

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 692.522.2

УЧЕТ СТАДИЙНОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОНОЛИТНЫХ ПОСТНАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Т.Р. Баркая¹, А.В. Гавриленко¹, А.В. Левиков¹, А.В. Шевкина²**¹Тверской государственный технический университет (г. Тверь)**²ООО «ПСК Позитив» (г. Тверь)*© Баркая Т.Р., Гавриленко А.В.,
Левиков А.В., Шевкина А.В., 2021

Аннотация. В статье представлены общие подходы к назначению усилий обжатия при расчете и конструировании постнапряженных монолитных конструкций с учетом технологии их дальнейшего возведения. Показаны взаимосвязи этапов возведения и эксплуатации и технико-экономических параметров конструктивного решения. Рассмотрено взаимное влияние конструкторских и технологических решений на основе анализа ряда соответствующих факторов, определяющих оптимальные показатели реализации проекта в целом.

Ключевые слова: железобетон, постнапряжение, напряжение без сцепления, моностренд, смятие бетона, монолитные работы, выдерживание бетона.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-4-19-26

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность применения постнапряженных плит в монолитном строительстве уже давно не вызывает сомнений и не нуждается в обосновании. Более чем полувековой зарубежный опыт практического применения и сложившаяся на сегодняшний день значительная экспериментально-теоретическая база проектирования создали предпосылки для повсеместного внедрения этих систем на практике, что в большинстве западных стран подкрепляется введением в национальные стандарты соответствующих правил проектирования и нормативно-технической документации [1]. Интерес к системам постнапряжения на постсоветском пространстве также растет. Так, в Беларуси нормы проектирования для напряженных конструкций без сцепления арматуры с бетоном появились еще в 2009 году, а в России в 2019 году было введено в действие соответствующее методическое пособие [2] (хотя и значительно в меньшем объеме). До этого отечественные проектировщики в качестве норматива могли использовать актуализированную версию СНиП 2.05.03-84 – «СП 35.13330.2011. Мосты и трубы», применение которой для проектирования конструкций зданий представляется не вполне корректным.

Тем не менее доступная широкому кругу инженеров научно-техническая литература в сочетании с широко применяемыми программно-вычислительными средствами

дает возможность реализовывать проекты с использованием постнапряженных систем и в условиях российского нормативно-технического регулирования.

Однако несмотря на то, что многие методики расчета постнапряженных элементов многократно апробированы [3–5] и разработано большое число конструктивных решений, которые могут применяться в качестве типовых, а технологии возведения достаточно просты и доступны [6], остались вопросы, требующие проработки и дополнительных исследований. При рассмотрении аспектов надежности и долговечности мы неминуемо сталкиваемся с практически полным отсутствием нормативной документации, определяющей значения параметров, обеспечивающие огнестойкость, сохранность при агрессивных воздействиях, «живучесть» конструктивных систем при аварийных ситуациях, особенно при так называемом «прогрессирующем обрушении». С точки зрения технолога, актуальными являются вопросы нормирования трудо- и материалоемкости, определения потребности в средствах механизации при разработке проектов производства работ и организации строительства.

Такие же сложности возникают при составлении сметной документации. Особое место в этом списке занимают проблемы расчета и конструирования, связанные со стадийностью нагружения конструкций. В любой предварительно напряженной конструкции нагрузки при изготовлении (возведении) и эксплуатации могут иметь значительные отличия, что зачастую определяет диаметрально противоположное распределение усилий в элементе на этих этапах. Причем если в условиях заводского изготовления обжатие создается, как правило, в бетоне, имеющем характеристики, близкие к проектному классу, то при монолитном строительстве такой фактор, как сроки производства работ, в немалой степени определяющий экономические показатели, практически не оставляет для этого никакой возможности. Таким образом, натяжение арматуры производят на «созревающий» бетон. Тем самым создается начальное напряженно-деформированное состояние, которое в дальнейшем, после приложения эксплуатационных нагрузок, может повлиять как на расчетную схему, так и на итоговую несущую способность, трещиностойкость и деформативность конструкции. Очевидно, что это обстоятельство должно учитываться уже на этапе проектирования конструкции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эффективность применения конструктивных систем с постнапряжением определяется с учетом ряда достаточно простых принципов и условий. В первую очередь это следующие соображения расчетно-конструктивного характера:

- максимальное использование прочностных свойств напрягаемых канатов;
- снижение веса конструкций путем уменьшения размеров бетонных сечений за счет повышенной жесткости напряженных конструкций;
- минимизация расхода ненапрягаемой арматуры за счет оптимального распределения монострендов;
- повышение качества планировочных решений увеличением пролетов балок и плит и, как следствие, уменьшением количества вертикальных несущих элементов (стен, колонн и пр.).

С другой стороны, не менее важными являются и вопросы экономичности практической реализации проектных решений, которые в основном сводятся к снижению трудоемкости процессов и сокращению сроков выполнения работ. И если такие аспекты конструктивных решений, как снижение объема бетона и металлоемкости, вполне

согласуются с эффективностью организационно-технологического порядка, то некоторые другие принципы расчета и конструирования сталкиваются здесь с существенными противоречиями. Эти проблемы связаны с вопросами полного использования ресурса наиболее дорогостоящего элемента системы постнапряжения – моностренда.

Отечественные и зарубежные нормы допускают натяжение каната, при котором используется до 80 % его нормативной прочности R_{sn} . Однако это удается осуществить далеко не всегда в силу недостаточной прочности бетона как к моменту создания обжатия, так и в проектном возрасте. Это связано с особенностями работы бетона на смятие в зонах анкеровки канатов. Проблема смятия опорной зоны еще более усугубляется при использовании в перекрытиях и других относительно небольших по площади сечения конструкциях полосового армирования и, соответственно, концентрацией нескольких монострендов в пучок – так называемый мультистренд. Следует отметить, что этот прием, снижающий в том числе и трудоемкость армирования, нашел широкое применение в мостостроении и других крупногабаритных конструкциях, однако его реализация в конструкциях зданий связана с объективными трудностями. Вопросы оптимального сочетания пар «бетон – моностренд» с учетом их классов по прочности рассмотрена в работе [7]. Однако есть еще ряд подобных нюансов, требующих более подробного анализа.

Использование прочности каната ограничивается не только смятием бетона, но и особенностями работы системы в целом, которые зависят как от текущей прочности и жесткости элементов, монтажных нагрузок, так и от натекания потерь преднапряжения. Рассмотрим эти особенности на примере. Для армирования монолитной плиты перекрытия из бетона класса В30 используются напрягаемые канаты К7-15,2-1650/1860-ТУ100 с номинальным диаметром 15,2 мм и прочностью 1 860 Н/мм² с шагом раскладки 170 мм. Максимальное усилие, приложенное на конец напрягаемой арматуры в момент натяжения, определяется по формуле

$$P_{max} = G_{p\ max} \cdot A_p k_1,$$

где $G_{p\ max}$ – максимальное напряжение, приложенное к напрягающему элементу; A_p – площадь сечения напрягающего элемента; $k_1 = 0,8$ – рекомендуемый коэффициент уровня натяжения [5]. Вычисленное значение составит $P = 202,4$ кН/канат. Приложение такой величины проектного обжатия можно обеспечить при наборе бетоном прочности, соответствующей классу В27,5. В условиях выдерживания при температуре 10 °С эту прочность можно прогнозировать лишь на срок, не превышающий 24 суток. Следовательно, даже при минимальной оборачиваемости опалубки проектное натяжение придется создавать уже после распалубки конструкции. Очевидно, что распалубка напрягаемых плит возможна только после создания преднапряжения, которое обеспечит работоспособность плиты на восприятие монтажной нагрузки. В противном случае придется значительно повышать ненапрягаемое армирование, выступающее в качестве рабочей арматуры на этапе возведения.

Наиболее эффективным способом оптимизации работ с технологической точки зрения с одновременным обеспечением достаточной прочности конструкции является поэтапное натяжение канатов. В большинстве случаев для реализации постнапряжения оказывается достаточно двух этапов натяжения. Для полного использования прочности каната на первом этапе необходимо задать максимально допустимое значение усилия натяжения каната: практически все потери зависят от величины усилия натяжения, однако потери, возникшие на первом этапе, могут быть полностью компенсированы при

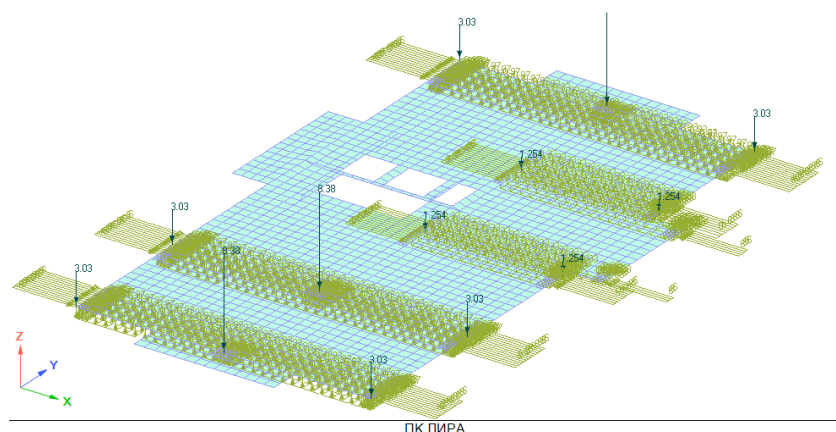
натяжении на втором этапе. Соответственно, чем выше усилие натяжения на первом этапе, тем большее количество потерь возможно компенсировать в процессе натяжения канатов на втором этапе. С другой стороны, усилие натяжения первого этапа должно быть достаточным для обеспечения прочности и трещиностойкости плиты в момент распалубки при минимальном количестве ненапрягаемой арматуры. Поэтому целесообразно назначать значение усилий первого этапа наибольшим, но допустимым из условия смятия бетона и его передаточной прочности.

При этом следует контролировать не только прочность плиты, но и деформации плиты, бетон которой не достиг проектной прочности. Очевидно, что дальнейший набор прочности бетона будет происходить в условиях ее деформированного состояния, т.е. прогибы, возникшие после первого натяжения и последующей распалубки, следует относить к необратимым и рассматривать как начальное несовершенство. После приложения полной эксплуатационной нагрузки общая величина прогибов будет складываться из величины начального прогиба и приращения прогиба от внешней нагрузки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все перечисленные факторы в их взаимосвязи с последовательностью нагружения конструкции были рассмотрены в работе [8].

Для упомянутой выше плиты перекрытия здания назначались этапы натяжения и проверялось выполнение всех указанных условий расчетно-конструкторского и технологического характера. Усилие первого этапа должно было обеспечить восприятие монтажной нагрузки, учитывающей вес оборудования и рабочих при производстве работ (100 кг/м^2), и нагрузки от собственного веса напрягаемой конструкции. При этом величина усилия не превышала прочности бетона на смятие и оптимальных параметров, связанных с продолжительностью возведения конструкции в условиях строительной площадки. Затем определялись потери напряжения на этом этапе и вычислялось приращение усилия для второго этапа. Величина натяжения второго этапа обеспечивала компенсацию большей части потерь первого при полном использовании механических свойств каната, но не более значений, найденных по вышеприведенной формуле. Определялся также безопасный срок выполнения каждого этапа. Для каждого этапа с учетом соответствующих загружений в ПК LIRASoft была сформирована расчетная схема (рисунок).



Расчетная схема постнатяженной плиты в ПК LIRA Soft

По результатам расчета были получены параметры по несущей способности и деформациям плиты, которые были сопоставлены с аналогичными результатами расчета той же конструкции при одноэтапном загрузении (таблица).

**Усилия натяжения и основные результаты расчета перекрытия
при различных комбинациях этапов натяжения арматуры**

Первый этап					Второй этап				Проектное состояние	
Возраст, сут	$P^1_{нач},$ кН	$P^1_{кон},$ кН	M_{max}/M_{ult}	$f,$ мм	$P^2_{нач},$ кН	$P^2_{кон},$ кН	M_{max}/M_{ult}	$f,$ мм	$P_{полн},$ кН	$f,$ мм
24	202	123,9	1,06	23,89	—	—	—	—	123,9	23,89
3	40	34,41	0,6	17,89	180	130,1	0,46	13,72	164,51	31,60
3	60	53,11	0,76	6,51	160	98,7	0,78	5,38	146,82	11,89

Из приведенных данных видно, что одноэтапное натяжение из-за высоких потерь не позволяет обеспечить требуемой несущей способности и характеризуется относительно высоким уровнем деформаций. Кроме того, как уже было указано, такое натяжение требует значительного времени выдерживания бетона и потому однозначно неприемлемо с позиций производства работ. Двухэтапное натяжение на 40 и 180 кН соответственно обеспечивает все технологические и конструктивные показатели, за исключением суммарного прогиба плиты по итогам загрузения на этапах изготовления и эксплуатации, расчетное значение которого превышает нормативное. Увеличение натяжения на первом этапе до 60 кН дает положительный результат в отношении всех рассматриваемых параметров. Дальнейшее повышение усилия первичного обжатия приводит к нежелательному росту отрицательных выгибов плиты. При эксплуатации их компенсация будет зависеть от фактического загрузения конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при проектировании монолитных плит с постнатяжением уже на этапе назначения напрягаемого армирования следует учитывать конкретные условия строительства с параллельной проработкой принципиальной технологической схемы, учитывающей такие факторы, как обеспеченность технологической оснасткой, механизацией, трудовыми ресурсами, а также температурно-климатические условия возведения конструкций. Учет вышеупомянутых факторов позволяет получать эффективные конструктивные решения как с позиций материалоемкости, так и с точки зрения технологичности возведения. Очевидно, что задача получения оптимального решения является многофакторной, но при этом достаточно просто алгоритмизируется. Поэтому перспективным представляется ее решение путем перебора вариантов возможных комбинаций различных значений параметров и выбора наилучшего по конкретным критериям с помощью специализированных продуктов САПР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cross E. Post-tensioning in Building Structures // *Arts & Humanities Architecture*. <https://studylib.net/doc/18487085/post-tensioning-in-building-structures> (дата обращения: 19.10.2021).

2. Конструкции железобетонные монолитные с напрягаемой арматурой без сцепления с бетоном. Правила проектирования: методическое пособие. М.: НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. 2017. 109 с.
3. Barkaya T.R., Gavrilenko A.V. Finite element modelling of unbonded post-tensioned simply supported beam // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. 012131. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012131
4. Gavrilenko A.V., Barkaya T.R. Experimental and theoretical study of post-tensioned unbonded beams // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 1030.
5. Портаев Д.В. Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий. М.: Ассоциация строительных вузов. 2011. 248 с.
6. Гавриленко А.В., Абдуллина Ю.Р., Баркая Т.Р. Особенности технологии преднапряжения железобетонных конструкций в условиях производства строительно-монтажных работ // *Саморазвивающаяся среда технического вуза: научные исследования и экспериментальные разработки: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: ТвГТУ. 2020. С. 72–78.
7. 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.
8. Шевкина А.В. Многоквартирный жилой дом по адресу: г. Тверь, ул. Макарова, д. 4, к. 2 с постнапряжением перекрытий: магистерская дис. Тверь: ТвГТУ. 2021. 156 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАРКАЯ Темур Рауфович – канд. техн. 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

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

ЛЕВИКОВ Александр Валерьевич – канд. филос. наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: leviksa@mail.ru

ШЕВКИНА Анна Владимировна – инженер-проектировщик, ООО «Проектно-строительная компания Позитив», 170019, Россия, г. Тверь, ул. Академика Туполева, д. 124 к. 1, помещ. 2. E-mail: a_shevkina@list.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Баркая Т.Р., Гавриленко А.В., Левигов 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. 19–26.

**CONSIDERATION OF ERECTION STAGE IN DESIGNING MONOLITHIC
POST-STRAINED STRUCTURES****T.R. Barkaya¹, A.V. Gavrilenko¹, A.V. Levikov¹, A.V. Shevkina²**¹*Tver State Technical University (Tver)*²*ООО «PSK Positive» (Tver)*

Abstract. The article presents general approaches to the assignment of compression forces in the calculation and design of post-stressed monolithic structures, taking into account the technology of their further construction. The interrelationships of the stages of construction and operation and the technical and economic parameters of the design solution are shown. The mutual influence of design and technological solutions is considered based on the analysis of a number of relevant factors that determine the optimal performance of the project as a whole.

Keywords: reinforced concrete, post stress, stress without coupling, monostrend, concrete crumpling, monolithic works, concrete holding.

REFERENCES

1. Cross E. Post-tensioning in Building Structures // *Arts & Humanities Architecture*. <https://studylib.net/doc/18487085/post-tensioning-in-building-structures> (date of access: 19.10.2021).
2. Reinforced concrete monolithic structures with tensioned reinforcement without adhesion to concrete. Design rules: methodical manual. Moscow: NIIZhB im. A.A. Gvozdeva. 2017. 109 p.
3. Barkaya T.R., Gavrilenko A.V. Finite element modelling of unbonded post-tensioned simply supported beam. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. 012131. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012131
4. Gavrilenko A.V., Barkaya T.R. Experimental and theoretical study of post-tensioned unbonded beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 1030.
5. Portaev D.V. Raschet i konstruirovaniye monolitnykh prednapryazhennykh konstrukcij grazhdanskih zdaniy [Calculation and construction of monolithic prestressed structures of civil buildings]. M.: Associaciya stroitel'nykh vuzov. 2011. 248 p.
6. Gavrilenko A.V., Abdullina Yu.R., Barkaya T.R. Features of the technology of prestressing reinforced concrete structures in the conditions of construction and installation works. *Self-developing environment of a technical university: scientific research and experimental developments: Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference*. Tver: Tver State Technical University. 2020, pp. 72–78. (In Russian).
7. 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).
8. Shevkina A.V. Apartment house at the address: Tver, Makarova str., 4, room 2 with post-tension ceilings: master's thesis. Tver State Technical University. Tver: Tver State Technical University. 2021. 156 p. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

GAVRILENKO Alexey Vladimirovich – Assistant of the Department of Structures and Constructions, Assistant of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical

University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: GavrilenkoAV@tstu.tver.ru

LEVIKOV Alexander Valeryevich – Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: leviksa@mail.ru

SHEVKINA Anna Vladimirovna – design engineer, LLC «Design and construction company Positive», 170019, Russia, Tver, Akademika Tupoleva str., 124 building 1, room 2. E-mail: a_shevkina@list.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Gavrilenko A.V., Levikov A.V., Shevkina A.V. Consideration of erection stage in designing monolithic post-strained structures // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 4 (12), pp. 19–26.

УДК 691-431

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КЕРАМЗИТОБЕТОННЫХ БЛОКОВ ТОРГОВОЙ МАРКИ «БАЛАЕВ БЛОК»

А.В. Гавриленко, А.В. Левиков, Т.Р. Баркая, Д.А. Ханыгин
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Гавриленко А.В., Левиков А.В.,
Баркая Т.Р., Ханыгин Д.А., 2021

Аннотация. В статье приводится описание трехслойных пазогребневых блоков, реализуемых под торговой маркой «Балаев блок». Приведены их основные преимущества и недостатки. Показано, что сложности с устройством перемычек над проемами в стенах индивидуальных жилых зданий, возводимых из данных блоков, обусловлены недостаточной прочностью среднего слоя из керамзитобетона при действии местных сжимающих нагрузок. Приведены результаты прочностных испытаний трех образцов блоков при различном положении и размерах штампа. Сделан вывод, что прочность керамзитобетонного слоя в ряде случаев оказывается достаточной для опирания перемычек на блок без устройства распределительных подушек.

Ключевые слова: керамзитобетон, стеновые блоки, испытания на местное сжатие.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-4-26-32

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сохраняется интерес частных и корпоративных застройщиков к стенам, выполненным из достаточно прочных и стойких к атмосферным воздействиям блоков, являющихся в то же время вполне эффективными в плане теплотехнических свойств.