

А. А. ПИЩУЛЁВ
Д. А. ПАНФИЛОВ
Ю. В. ЖИЛЬЦОВ
Я. А. БУЗОВСКАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОСТНАПРЯГАЕМЫХ КАНАТОВ

RESEARCH OF THE WORK OF REINFORCED CONCRETE BENDED ELEMENTS WITH THE USE OF POST-TENSIONED ROPES

Рассмотрено исследование натуральных образцов изгибаемых железобетонных балок с применением напрягаемых канатов в синтетической оболочке с заполнением смазкой. Целью исследований является испытание железобетонных балок с применением постнапрягаемых канатов для оценки несущей способности и жесткости. Приведены экспериментальные результаты исследований на изгибаемых образцах с натяжением канатов и без канатов. Исследование на натуральных образцах выявило ряд особенностей работы изгибаемых балок с постнапрягаемым канатом. Применение постнапрягаемого каната без сцепления с бетоном позволяет более равномерно распределить развитие нормальных трещин и уменьшить ширину раскрытия трещин. Предварительное напряжение канатной арматуры повышает несущую способность зоны поперечного изгиба.

Ключевые слова: изгибаемые элементы, нормальное сечение, зона поперечного изгиба, предварительное натяжение арматуры, постнапрягаемые канаты

Использование предварительного напряжения армирования в железобетонных конструкциях позволяет снизить расход стали за счет применения высокопрочной арматуры и повысить жесткость конструкции, исключить или уменьшить ширину раскрытия трещин, увеличить пролеты, повысить несущую способность наклонного сечения изгибаемых элементов [1 – 4].

Основными способами натяжения предварительно напрягаемой арматуры является натяжение на упоры и на бетон. Метод предварительного натяжения на упоры в основном используется в заводских условиях с последующим применением прогрева или пропарки бетона. Метод натяжения предварительно напрягаемой арматуры с натяжением на бетон используется непосредственно на строительной площадке после набора расчетной прочности.

The study of full-scale samples of bent reinforced concrete beams using tensioned ropes in a synthetic shell filled with grease is considered in the article. The purpose of the research is to test reinforced concrete beams using post-tensioned ropes to assess the load-bearing capacity and stiffness. Experimental results of studies on bent samples with rope tension and without ropes are presented. The study on full-scale samples revealed a number of features of the work of bent beams with post-tensioned ropes. The use of a post-tensioned rope without coupling with concrete allows for a more evenly distributed development of normal cracks and reduces the width of the crack opening. Pre-tension cable reinforcement increases the load carrying capacity of the area of the transverse bend.

Keywords: bending elements, normal cross-section, cross-bending zone, pre-tensioning of reinforcement, post-tensioning ropes

Метод натяжения предварительно напрягаемой арматуры на бетон разделяется на два вида:

1) с применением напрягаемого каната без оболочки, который протягивается через каналообразователь и после натяжения канал инъецируется, обеспечивая сцепление по длине с бетоном;

2) с применением напрягаемого каната с полиэтиленовой оболочкой, заполненной смазкой, который устанавливается до бетонирования; натяжение осуществляется на бетон с крепежом по торцам анкерами, при этом сцепление каната с бетоном по длине не обеспечивается [4 – 10].

Применение канатной арматуры с полиэтиленовой оболочкой получило широкое распространение за границей (prEN 1992-1-1-2009 Eurocode 2, ACI 318+08: Building Code

Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, 2008). В Европе и США с применением каната в оболочке возведено большое количество зданий и сооружений. В Российской Федерации использование каната с оболочкой имеет малое распространение.

Применение канатной арматуры с оболочкой имеет преимущество над обычным, заключающееся в простоте установки каната без каналаобразователя сложной формы с последующим его натяжением. Рекомендации по расчету предварительно напрягаемых конструкций содержатся в СП 63.13330.2012, СП 52-102-2004, но они недостаточны для применения к расчету канатной арматуры без обеспечения сцепления с бетоном.

Применение арматурных канатов в оболочке с постнапряжением в железобетонных конструкциях сложно в конструктивном решении, так как необходимо учитывать большое количество факторов на этапе проектирования, требующих проведения исследований.

Целью исследования является изучение работы стальных напрягаемых канатов с полиэтиленовой оболочкой в железобетонных балках без обеспечения сцепления с бетоном.

Задачи исследования – определение разрушающей нагрузки экспериментальных образцов, определение момента образования

и ширины раскрытия трещин, прогибов балок, изучение напряженно деформированного состояния изгибаемых образцов, анализ и сопоставление полученных результатов испытаний.

Образцы представляли собой железобетонные балки, изготовленные из монолитного бетона. Габаритные размеры образцов: длина 3,9 м, высота 400 мм, ширина 200 мм. Бетон опытных образцов на момент проведения испытаний соответствовал классу В25. Армирование образцов осуществлялось арматурой класса А500С. В качестве напрягаемой арматуры использовался стальной канат К7 диаметром 15 мм, установленный до бетонирования по параболической кривой.

Армирование образца производилось в соответствии с рис. 1: продольное армирование по верхней грани 2 Ø12 А-500С, защитный слой 40 мм; продольное армирование по нижней грани 2 Ø12 А-500С, защитный слой 50 мм; продольное армирование по нижней грани 1 Ø16 А-500С, защитный слой 50 мм в балке без каната, в балке с канатной арматурой 1 Ø15 К-7; поперечное армирование Ø 8 А240 с шагом 100 мм.

Анкеровка ненапрягаемой арматуры на опоре обеспечивалась приваркой к закладной детали из листа 150×200×10 мм. На опорных участках устанавливался стальной лист 80×200×10 мм.

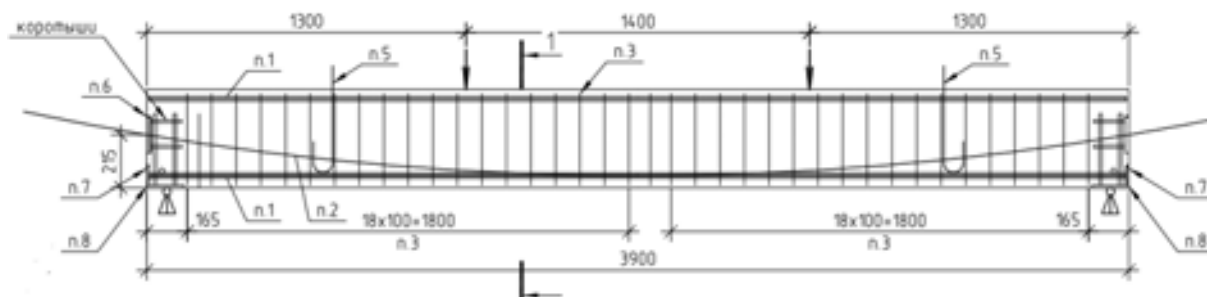


Рис. 1. Армирование опытного образца

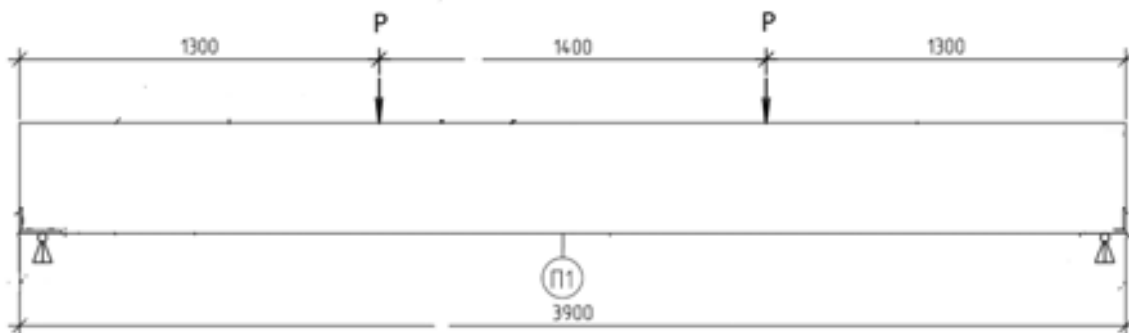


Рис. 2. Расчетная схема опытного образца

При достижении прочности бетона проектного класса производилось натяжение каната на бетон с анкерровкой на торцах образца анкерными устройствами.

Расчетная схема опытного образца представлена на рис. 2. Загружение предусматривалось двумя сосредоточенными силами с пролетом среза образца 1200 мм.

Испытание производилось на силовом полу, нагрузка прикладывалась двумя домкратами ДГ-25, подключенными к гидравлической станции. Нагрузка фиксировалась образцовым манометром.

Для исследования напряженно-деформированного состояния на бетонную поверхность по высоте сечения в пролете были наклеены тензометрические датчики, показания с которых фиксировались тензометрической станцией ТК-52. Прогиб образца фиксировался по показаниям прогибомера Аистова 6-ПАО, установленного в середине пролета.

Натяжение стального каната на бетон осуществлялось гидравлическим домкратом. Предварительное усилие натяжения составляло 0,8 кН от нормативного сопротивления, что соответствует усилию, равному 96 кН. После натяжения каната на бетон образец получил обратный выгиб, равный 0,6 мм. Опытный образец при создании натяжения каната представлен на рис. 3.

Результаты экспериментальных исследований образца с напрягаемой арматурой. Нагружение образца осуществлялось ступенями по 16,4 кН. На каждой ступени фиксировались показания прогибомера, образование трещин и их ширина раскрытия, измерялись деформации по тензорезистарам.

Первые нормальные трещины в образце были зафиксированы на 4-й ступени нагружения, нагрузка составляла $P=67$ кН, ширина раскрытия при этом была равна 0,05 мм, прогиб образца – 3,19 мм. На 5-й ступени при нагрузке $P=84$ кН ширина раскрытия нормальной тре-

щины составила 0,1 мм, прогиб – 6,24 мм. На 7-й ступени при нагрузке $P=116$ кН ширина раскрытия нормальных трещин составила 0,25 мм, прогиб – 13,59 мм. Разрушение образца произошло на 9-й ступени при нагрузке $P=148$ кН, ширина раскрытия трещин при этом превысила 2 мм. Образец разрушился в середине пролета по нормальному сечению с раздроблением сжатой зоны бетона. Характер разрушения образца соответствовал пластическому вследствие значительного поворота железобетонных блоков. Образец разрушился при выдержке под нагрузкой, при этом прогиб образца составил 45,79 мм. Разрушение образца представлено на рис. 4.

По полученным результатам испытания образца для изучения напряженно-деформированного состояния бетона в нормальном сечении построены графики распределения деформаций в бетоне по высоте сечения (рис. 5, 6) и график прогибов в середине пролета от нагрузки (рис. 7).

Результаты экспериментальных исследований образца без напрягаемой арматуры. При нагрузке 24 кН прогиб образца составил 1,74 мм. Образование нормальной трещины произошло при нагрузке $P=33$ кН. Нормальные трещины достигли ширины раскрытия трещин 0,3 мм при нагрузке 67 кН, прогиб при этом составил 6,69 мм. Наклонные трещины образовались в образце при нагрузке 108 кН, прогиб при этом составил 13,38 мм. При нагрузке 140 кН ширина раскрытия нормальной трещины составила 1,5 мм, прогиб – 37,39 мм. Разрушение произошло при нагрузке 148 кН, на момент разрушения прогиб составил 70 мм.

Образец с применением напряженного каната К-7 $\varnothing 15$ мм по площади сечения сопоставим с арматурным стержнем армирования $\varnothing 16$ А-500С. В процессе испытания образцов установлено, что при практически одинаковом армировании несущая способность конструкций сопоставима, но образцы обладают различной



Рис. 3. Натяжение каната на бетон опытного образца



Рис. 4. Разрушение опытного образца по нормальному сечению

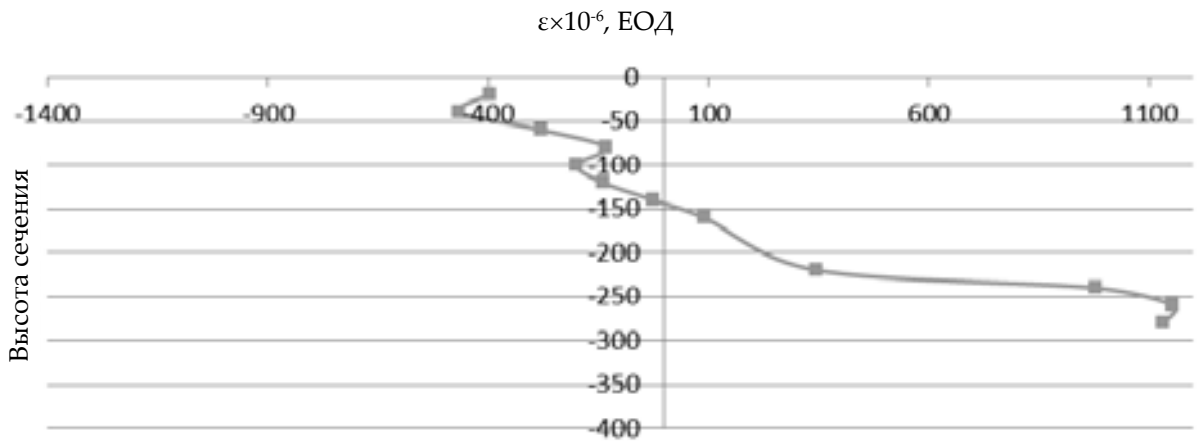


Рис. 5. Деформации в бетоне по высоте сечения при нагрузке 67 кН

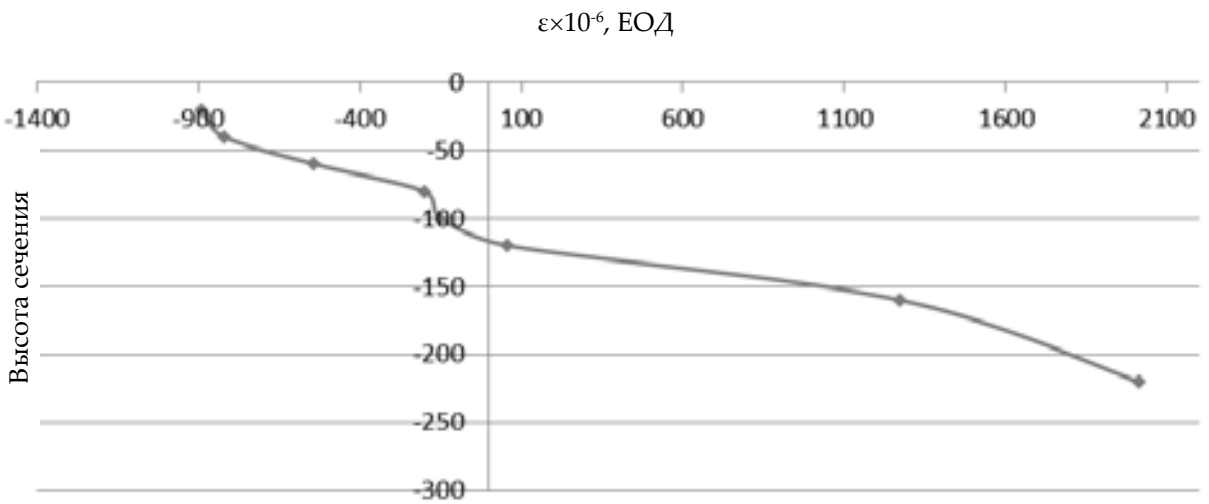


Рис. 6. Деформации в бетоне по высоте сечения при нагрузке 116 кН

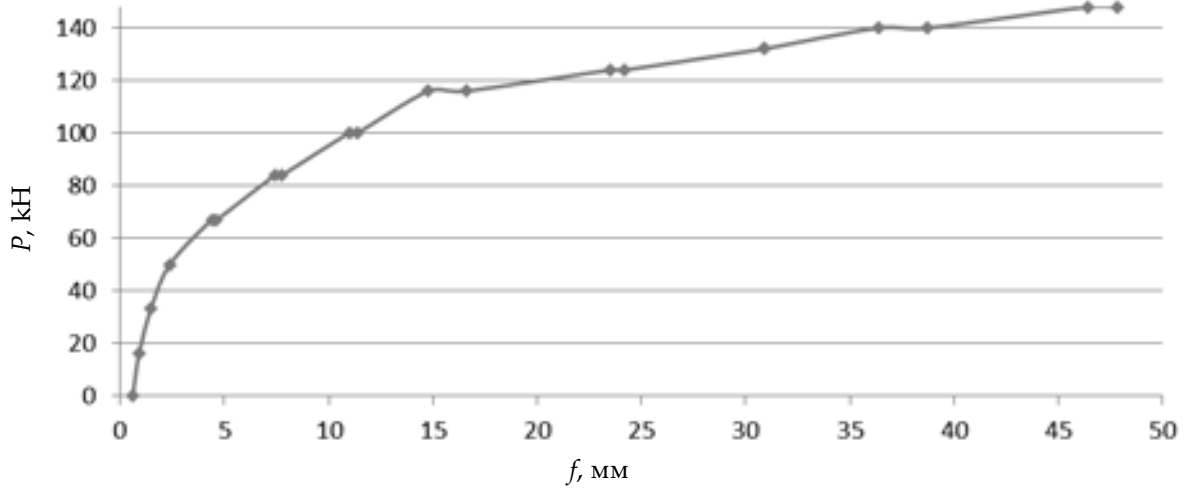


Рис. 7. График зависимости прогиба образца от нагрузки с напрягаемым канатом

трещиностойкостью. Различаются прогибы образцов до образования нормальных трещин и до достижения текучести продольного армирования.

По результатам анализа относительных деформаций установлено, что до образования нормальных трещин наблюдается существенно меньше деформаций бетона в постнапряженном образце. После образования нормальных трещин деформации бетона примерно одинаковы.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

Напряженный элемент с канатной арматурой, расположенной по параболе, изгибается более равномерно и нормальные трещины образуются не только в зоне чистого изгиба вследствие отсутствия сцепления.

Образец без напряжения показывает классическую картину трещинообразования с образованием нормальных трещин в зоне поперечного изгиба.

Применение напрягаемого армирования в форме параболы повышает несущую способность наклонного сечения, позволяет добиться более равномерного изгиба образца с распределением нормальных трещин по длине пролета.

В образце с предварительно напряженным канатом нормальные трещины распределяются по длине элемента более равномерно, что приводит к снижению концентрации сжимающих деформаций в бетоне над наклонной трещиной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лихов З.Р. Совершенствование преднапряженных железобетонных стропильных балок и методов их расчета: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Ростов н/Д, 2004. 157 с.
2. Осипов М.В. Железобетонные балки с переменным преднапряжением вдоль арматурных стержней: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Ростов н/Д, 2005. 165 с.
3. Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжелого бетона по прочности, трещиностойкости и деформациям. М.: АСВ, 2010. 348 с.
4. Тошин Д.С. Работа бетона при усилении конструкции под нагрузкой // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 3. С. 66–68.
5. Мадатян С.А. Новые технологии и материалы для арматурных работ в монолитном железобетоне // Технологии бетонов. 2006. № 3. С. 52–54.
6. Кишиневская Е.В. Усиление строительных конструкций с использованием постнапряженного железобетона // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 3. С. 29–32.
7. Портаев Д.В. Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий. М.: Издательство АСВ, 2011. 248 с.
8. Panfilov D.A., Pishchulev A.A., Zhiltsov Yu.V. The use of prestressed fiberglass to reinforce concrete bending elements. MATEC Web of Conferences 117, 00132 (2017)
9. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
10. Филатов В.Б. Сравнительная оценка прочности железобетонных элементов при поперечном изгибе по различным методикам // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия: сборник докладов Международной научной конференции. М.: НИУ МГСУ, 2016. С. 484–488.

REFERENCES

1. Likhov Z.R. *Sovershenstvovaniye prednapryazhennykh zhelezobetonnykh stropil'nykh balok i metodov ikh rascheta*. Cand, Diss. [Perfection of prestressed reinforced concrete rafter beams and methods of their calculation. Cand. Diss.]. Rostov-on-Don, 2004. 157 p.
2. Osipov M.V. *Zhelezobetonnyye balki s peremennym prednapryazheniyem vdol' armaturnykh stержней*. Cand, Diss. [Reinforced concrete beams with variable prestress along reinforcing bars. Cand. Diss.]. Rostov-on-Don, 2005. 165 p.
3. Kodysh E.N., Nikitin I.K., Trekin N.N. *Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy iz tyazhelogo betona po prochnosti, treshchinostoykosti i deformatsiyam* [Calculation of reinforced concrete structures made of heavy concrete for strength, crack resistance and deformation]. M.: DIA, 2010. 348 p.
4. Toshin D.S., Anisimova M.P. Search for the optimal way to implement iterative approximation when calculating by the deformation model. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2016, no.17, pp. 25-29. (in Russian)
5. Madatyan S.A. New technologies and materials for reinforcing works in monolithic reinforced concrete. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologie], 2006, no. 3, pp. 52-54. (in Russian)
6. Kishinevskaya Ye.V. Strengthening building structures using post-stressed reinforced concrete. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal* [Engineering and Construction Journal], 2009, no. 3, pp. 29-32. (in Russian)
7. Portaev D.V. *Raschet i konstruirovaniye monolitnykh prednapryazhennykh konstruksiy grazhdanskikh zdaniy* [Calculation and design of monolithic prestressed structures of civil buildings]. M.: DIA Publishing House, 2011. 248 p.
8. Panfilov D.A., Pishchulev A.A., Zhiltsov Yu.V. The use of prestressed fiberglass to reinforce concrete bending elements. MATEC Web of Conferences, 2017, no. 117, 00132.
9. Karpenko N.I. *Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona* [General models of reinforced concrete mechanics]. M.: Stroyizdat, 1996. 416 p.
10. Filatov V.B. Comparative evaluation of the strength of reinforced concrete elements under trans-

verse bending by various methods. *Sovremennye problemy rascheta zhelezobetonnykh konstrukcij, zdaniy i sooruzhenij na avarijnye vozdejstviya: sbornik докладов Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii* [Modern problems of calculating reinforced concrete structures, buildings and structures for emergency impacts: a collection of reports of the International Scientific Conference]. М.: NIU MGSU, 2016, pp. 484-488. (in Russian)

Об авторах:

ПИЩУЛЁВ Александр Анатольевич

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры строительных конструкций
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: pishulev@yandex.ru

ПАНФИЛОВ Денис Александрович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры строительных конструкций
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: panda-w800i@yandex.ru

ЖИЛЬЦОВ Юрий Викторович

старший преподаватель кафедры
строительных конструкций
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: zzilz@mail.ru

БУЗОВСКАЯ Яна Александровна

ассистент кафедры строительных конструкций
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: jana69.71.95@mail.ru

PISHCHULEV Alexander A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the
Building Structures Chair
Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: pishulev@yandex.ru

PANFILOV Denis A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the
Building Structures Chair
Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: panda-w800i@yandex.ru

ZHILTSOV Yury V.

Senior Lecturer of the Building Structures Chair
Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: zzilz@mail.ru

BUZOVSKAYA Yana A.

Assistant of the Building Structures Chair
Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: jana69.71.95@mail.ru

Для цитирования: Пищулёв А.А., Панфилов Д.А., Жильцов Ю.В., Бузовская Я.И. Исследование работы железобетонных изгибаемых элементов с применением постнатягаемых канатов // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 1. С. 24–29. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.4.

For citation: Pishchulev A.A., Panfilov D.A., Zhiltsov Yu.V., Buzovskaya Ya.A. Research of the work of reinforced concrete bended elements with the use of post-tensioned ropes. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, Vol. 10, no. 1, Pp. 24–29. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.4.