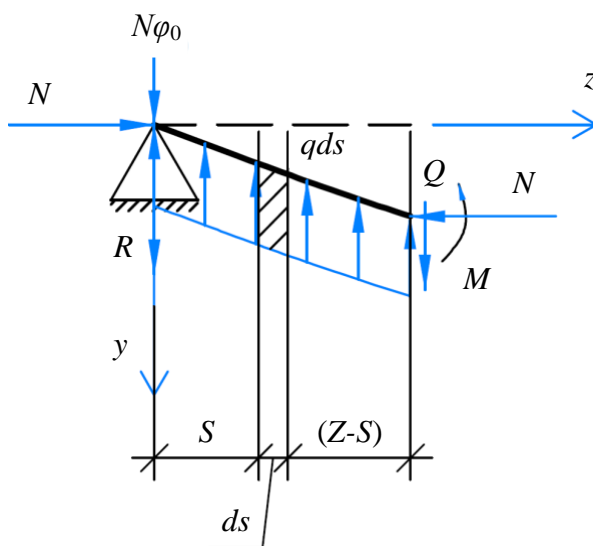


Рис. 1. Балка с прямолинейным расположением монострендов



а



б

Рис. 2. Расчетная схема постнапряженной балки на втором этапе обжатия:
а – деформированное состояние и воздействия на момент нагружения;
б – к определению опорных реакций

Принимается также, что длина некоторого участка деформированной балки z равна своей проекции на ось недеформированной балки. Исходя из вышеизложенного, опорную реакцию (см. рис. 2б) находим по формуле

$$R + N \cdot \varphi_0 = \frac{1}{2} \int_0^l q(z) dz. \quad (1)$$

Интеграл в правой части выражения (1) вычисляем с учетом, что

$$q(z) = -N \frac{d^2 v}{dz^2}. \quad (2)$$

Равенство (1) с учетом (2) преобразуем к виду

$$\begin{aligned} R + N \cdot \varphi_0 &= \frac{1}{2} \int_0^l q(z) dz = \frac{1}{2} \int_0^l \left(-N \frac{d^2 v}{dz^2}\right) dz = -\frac{N}{2} \int_0^l \frac{d^2 v}{dz^2} dz = \\ &= -\frac{N}{2} \frac{dv}{dz} \Big|_0^l = -\frac{N}{2} \left(\frac{dv}{dz} \Big|_{z=l} - \frac{dv}{dz} \Big|_{z=0} \right) = -\frac{N}{2} (-\varphi_0 - \varphi_0) = N \varphi_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Сопоставление выражений (3) и (1) показывает, что $R = 0$. Таким образом, опорная реакция R отсутствует, вертикальная составляющая силы обжатия компенсируется вывешивающими силами.

Изгибающий момент в произвольном поперечном сечении записывается с учетом уравнений (1)–(3):

$$\begin{aligned} M(z) &= Nv(z) - (R + N\varphi_0)z + \int_0^z q(s)(z-s) ds = Nv(z) - N\varphi_0 z + \\ &+ z \int_0^z q(s) dz - \int_0^z q(s) s ds = Nv(z) - N\varphi_0 z + \\ &+ z \int_0^z -N \frac{d^2 v}{dz^2} dz - \int_0^z -N \frac{d^2 v(s)}{ds^2} s ds = \\ &= Nv(z) - N\varphi_0 z - Nz \frac{dv}{dz} \Big|_0^z + N \int_0^z \frac{d^2 v(s)}{ds^2} s ds. \end{aligned} \quad (4)$$

Последнее слагаемое в выражении (4) (интеграл $\int_0^z \frac{d^2 v(s)}{ds^2} s ds$) вычисляем с помощью метода «по частям»:

$$\begin{aligned} \int_0^z \frac{d^2 v(s)}{ds^2} s ds &= \frac{dv}{ds} s \Big|_0^z - \int_0^z \frac{dv}{ds} ds = \\ &= \frac{dv}{dz} z - \frac{dv}{dz} \cdot 0 - v(s) \Big|_0^z = \frac{dv}{dz} z - v(z). \end{aligned} \quad (5)$$

Подстановка выражения (5) в (4) показывает, что суммарный изгибающий момент от совместного действия продольного изгиба и вывешивающей нагрузки равен нулю:

$$m(z) = Nv(z) - N\varphi_0 z - Nz \frac{dv(z)}{dz} + N\varphi_0 z + N \frac{dv(z)}{dz} z - Nv(z) = 0. \quad (6)$$

Полученный в равенстве (6) результат позволяет сделать вывод, что в элементах, не воспринимающих значительные продольные нагрузки (помимо усилий обжатия), с начальным прямолинейным расположением моностренда учет влияния прогиба при совместном действии силы обжатия N и вывешивающей нагрузки является излишним.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cross E. Post-tensioning in building structures. 2017. URL: <https://studylib.net/doc/18487085/post-tensioning-in-building-structures> (дата обращения: 14.02.2022).
2. Meyer K.T. When should you stress a cable slab // *MLAW Newsletter*. 2006. URL: <https://mlaweng.com/newsletters/whenshould-you-stress-a-cable-slab> (дата обращения: 14.02.2022).
3. Баркая Т.Р., Гавриленко А.В., Левиков А.В., Шевкина А.В. Учет стадийности возведения при проектировании монолитных постнапряженных конструкций // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 4 (12). С. 19–23.
4. Абдуллина Ю.Р., Баркая Т.Р., Гавриленко А.В., Куляев П.В. Оптимизация технологических процессов постнапряжения в построечных условиях // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2020. № 4 (15). С. 16–22.
5. Aalami V.O. Post-Tensioned Buildings. Design and Construction. ADAPT Corporation. 2014. 202 p.
6. Портаев Д.В. Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий. М.: Ассоциация строительных вузов. 2011. 248 с.
7. ТКП EN 1992-1-1-2009. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. 2010. 191 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru
СУББОТИН Сергей Львович – доктор технических наук, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sbtn@yandex.ru
ГАВРИЛЕНКО Алексей Владимирович – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: GavrilenkoAV@tstu.tver.ru
КАЗИМИРОВ Сергей Игоревич – инженер-проектировщик, ООО КБ «Калинин», Россия, г. Тверь, ул. Новая Заря, д. 8, оф. II. E-mail: kazimirow97@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Баркая Т.Р., Субботин С.Л., Гавриленко А.В., Казимиров С.И. Особенности моделирования железобетонных элементов при поэтапном создании постнапряжения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (15). С. 5–11.

BENDING TEST OF A METAL-WOOD PANEL WITH FLAT GALVANIZED SHEET WALLS STIFFENED BY WOODEN RIBS

T.R. Barkaya¹, S.L. Subbotin¹, A.V. Gavrilenko¹, S.I. Kazimirov²

¹ *Tver State Technical University (Tver)*

² *KB «Kalinin», LLC (Tver)*

Abstract. The features of modeling post-stressed structures erected using phased tension of monostrends are considered. It is indicated that the separation of the calculated compression force into stages is carried out to reduce the time of the formwork turnover and more fully utilize the mechanical properties of reinforcing ropes due to the early inclusion of concrete in the work and compensation for the stress losses of the first stage. The conclusion is made: as a result of the fact that both its own weight and mounting loads act on concrete that has not reached the design strength and deformability, the structure acquires initial deformations (deflection), which, after hardening, remain in it, therefore, at the stage of secondary compression (and even more so by the time of loading with an operational load) the element already has some geometric nonlinearity. It is noted that the question arises about taking this factor into account when drawing up design schemes of post-stressed structures and the influence of the initial stress state on the distribution of forces in the element.

Keywords: reinforced concrete, monolithic concrete, post-stress, reinforcement without coupling, monostrend, geometric nonlinearity, concrete retention.

REFERENCES

1. Cross E. Post-tensioning in building structures. 2017. URL: <https://studylib.net/doc/18487085/post-tensioning-in-building-structures> (accessed: 14.02.2022).
2. Meyer K.T. When should you stress a cable slab? *MLAW Newsletter*. 2006. URL: <https://mlaweng.com/newsletters/whenshould-you-stress-a-cable-slab> (accessed: 14.02.2022).
3. Barkaya T.R., Gavrilenko A.V., Levikov A.V., Shevkina A.V. Consideration of erection stage in designing monolithic post-strained structures. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2021. No. 4 (12), pp. 19–26. (In Russian).
4. Abdullina Yu.R., Barkaya T.R., Gavrilenko A.V., Kulyaev P.V. Optimization of post-stress technological processes in building conditions. *Zhilishchnoe hozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura*. 2020. No. 4 (15), pp. 16–22. (In Russian).
5. Aalami B.O. Post-Tensioned Buildings. Design and Construction. ADAPT Corporation. 2014. 202 p.

6. Portaev D.V. Raschet i konstruirovaniye monolitnyh prednapryazhennyh konstrukcij grazhdanskih zdaniy [Calculation and construction of monolithic prestressed structures of civil buildings]. Moscow: Associaciya stroitel'nyh vuzov. 2011. 248 p.
7. ТКР EN 1992-1-1-2009. Yevrokod 2. Proyektirovaniye zhelezobetonnykh konstruktsiy. Chast' 1-1. Obshchiye pravila i pravila dlya zdaniy [TCH EN 1992-1-1-2009. Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings]. Minsk: Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus'. 2010. 191 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

SUBBOTIN Sergey Lvovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Structures and Constructions, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sbtn@yandex.ru

GAVRILENKO Alexey Vladimirovich – Assistant of the Department of Structures and Constructions, Assistant of the Department of Constructions and Structures, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: GavrilenkoAV@tstu.tver.ru

KAZIMIROV Sergei Igorevich – Design Engineer, KB «Kalinin» LLC, 8, Novaya Zarya st., Tver, Russia. E-mail: kazimirow97@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Subbotin S.L., Gavrilenko A.V., Kazimirov S.I. Bending test of a metal-wood panel with flat galvanized sheet walls stiffened by wooden ribs // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 3 (15), pp. 5–11.

УДК 691.539.216

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО КАРБОНАТНОГО БЕТОНА

В.В. Белов, Т.Р. Баркая, П.В. Куляев

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Белов В.В., Баркая Т.Р.,
Куляев П.В., 2022

Аннотация. Указано, что мелкозернистые карбонатные бетоны – это достаточно востребованный в настоящее время материал, обладающий хорошими показателями по трещиностойкости, морозостойкости, критериям долговечности и надежности строительных материалов и конструкций. Рассмотрена актуальная задача поиска экономически и экологически оправданных способов повышения деформативных свойств