Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 4 (81), спецвыпуск. С. 44–53.
The Siberian Transport University Bulletin. 2026. No. 4 (81), special issue. P. 44–53.

Научная статья
УДК 624.21
doi:10.52170/1815-9265_2026_81_44

Об особенностях проектирования и испытания зоны передачи нагрузки на бетон в предварительно напряженных конструкциях

Владислав Сергеевич Горячкин [1]✉, **Максим Сергеевич Марченко** [2], **Василий Владимирович Бойко** [3], **Сергей Иванович Герасимов** [4]

[1, 2, 3] «СТС», Москва, Россия
[4] Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия
[1] goryachkin@sts-hydro.ru✉
[2] marchenko@sts-hydro.ru
[3] boiko@sts-hydro.ru
[4] 912267@gmail.com

Аннотация. Проектирование зоны передачи нагрузки на бетон в предварительно напряженных железобетонных конструкциях является трудоемкой и нетривиальной задачей. Для подтверждения расчетных предпосылок требуется проведение соответствующих испытаний с использованием реальных элементов систем предварительного напряжения.

Авторами проведен анализ нового государственного стандарта на системы предварительного напряжения с натяжением на бетон, а также выполнено сравнение его требований с требованиями других российский норм и международных стандартов.

Целью исследования является опытная верификация методики расчета зоны передачи нагрузки на бетон, а также формулирование рекомендаций для проектировщиков на основании текущей и предыдущих работ авторов.

В статье представлены результаты испытаний зоны передачи нагрузки на бетон от анкера с опорным стаканом на 19 прядей (ОС-19) производства ООО «СТС», который наиболее часто используется в пролетных строениях мостов на территории Российской Федерации. Приведены чертежи испытательного образца, его фотографии до и после бетонирования, схемы расположения индикаторов часового типа по граням и тензометрических датчиков на арматурном каркасе. В испытательном образце выполнены измерения деформаций бетона по граням, а также стержней арматурного каркаса при помощи тензометрических датчиков. Проанализирован характер разрушения образца в процессе испытаний.

Представлено краткое описание расчетной модели испытательной железобетонной призмы, а также проведено сравнение экспериментальных данных деформаций бетона и напряжений в арматуре с теоретическими значениями.

Анализ результатов показал достаточную сходимость измеренных показателей, что говорит о достоверности расчетных предпосылок. В то же время обнаружен эффект снижения напряжений в продольной арматуре образца, ранее неизвестный авторам. По итогам данной работы, а также с учетом практического опыта авторов представлены советы для проектировщиков предварительно напряженных железобетонных конструкций, которые отсутствуют в известных российских нормативных документах или строительных нормах.

***Ключевые слова*:** система предварительного напряжения, зона передачи нагрузки на бетон, анкерная зона, косвенное армирование

Для цитирования: Об особенностях проектирования и испытания зоны передачи нагрузки на бетон в предварительно напряженных конструкциях / В. С. Горячкин, М. С. Марченко, В. В. Бойко, С. И. Герасимов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 4 (81), спецвыпуск. С. 44–53. DOI 10.52170/1815-9265_2026_81_44.

Original article

About design and testing of the load transfer zone on concrete in prestressed structures

Vladislav S. Goryachkin [1]✉, **Maxim S. Marchenko** [2], **Vasily V. Boiko** [3], **Sergey I. Gerasimov** [4]

[1, 2, 3] STS, Moscow, Russia
[4] Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia
[1] goryachkin@sts-hydro.ru✉
[2] marchenko@sts-hydro.ru
[3] boiko@sts-hydro.ru
[4] 912267@gmail.com

© Горячкин В. С., Марченко М. С., Бойко В. В., Герасимов С. И., 2026

Abstract. Design the load transfer zone on concrete in prestressed structures is a time-consuming and non-trivial task. To confirm the design assumptions, it is necessary to conduct appropriate tests using kits of the prestressing systems.

The authors have analyzed the new Russian national standard for prestressing systems and compared its requirements with other Russian and international standards.

The purpose of the research is to experimentally verify the methodology for design the load transfer zone in prestressed concrete structures, as well as to prepare recommendations for designers based on the current and previous research by the authors.

The article presents the results of testing the load transfer zone on concrete from an anchorage with a bearing cup for 19 strands (OS-19) manufactured by STS LLC, which is the most commonly used anchor in bridges in the Russian Federation. The article includes drawings of the test specimen, photographs of the specimen before and after concreting, and diagrams of the location of indicators on the faces and strain gauges on the reinforcement. The test specimen was used to measure the deformations of the concrete on the faces and the reinforcement bars using strain gauges. The article analyzes the type of the specimen's failure during the testing process.

The article provides a brief description of the test specimen's finite-element model and compares the experimental data on concrete deformations and reinforcement stresses with the theoretical values.

The analysis of the results shows a sufficient convergence of the measured values, indicating the reliability of the design assumptions. However, the authors have discovered a previously unknown effect of reducing the stresses in the longitudinal reinforcement of the specimen. Based on this work and the authors' practical experience, the article provides recommendations for designers of prestressed structures that are not included in existing Russian standards.

Keywords: prestressing system, load transfer zone, anchorage zone, indirect reinforcement

For citation: Goryachkin V. S., Marchenko M. S., Boiko V. V., Gerasimov S. I. About design and testing of the load transfer zone on concrete in prestressed structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(81):44–53. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_81_44.

Введение

Зона передачи нагрузки на бетон в предварительно напряженных конструкциях является ответственным узлом, который требует особого внимания при проектировании и выполнении строительно-монтажных работ. В состав зоны передачи нагрузки на бетон помимо бетона с назначенной передаточной прочностью также входят элементы системы предварительного напряжения (СПН), включая спираль косвенного армирования.

С 1 сентября 2025 г. на территории Российской Федерации введен в действие новый государственный стандарт на системы предварительного напряжения конструкций с натяжением на бетон [1], в котором приведены следующие требования к опорным закладным деталям (анкерам), косвенному армированию и испытательным железобетонным призмам:

– прочность зоны передачи нагрузки на бетон должна быть не менее 110 % от гарантированного разрывного усилия пучка (F_{pk});

– должна быть достигнута стабилизация относительных деформаций бетона, а также продольных трещин на гранях призмы;

– должны быть выполнены условия по ограничению абсолютного значения ширины раскрытия продольных трещин испытательной железобетонной призмы.

Требования [1] превышают аналогичные значения прочности анкеров и анкерной зоны в 95 % от F_{pk}, приведенные в [2], но требования [1] гармонизированы с требованиями [3], который является общепризнанным стандартом для крупнейших мировых поставщиков СПН.

Ежегодно авторы получают множество обращений от проектных организаций с просьбой разъяснить особенности проектирования зоны передачи нагрузки на бетон в реальных конструкциях, так как в действующих государственных стандартах и строительных нормах [1, 2] отсутствуют практические рекомендации по этому вопросу. В развитие цели исследования авторами поставлена задача систематизировать накопленных опыт [4–6] и сформулировать ответы на наиболее популярные вопросы по указанной теме.

В ранее опубликованных исследованиях авторов [4, 5] представлено сравнение расчетных моделей испытательных железобетонных призм зоны передачи нагрузки на бетон, выполненных в MIDAS FEA NX, с экспериментальных данными, а именно:

– сравнение величины относительных деформаций бетона на продольных гранях железобетонной призмы;

– сравнение величины ширины раскрытия трещин;

– сравнение перемещения опорного стакана относительного граней железобетонной призмы.

В продолжение развития данной темы в соответствии с целью исследования выполнены очередные испытания элементов СПН ООО «СТС» на базе лаборатории АО «ИТП». Отличительной особенностью проведенных испытаний являлось исследование напряженного деформированного состояния арматурного каркаса железобетонной призмы при помощи тензометрических датчиков. Нагружение призмы выполнено при помощи гидравлического домкрата ДН-31. Для контроля усилия, помимо манометра, использовался силоизмеритель ИПС-06. Отметим, что усилия в предварительно напряженных элементах реальных конструкций также возможно определять способами, описанными в [8–10].

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования принята железобетонная призма размерами 470 × 470 × 940 мм, в состав которой входит:

– тяжелый бетон по ГОСТ 26633–2015 с проектным классом прочности на сжатие В40 и передаточной прочностью на сжатие во время испытаний, соответствующей классу $В_ф32$;

– арматурный каркас призмы из арматуры диаметром 10 мм класса А500 по ГОСТ 34028–2016;

– спираль косвенного армирования из арматуры диаметром 18 мм класса А400 по ГОСТ 5781–82 с габаритным внешним диаметром 380 мм и общей длиной 450 мм;

– опорный стакан ОС-19 производства ООО «СТС»;

– пластмассовый переходник ПП-19 производства ООО «СТС»;

– стальной гофрированный каналообразователь диаметром 108 мм производства ООО «СТС».

За F_{pk} в данном испытании принято гарантированное разрывное усилие разрыва пучка из 19 арматурных канатов К7-15,7-1860 по [7], равное 5 301 кН. При разработке рабочей документации на испытательную призму учтены требования [1] и [3]. Фрагмент рабочей документации на испытательную призму и фотография элементов призмы в опалубке до бетонирования приведены на рис. 1 и 2.

Для определения напряженно-деформированного состояния продольных стержней и хомутов арматурного каркаса использованы тензометрические датчики с базой измерений 2 мм, наклеенные на арматуру на трех гранях призмы. Выбор именно трех граней для измерений обусловлен тем, что при горизонтальном расположении призмы в испытательном стенде отсутствовала возможность визуального контроля и измерения деформаций на одной из граней (нижней).

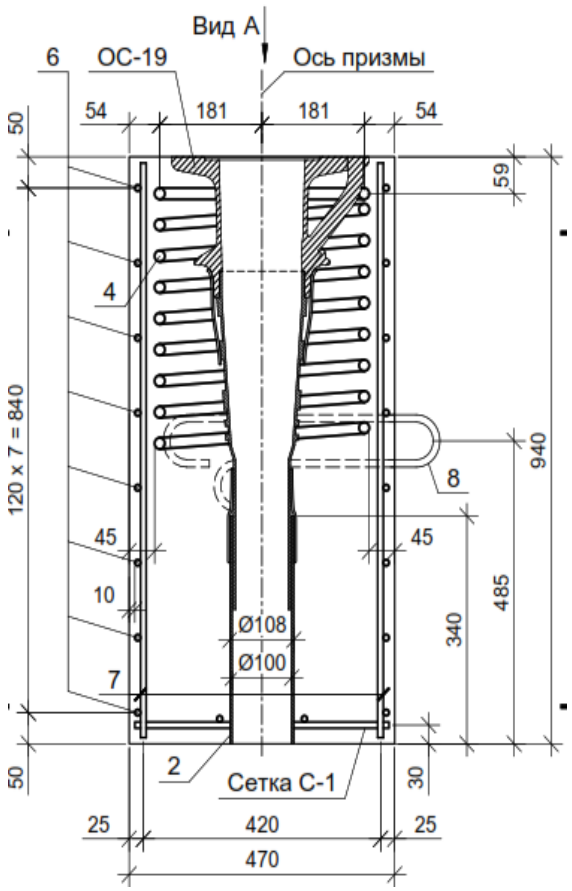


Рис. 1. Фрагмент рабочей документации на железобетонную призму

На каждый продольный стержень по середине грани призмы было наклеено по два тензодатчика. На наиболее напряженные по расчету хомуты также были наклеены два тензодатчика на грань. До проведения испытаний призмы для повторной калибровки тензодатчиков и проверки коэффициента тензометрии были проведены испытания одиночного арматурного стержня того же диаметра и класса, что использовался при изготовлении каркаса призмы. Процесс испытания одиночного стержня с тензодатчиками приведен на рис. 3.

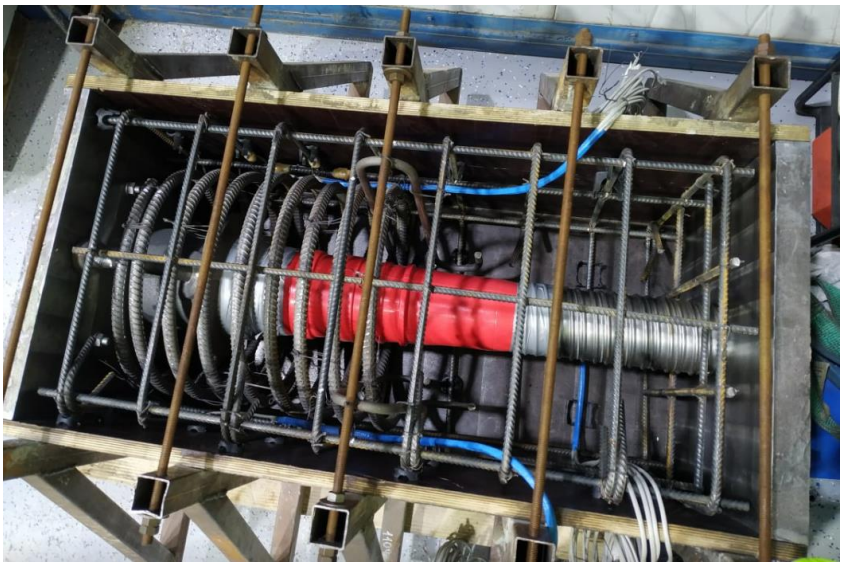


Рис. 2. Арматурный каркас и элементы СПН в опалубке

а) *б*)

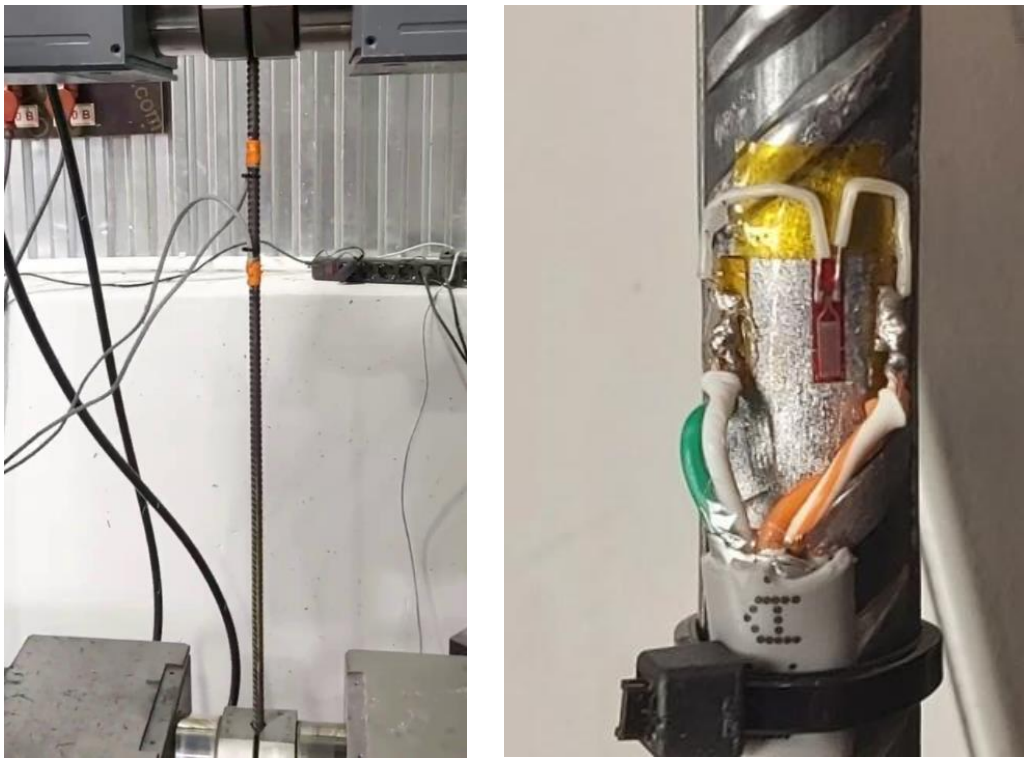


Рис. 3. Процесс испытания арматурного стержня (*а*) с наклеенным тензодатчиком (*б*)

Схема расположения тензодатчиков в арматурном каркасе призмы, а также фактически смонтированные на каркас тензодатчики приведены на рис. 4.

Измерение относительных деформаций бетона на трех продольных гранях призмы выполнено при помощи индикаторов часового типа MITUTOYO 12,7. Схема расположения баз индикаторов часового типа приведена на рис. 5, на котором зеленым цветом показаны индикаторы для измерения поперечных деформаций грани, а красным цветом – продольных. Смонтированные индикаторы на призме до испытаний представлены на рис. 6.

а) *б*)

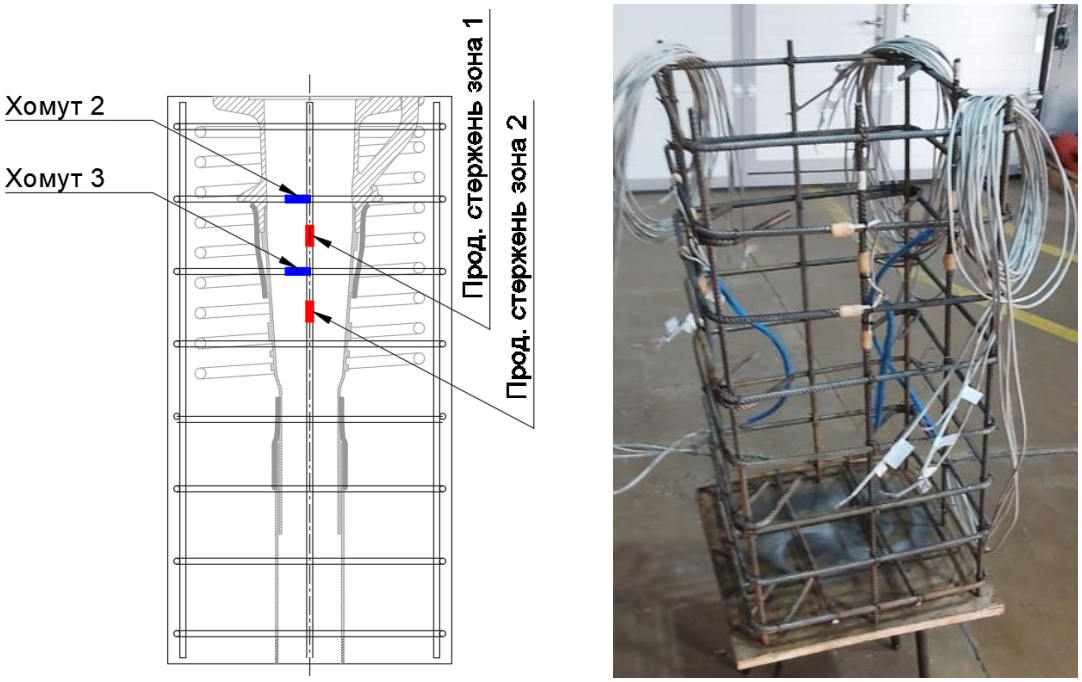


Рис. 4. Схема расположения тензодатчиков в арматурном каркасе призмы (*а*), а также фактически смонтированные на каркас тензодатчики (*б*)

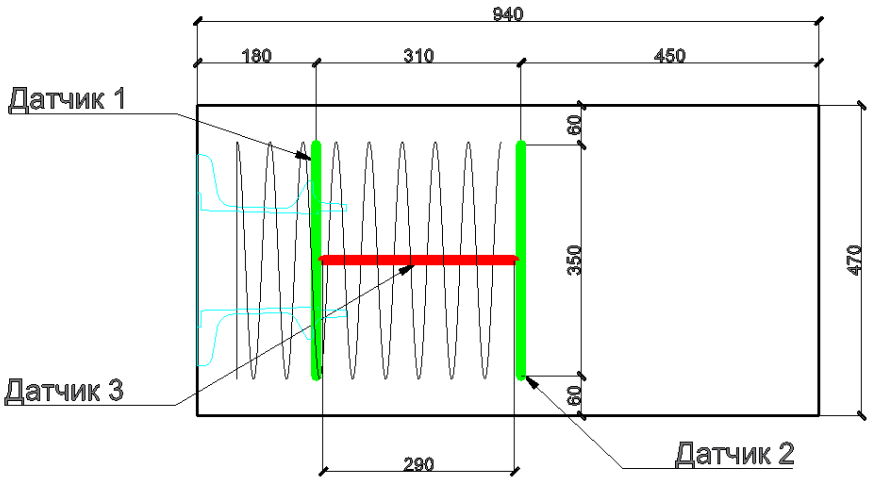


Рис. 5. Схема расположения баз индикаторов часового типа на грани призмы

После бетонирования призмы, демонтажа опалубки, а также набора бетоном передаточной прочности был выполнен монтаж призмы в испытательный стенд с максимальной нагрузкой 1 400 т. Для приложения нагрузки к призме использовался гидравлический домкрат ДН-31 производства ООО «СТС», а для измерения приложенного усилия – силоизмеритель ИПС-06 производства ООО «СТС». Схема нагружения призмы в испытательном стенде приведена на рис. 7.

Процесс нагружения испытательной призмы состоял из следующих этапов в соответствии с [1]:

– ступенчатое нагружение призмы от 0 до 80 % от F_{pk} с шагом 10 % F_{pk};

– не менее десяти циклов нагружения призмы от 12 до 80 % F_{pk} до достижения условий стабилизации относительных деформаций и ширины раскрытия продольных трещин;

– ступенчатое нагружение призмы с 80 до 95 % F_{pk}, с 95 до 110 % F_{pk}, со 110 % F_{pk} и до разрушения.

а) *б*)



Рис. 6. Смонтированные индикаторы часового типа на трех гранях призмы

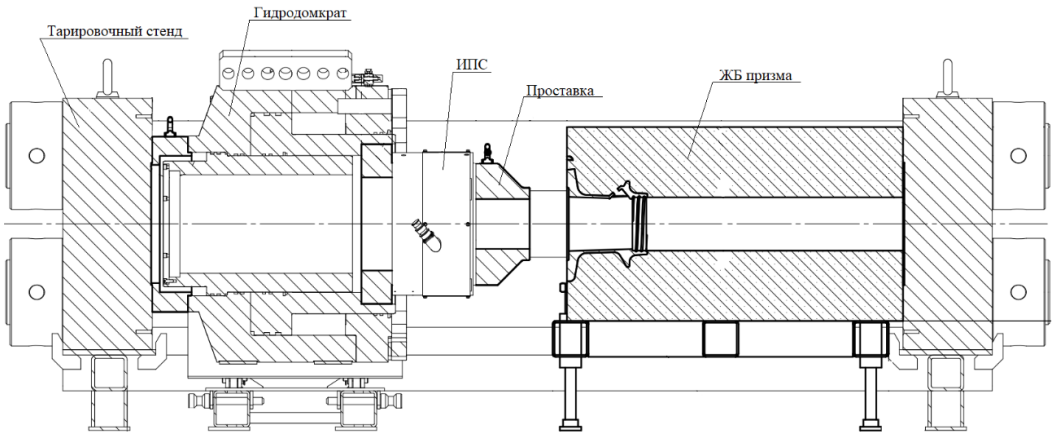


Рис. 7. Схема нагружения призмы в испытательном стенде

Результаты исследования

Максимальная достигнутая нагрузка при испытаниях составила 6 298 кН, что соответствует 118,8 % F_{pk}. Разрушение призмы произошло по зоне после косвенного армирования со значительным трещинообразованием в нижней ее части. Критерием разрушения призмы является неспособность воспринимать нарастающую нагрузку. Разрушений или видимых деформаций опорного стакана ОС-19 после испытаний не зафиксировано. Видимые трещины на гранях призмы зафиксированы на ступени загружения с 70 до 80 % F_{pk}. До и после проведения испытаний определена прочность бетона по трем контрольным образцам – кубам со стороной 100 мм. Средняя кубиковая прочность бетона непосредственно перед испытаниями составила 42,2 МПа, что соответствует классу бетона на сжатие $B_ф33$. Средняя кубиковая прочность бетона непосредственно после испытаний составила 39,1 МПа, что соответствует классу

бетона на сжатие $B_ф31$. Разброс прочности бетона до и после испытаний находится в пределах допускаемого коэффициента вариации и соответствует передаточной прочности на сжатие для класса прочности на сжатие $B_ф32$ по [1]. Фотографии призмы после испытаний приведены на рис. 8.

Произведена обработка экспериментальных результатов и их сравнение с показателями расчетной модели испытательной призмы, выполненной в расчетном комплексе конечно-элементного анализа MIDAS FEA NX. Основные допущения при составлении расчетной модели:

– расчет в пространственной постановке;

– элементы типа Solid для моделирования призмы и анкерного стакана;

– элементы типа Embedded truss для моделирования арматуры;

– на границе «опорный стакан – бетон» контакт общего типа;

– модель материала для бетона – Concrete damaged plasticity (CDP), чугуна – Мор-Кулон, арматуры – упруго-пластическая модель.

Подробные параметры расчетной модели описаны в предыдущих статьях авторов [4, 5]. Общий вид расчетной модели приведен на рис. 9.

Для дальнейшего анализа за экспериментальный результат принято среднее арифметическое значение показаний индикаторов часового типа и тензодатчиков по трем граням.

Сравнение экспериментальных результатов поперечных деформаций граней бетона по индикаторам часового типа и по расчетной модели приведено на рис. 10.

а) *б*)

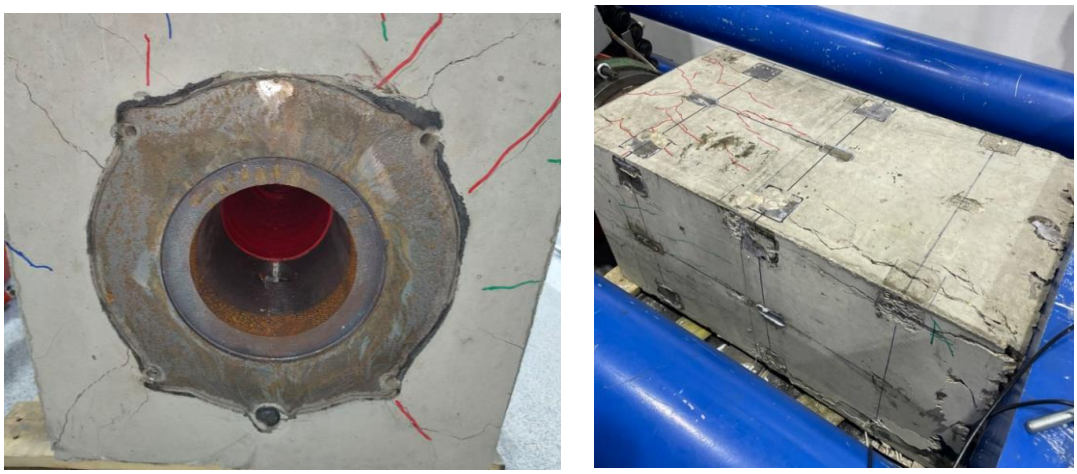


Рис. 8. Фотографии опорного стакана ОС-19 (*а*) и испытательной железобетонной призмы (*б*) после испытаний

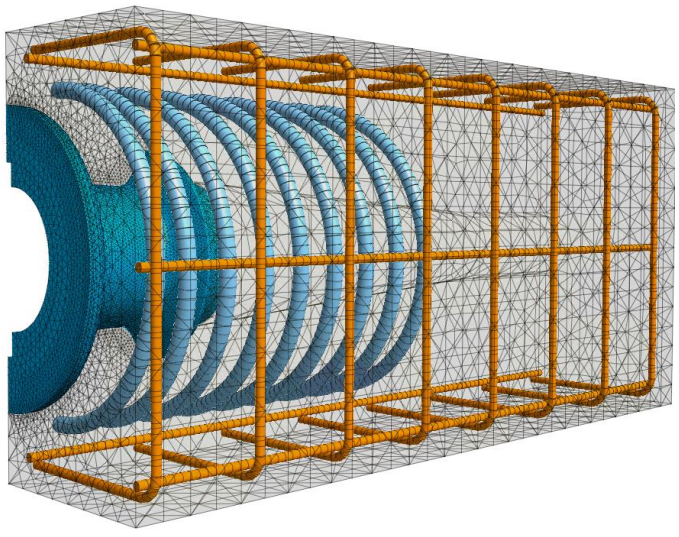


Рис. 9. Расчетная модель испытательной призмы в MIDAS FEA NX

Сравнение напряжений в хомутах испытательной призмы по тензодатчикам с результатами по расчетной модели приведено на рис. 11.

Сравнение измерения напряжений в продольных стержнях испытательной призмы по тензодатчикам с результатами по расчетной модели приведено на рис. 12.

а) *б*)

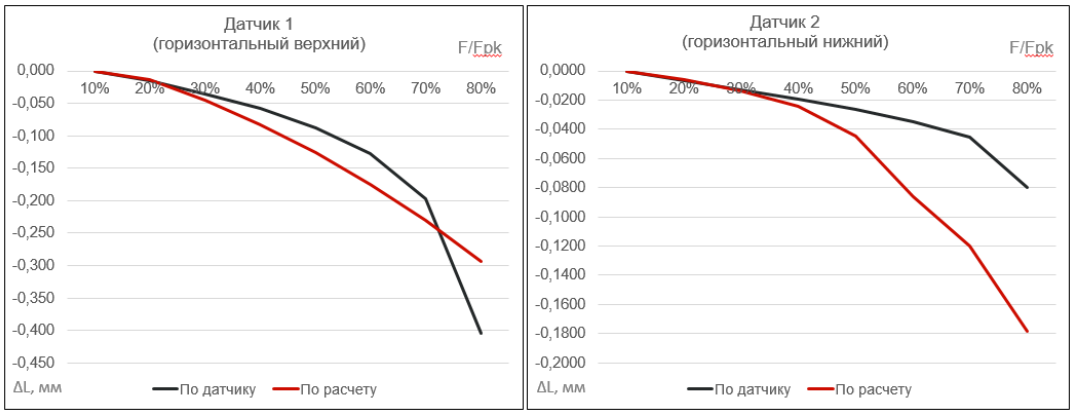


Рис. 10. Сравнение поперечных деформаций граней бетона по индикаторам часового типа № 1 (*а*) и № 2 (*б*) с результатами по расчетной модели

а) *б*)

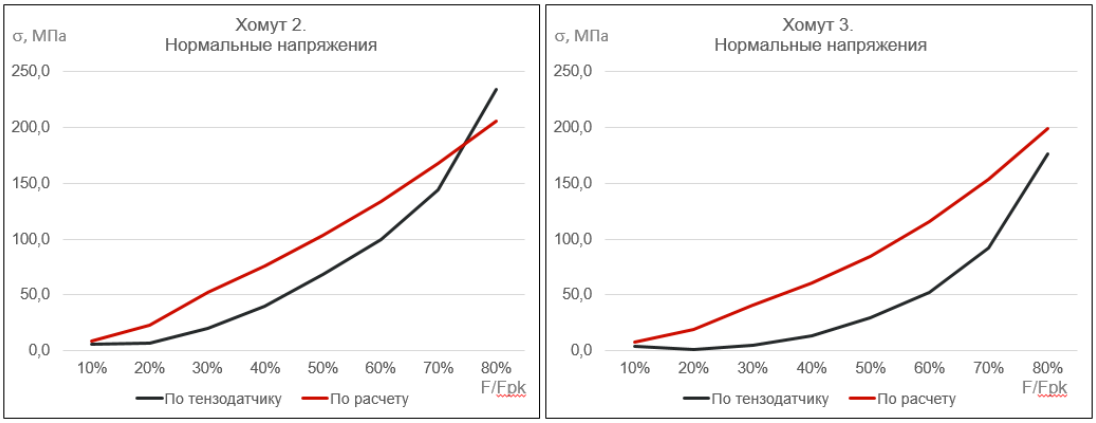


Рис. 11. Сравнение напряжений в хомутах № 2 (*а*) и № 3 (*б*) с результатами по расчетной модели

а) *б*)

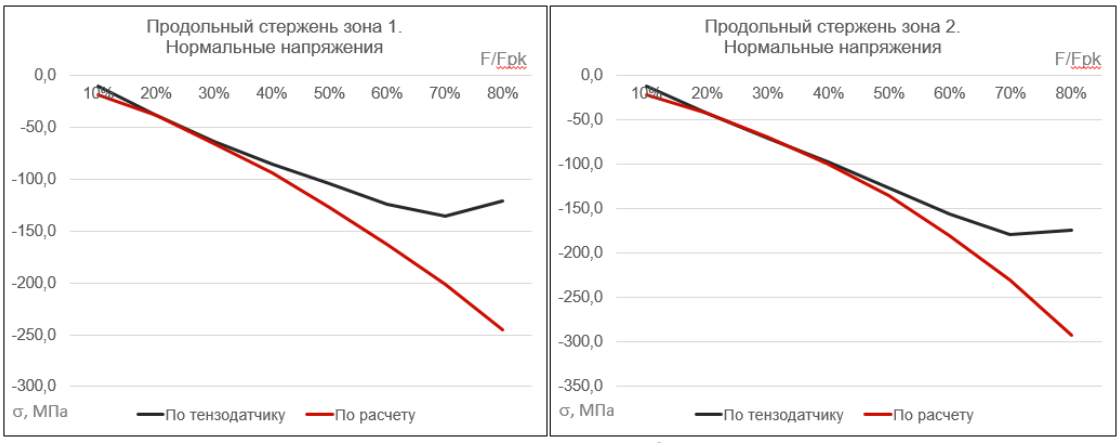


Рис. 12. Сравнение напряжений в продольных стержнях по тензодатчикам в зонах 1 (*а*) и 2 (*б*) с результатами по расчетной модели

Выводы

По результатам анализа экспериментальных данных и результатов по расчетной модели сформулированы следующие выводы:

– подход к моделированию в MIDAS FEA NX с учетом вышеописанных моделей материалов и допущений позволяет получать прогнозируемые результаты испытаний;

– фактическая максимальная нагрузка на призму (118,8 % F_{pk}) превышает аналогичную величину по расчету (101 % F_{pk}). Данный факт объясняется особенностью задания характеристик бетона при неупругой работе в модели CDP;

– получена экспериментальная зависимость деформаций бетона граней призмы, а также деформаций продольных стержней и хомутов призмы от приложенной нагрузки. По результатам анализа сходимости результатов сделан вывод о возможности применения расчетных методов назначения параметров косвенного армирования и шага между осями анкеров СПН;

– обнаружен эффект снижения деформаций в продольных стержнях призмы, о котором ранее не было известно. Данный эффект объясняется возникновением продольных трещин вдоль арматурных стрежней и частичной потерей их сцепления с окружающим бетоном.

За период с 2023 по 2026 г. специалистами ООО «СТС» и АО «ИТП» проведено восемь испытаний железобетонных призм для пяти типов анкеров СПН ООО «СТС». В это же время авторами накоплен значительный опыт [4, 5] в расчете зон передачи нагрузки на бетон для различных типов анкеров, косвенного армирования, передаточной прочности бетона по требованиям [1] и [3]. В общей сложности выполнено более 100 расчетных моделей. С учетом этого выведены практические советы для проектировщиков железобетонных конструкций с применением СПН, которые приведены ниже:

– допускается повышать класс прочности бетона на сжатие при сохранении косвенного армирования и шага анкеров;

– допускается увеличивать шаг между анкерами при сохранении косвенного армирования и прочности бетона;

– допускается изменять шаг витков и диаметр стержня спирали косвенного армирования с сохранением общей объемной площади армирования и длины спирали;

– допускается замена арматуры косвенного армирования с А400 на А500 согласно [2];

– не допускается уменьшать класс прочности бетона, площадь армирования или геометрические размеры спирали без согласования с разработчиком СПН, в том числе самостоятельно предусматривать компенсирующие мероприятия (например, уменьшать диаметр спирали, но увеличивать класс бетона);

– не допускается применять косвенное армирование одного разработчика СПН с анкерами другого разработчика СПН, а также одинаковое косвенное армирование для разных типов анкеров одного разработчика СПН.

Список источников

1. ГОСТ Р 72208–2025. Система предварительного напряжения натяжением на бетон. Технические условия. Москва, 2025. 61 с.

2. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы : актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* : [с Изменениями № 1, 2, 3]. Москва : Стандартинформ, 2019. 340 с.

3. EAD-160004-00-0301. Post-tensioning kits for prestressing of structures. EU : publishes by EOTA, 2016. 102 p.

4. Прочность узла анкеровки пучков напрягаемой арматуры при предвари-тельном натяжении на бетон / В. Р. Камалтдинов, М. С. Марченко, В. С. Горячкин [и др.] // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2024. № 4 (71). С. 35–44. DOI 10.52170/1815-9265_2024_71_35.

5. Допускаемые отклонения косвенного армирования в анкерных зонах предварительно напряженных конструкций / В. Р. Камалтдинов, М. С. Марченко, В. С. Горячкин, В. В. Бойко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 4 (76). С. 99–109. DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_99.

6. Антонов М. А., Марченко М. С., Горячкин В. С. Прочность анкерной зоны предварительно напряженного пролетного строения на местные напряжения раскалывания // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2025. № 1 (73). С. 57–67. DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_57. EDN MUZDFI.

7. ГОСТ Р 53772–2010. Канаты стальные арматурные семипроволочные стабилизированные. Технические условия. Москва, 2010. 70 с.

8. Патент № 2849735 C1 Российская Федерация, МПК E04H 7/20, E04G 21/12. Способ определения остаточного напряжения в системе предварительного натяжения защитной оболочки : заявл. 18.04.2025 : опубл.

28.10.2025 / Ю. А. Баулин, В. С. Горячкин, М. С. Марченко ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «СТС». EDN DBUUGF.

9. Патент № 2589459 C2 Российская Федерация, МПК G01L 5/04. Способ диагностики преднапряженных железобетонных пролетных строений балочного типа : № 2014138252/28 : заявл. 22.09.2014 : опубл. 10.07.2016 / А. Н. Яшнов, И. В. Чаплин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС) г. Новосибирск. EDN YZBELR.

10. Чаплин И. В. Мониторинг напряженно-деформированного состояния железобетонных преднапряженных пролетных строений железнодорожных мостов // Научные труды Общества железобетонщиков Сибири и Урала : материалы 14-й Сибирской (международной) конференции по железобетону, Новосибирск, 18–19 февраля 2016 г. Выпуск 12. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2016. С. 64–69. EDN VSPRTT.

References

1. GOST R 72208–2025. Post-tensioning systems. Specifications, Moscow; 2025. 61 p. (In Russ).

2. SP 35.13330.2011. Bridges and culverts. Actualised edition of SNiP 2.05.03-84* [with Revisements No. 1, 2, 3]. Moscow: Standartinform; 2019. 340 p. (In Russ.).

3. EAD-160004-00-0301. Post-tensioning kits for prestressing of structures. EU: published by EOTA, 2016. 102 p.

4. Kamaltdinov V. R., Marchenko M. S., Goryachkin V. S. [et al.]. The strength of the anchorage zone of tensioned reinforcement bundles at prestressing on concrete. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(71):35–44. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2024_71_35.

5. Kamaltdinov V. R., Marchenko M. S., Goryachkin V. S., Boiko V. V. Permissible deviations of indirect reinforcement in anchorage zones of prestressed structures. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(76):99–109. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_76_99.

6. Antonov M. A., Marchenko M. S., Goryachkin V. S. Strength of the anchor zone of a prestressed superstructure to local splitting stresses. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2025;(73):57–67. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2025_73_57. EDN MUZDFI.

7. GOST R 53772–2010. Stabilized seven-wire steel reinforcement strands. Specifications, Moscow, 2025. 70 p. (In Russ).

8. Patent No. 2849735 C1 Russian Federation, IPC E04H 7/20, E04G 21/12. A method for determining the residual stress in the pre-tensioning system of the protective shell: application 18.04. 2025: published 28.10.2025 by Yu. A. Baulin, V. S. Goryachkin, M. S. Marchenko; applicant Limited Liability Company ‘STS’. (In Russ.). EDN DBUUGF.

9. Patent No. 2589459 C2 Russian Federation, IPC G01L 5/04. Diagnostic method for prestressed reinforced concrete girder-type superstructures: No. 2014138252/28: application 22.09.2014: published 10.07.2016 by A. N. Yashnov, I. V. Chaplin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education ‘Siberian Transport University’ (STU) Novosibirsk. (In Russ.). EDN YZBELR.

10. Chaplin I. V. Monitoring of the stress-strain state of reinforced concrete prestressed superstructures of railway bridges. *Scientific proceedings of the Society of Ironworkers of Siberia and the Urals: proceedings of the 14th Siberian (International) Conference on Reinforced Concrete, Novosibirsk, February 18–19, 2016. Issue 12*. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2016. P. 64–69. (In Russ.). EDN VSPRTT.

Информация об авторах

В. С. Горячкин – руководитель отдела инженерных расчетов и исследований ООО «СТС».

М. С. Марченко – технический директор ООО «СТС».

В. В. Бойко – ведущий специалист отдела инженерных расчетов и исследований ООО «СТС».

С. И. Герасимов – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Строительная механика» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

V. S. Goryachkin – Head of the Engineering Calculations and Research Department, STS LLC.

M. S. Marchenko – Chief Technical Officer, STS LLC.

V. V. Boiko – Lead Specialist, Engineering Calculations and Research Department, STS LLC.

S. I. Gerasimov – Professor, Doctor of Engineering, Head of the Construction Mechanics Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 20.04.2026; одобрена после рецензирования 11.05.2026; принята к публикации 26.06.2026.
The article was submitted 20.04.2026; approved after reviewing 11.05.2026; accepted for publication 26.06.2026.