

На правах рукописи



СНИГИРЕВА ВЕРА АЛЕКСЕЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ СТОЕК
ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

2.1.8 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,
мостов и транспортных тоннелей

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2021

Работа выполнена в Бюджетном учреждении высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет» (г.Сургут).

Научный руководитель: **Горынин Глеб Леонидович**
доктор физико-математических наук, доцент, Бюджетное учреждение высшего образования Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Сургутский государственный университет», профессор кафедры «Строительные технологии и конструкции» (г. Сургут)

Официальные оппоненты: **Белуцкий Игорь Юрьевич**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет», профессор кафедры «Автомобильные дороги» (г. Хабаровск)

Немировский Юрий Владимирович
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь)

Защита диссертации состоится «23» марта 2022 г. в 14:00 часа на заседании диссертационного совета ВАК РФ 24.2.400.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно – дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5, ауд. П. 3124.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СибАДИ» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistratury-i-aspirantury/studies/dissertations/65713/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5. Тел. (3812) 65-03-23. Копию отзыва просим выслать на e-mail: sibadisemenova@yandex.ru

Автореферат разослан «01» февраля 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Семенова
Татьяна Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Практика использования трубобетонных конструкций при возведении транспортных сооружений, таких как мосты, наземные и подземные сооружения аэропортов, метрополитенов, железнодорожных и автовокзалов, а также интермодальных терминалов, показала недостаточную надежность таких конструкций. Это связано с нарушением совместной работы стальной трубы и бетонного ядра в поперечном направлении. Проектирование таких конструкций в качестве опор мостов зачастую ведется без учета стальной трубы в прочностных расчетах, при этом усиление бетонного ядра подразумевает его армирование гибкой арматурой, а стальная труба используется лишь в качестве опалубки. Для обеспечения совместной работы стальной трубы и бетонного ядра в поперечном направлении необходима разработка преднапряженных трубобетонных конструкций.

В рамках реализации Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года, (утв. распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. № 1734-р) наряду с другими задачами предусматривается выполнение мероприятий по развитию объектов транспортной инфраструктуры, включающих формирование многофункциональных интермодальных хабов и транспортно-пересадочных узлов, интегрированных с современной городской средой и инфраструктурным окружением. При этом задачи формирования интермодальных хабов и транспортно-пересадочных узлов подразумевают объединение транспортных путей с путями железнодорожного транспорта и осложняются серьезными градостроительными ограничениями. Следует учитывать, что практически все крупнейшие объекты транспортной инфраструктуры в городах России расположены в условиях сложившейся городской застройки. Многие из них находятся практически в центральных частях города. Анализ границ земельных участков, сформированных в соответствии с полосами отвода уже существующих транспортно-пересадочных комплексов показывает практическое отсутствие возможности их расширения. Кроме того, в ряде случаев при размещении объектов транспортной инфраструктуры в условиях исторической застройки, градостроительными регламентами накладываются серьезные ограничения по высоте зданий и сооружений, делая невозможным реконструкцию путем надстройки дополнительных этажей, что в свою очередь приводит к необходимости освоения подземного пространства. В данном случае целесообразно формирование транспортных интермодальных хабов, включающих станции метрополитена, железнодорожные вокзалы и автовокзалы. Таким образом возведение многоуровневых транспортных сооружений при расположении подъездных путей железнодорожного транспорта, путей метрополитена и прочих видов транспорта, расположенных по вертикали – в несколько этажей-ярусов в подземном пространстве, зачастую является единственно возможным решением в сложившихся условиях.

Очевидно, что в таком случае нагрузка на несущие конструкции транспортных сооружений будет во много раз выше (приблизительно в 5-6 раз), чем на конструкции гражданских зданий, что предъявляет исключительно высокие требования к их несущей способности. В первую очередь это относится к несущим

стойкам. В связи с вышеизложенным, разработка и внедрение конструкций стоек транспортных сооружений, обладающих повышенной несущей способностью, разработка методики расчета таких конструкций, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Начало применения трубобетонных конструкций в транспортных сооружениях относится к 40-м годам XX века при возведении мостов под руководством Передерия Г.П. в Санкт-Петербурге и Росновского В.А. в Каменск-Уральском. Изначально предполагалось, что бетон в составе трубобетонной конструкции находится под воздействием давления обжатия трубой в поперечном направлении, что повышает его прочностные свойства и, как следствие, несущую способность конструкции в целом. Однако позднее в реальных конструкциях, а также экспериментально, было замечено, что при сжатии трубобетонных элементов происходит отрыв стальной трубы от бетонного ядра, что, по-видимому, является главным конструктивным недостатком традиционных трубобетонных конструкций. Существующие методики расчета традиционных трубобетонных стоек, включая нормативную методику согласно Свода правил (далее – СП) 266.1325800.2016, основаны на предположении о совместной работе бетонного ядра и стальной трубы в поперечном направлении, и игнорируют факт отрыва стальной трубы от бетонного ядра. Используемые в настоящее время методы создания предварительного обжатия бетонного ядра с целью устранения главного конструктивного недостатка трубобетонных конструкций являются технологически сложно выполнимыми либо недостаточно эффективными.

Основная идея работы заключается в анализе проблем применения традиционных трубобетонных стоек транспортных сооружений, поиске путей улучшения конструкции трубобетонных стоек, в том числе путем предварительного напряжения бетонного ядра, анализе и обосновании преимуществ улучшенных конструкций, а также совершенствовании методов их расчета.

Объектом исследования являются трубобетонные стойки транспортных сооружений (мостов, многоуровневых подъездных путей интермодальных хабов, объединенных с транспортными узлами метрополитенов и пр.).

Предмет исследования – расчет напряженно-деформированного состояния трубобетонных стоек при сжатии.

Целью является разработка методики расчета предварительно напряженных трубобетонных стоек транспортных сооружений (мостов, многоуровневых подъездных путей интермодальных хабов, объединенных с транспортными узлами метрополитенов и пр.) по результатам моделирования их напряженно-деформированного состояния в условиях повышенной нагрузки.

Настоящее диссертационное исследование соответствует пунктам 5 и 13 паспорта специальности 2.1.8 (05.23.11) – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей.

Цель исследования предполагает решение следующих задач:

1. Проанализировать современные проблемы применения трубобетонных стоек транспортных сооружений, выявить причины их возникновения.
2. С целью совершенствования методов расчета произвести моделирование напряженно-деформированного состояния трубобетонной стойки традиционной

конструкции при центральном сжатии и проанализировать пространственную работу конструкции.

3. Рекомендовать конструктивные изменения трубобетонных стоек транспортных сооружений (мостов, многоуровневых подъездных путей интермодальных хабов, объединенных с транспортными узлами метрополитенов и пр.), работающих в условиях повышенных нагрузок, с целью увеличения их несущей способности.

4. Произвести моделирование напряженно-деформированного состояния улучшенных и предварительно напряженных трубобетонных конструкции, проанализировать пространственную работу конструкции, разработать методику их расчета.

5. Произвести сравнение результатов расчета трубобетонных стоек с результатами экспериментальных данных.

Методология и методы исследования. При моделировании использованы классические положения пространственной теории упругости, теория прочности бетона, теории расчета строительных конструкций. В проведенных исследованиях применялись теоретический и расчетно-аналитический методы исследования. А также метод численного моделирования работы предварительно напряженной трубобетонной стойки, реализованный в конечно-элементном вычислительном комплексе «ABAQUS» (Dassault Systèmes SIMULIA Corp., USA).

Научная новизна.

1. Предложены определяющие соотношения, описывающие пространственное напряженно-деформированное состояние бетона в составе трубобетонных конструкций с учетом нелинейности диаграммы деформирования.

2. Предложены улучшенные конструкции трубобетонных стоек транспортных сооружений: бетонная стойка в стальной обойме, бетонная стойка в стальной обойме с внутренней несущей трубой, бетонная стойка в композитной обойме, предварительно напряженная трубобетонная стойка.

3. Представлено моделирование напряженно-деформированного состояния конструкции трубобетонных стоек: бетонной стойки в стальной обойме, бетонной стойки в стальной обойме с внутренней несущей трубой, бетонной стойки в композитной обойме, предварительно напряженной трубобетонной стойки.

4. Разработана методика расчета и проектирования предварительно напряженных трубобетонных стоек транспортных сооружений.

Теоретическая значимость работы. Получены новые знания в области совершенствования расчета напряженно-деформированного состояния трубобетонных стоек транспортных сооружений в условиях повышенных нагрузок. Представлены аналитические решения, позволяющие вычислить несущую способность стоек транспортных сооружений.

Предложенные в работе научные знания используются в учебном процессе в Сургутском государственном университете, о чем свидетельствует акт внедрения.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученной методики при проектировании предварительно напряженных трубобетонных стоек транспортных сооружений с целью обоснования проектного решения и повышения точности расчетов.

Результаты диссертационного исследования приняты в ООО «СИБИРЬ-ТРАНСПРОЕКТ» для использования в практике проектирования транспортных сооружений, о чем свидетельствует акт внедрения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новая модель расчета напряженно-деформированного состояния трубобетонных стоек транспортных сооружений при центральном и внецентренном сжатии.
2. Методика использования этой модели при проектировании и расчете трубобетонных стоек транспортных сооружений.
3. Новая конструкция предварительно напряженной трубобетонной стойки и модель ее напряженно-деформированного состояния.

Степень достоверности обеспечена корректным использованием научных положений в области теории упругости, теории прочности бетона, математического моделирования; сопоставлением результатов моделирования и расчета с экспериментальными данными, с результатами численного эксперимента методом конечных элементов с использованием вычислительного комплекса «ABAQUS» ((Dassault Systèmes SIMULIA Corp., USA).

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на научных конференциях различного уровня:

- 1) Всероссийская научно-практической конференция «Север России: стратегии и перспективы развития» (г. Сургут, 2015 г.);
- 2) IX Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные вопросы строительства» (г. Новосибирск, 2016 г.);
- 3) Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе», посвященная дню рождения великого русского математика академика П.Л. Чебышёва (г. Сургут, 2016 г.);
- 4) II Всероссийская научно-практическая конференция Север России: стратегии и перспективы развития (г. Сургут, 2016 г.);
- 5) Международная научно-практическая конференция «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации» (г. Омск, 2016 г.);
- 6) III Всероссийская конференция молодых ученых «Наука и инновации XXI века» (г. Сургут, 2016 г.);
- 7) 4-й Всероссийская конференция «Проблемы оптимального проектирования сооружений» (г. Новосибирск, 2017 г.);
- 8) Всероссийская научно-практическая конференция «Север России: стратегии и перспективы развития» (г. Сургут, 2017 г.);
- 9) Всероссийская научно-практ. конференция «Роль физико-математического и инженерного образования в современном обществе» (г. Сургут, 2017 г.);
- 10) Международная конференция "Actual Issues of Mechanical Engineering" (г. Томск, 2017 г.);
- 11) I Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов» (г. Сургут, 2018 г.);

12) III Международная научно-практическая конференция «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации» (г. Омск, 2018 г.);

13) V Всероссийская конференция молодых ученых «Наука и инновации XXI века» (г. Сургут, 2018 г.);

14) Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе» (г.Сургут, 2019г.);

15) XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г.Томск, 2020г.). Автор диссертации награжден дипломом II степени за доклад;

16) V Международная научно-практическая конференция «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (г.Омск, 2020г.);

17) 10-я Международная конференция «Математические идеи П. Л. Чебышёва и их приложения к современным проблемам естествознания» (г.Сургут, 2021г.);

18) Автор диссертации, представляя проект, посвященный диссертационным исследованиям, был удостоен дипломом победителя III степени конкурса инженерных компетенций проекта «Славим человека труда!» Уральского федерального округа по компетенции «Инженер-конструктор» (г. Челябинск, 2016 г.).

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Результаты исследования изложены на 180 страницах основного текста, включающего 64 рисунка, 21 таблицу, список литературы состоит из 122 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору европейских примеров формирования транспортных интермодальных хабов, а также истории возникновения и развития трубобетонных конструкций и теории их расчета.

Формирование транспортных интермодальных хабов зачастую подразумевает возведение объектов транспортной инфраструктуры, пересадочных узлов, путей подземного транспорта – метрополитена и иных путей под вышерасположенными железнодорожными путями. Таким образом подобные сооружения, воспринимающие повышенную нагрузку от железнодорожного транспорта в составе интермодальных хабов, относятся к транспортным сооружениям. Примером такого транспортного сооружения являются многоуровневые подъездные пути вокзала Антверпен-Центральный в Бельгии, где железнодорожные пути после реконструкции стали размещаться в трёх уровнях. Несущие стойки подобных сооружений, воспринимающие нагрузку от транспорта, должны обладать повышенными прочностными качествами в сравнении с классическими конструкциями.

Такие исследователи как Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Долженко А.А. и др. наблюдали повышенную несущую способность трубобетонных элементов,

объясняя её, упрочнением бетонного ядра в связи с обжатием его трубой. Теория прочности бетона в состоянии трехосного сжатия и повышение его прочности в сравнении с одноосным сжатием были описаны в трудах Берга О.Я. Однако другой позиции придерживались такие ученые как Скворцов Н.Ф., Кноулес Р., Парк Р. установившие, что обжатие бетонного ядра происходит лишь при испытании коротких трубобетонных элементов. При сжатии длинных элементов происходит отрыв стальной трубы от бетонного ядра, как это имело место в конструкциях моста через реку Исеть, что является главным конструктивным недостатком трубобетонных конструкций.

Для предотвращения отрыва стальной трубы от бетонного ядра в разное время предлагались разные методы создания предварительного (до приложения внешней нагрузки) обжатия бетонного ядра: использование напрягающих цементов (Мартиросов Г.М., Резван И.В.), центрифугирование (Харченко С.А.) и прессование бетонной смеси (Кришан А.Л. и др). Однако данные методы имеют ряд существенных недостатков и/или характеризуются сложностью воспроизведения.

Существующие методы расчета трубобетонных стоек не отражают в полной мере сложное напряженно-деформированное состояние конструкции, в особенности, в расчетах не учитываются силы взаимодействия трубы и ядра в поперечном направлении, способ передачи нагрузки, а также зачастую расчетные зависимости носят эмпирический характер, что требует проведение частных экспериментов.

Вторая глава посвящена пространственному расчету традиционной трубобетонной стойки (Рисунок 1).

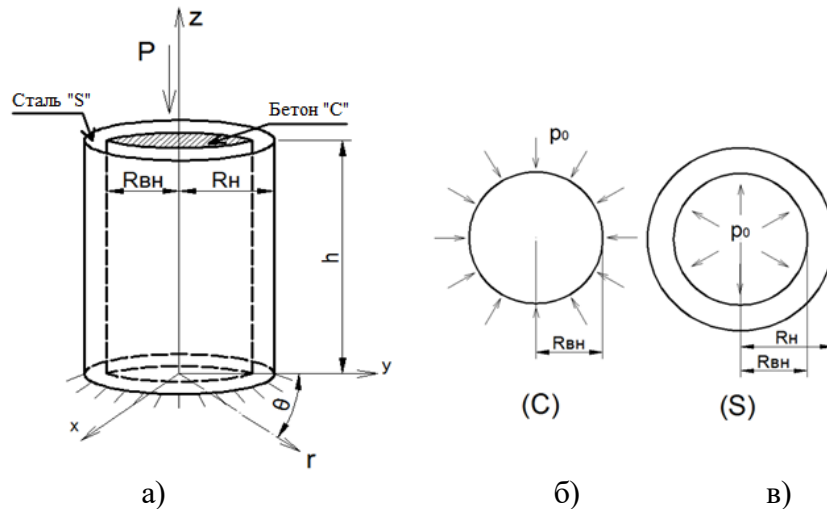


Рисунок 1 – Расчетная схема трубобетонной стойки:
а) общий вид трубобетонной стойки; б) сечение бетонного ядра стойки;
в) сечение стальной трубы стойки

Особый интерес представляет формула давления взаимодействия стальной трубы и бетонного ядра традиционной трубобетонной стойки:

$$p_0 = P \frac{(\lambda^S + \mu^S)(\lambda^C + \mu^C)}{T\mu^C\mu^S(3\lambda^C + 2\mu^C)(3\lambda^S + 2\mu^S)} (\nu^C - \nu^S), \quad (1)$$

где $\lambda^S, \mu^S, \lambda^C, \mu^C$ - константы Ламе стали (steel) и бетона (concrete) соответственно, P – осевая сжимающая нагрузка, $T > 0$. Знак давления взаимодействия стали и бетона (1) полностью определяется разностью коэффициентов Пуассона бетона

$\nu^c=0,2$ и стали $\nu^s=0,3$ и является отрицательной величиной, следовательно радиальные напряжения в бетонном ядре $\sigma_{rr}^c > 0$ растягивающие, в связи с чем происходит отрыв бетонного ядра от стальной трубы, а значит их совместная работа не реализуется. Следствием этого является опасность местной потери устойчивости стенки трубы, что ведет к снижению несущей способности всей конструкции.

В третьей главе предложены улучшенные конструкции трубобетонных стоек и представлен их пространственный расчет.

Бетонная стойка в стальной обойме представляет собой трубобетонную конструкцию, нагрузка к которой прикладывается лишь на бетонное ядро, что является главным отличием от традиционной трубобетонной стойки (Рисунок 1). При работе такой конструкции давление на контакте бетона с обоймой является положительной величиной:

$$p_0 = p^c \frac{J}{L + K}, \quad (2)$$

$$\text{где } K = \frac{\mu^s(3\lambda^s + 2\mu^s) + (\lambda^s)^2}{2\mu^s(\lambda^s + \mu^s)(3\lambda^s + 2\mu^s)} \cdot \frac{R_{\text{бн}}^2}{R_n^2 - R_{\text{бн}}^2} + \frac{R_n^2}{2\mu^s(R_n^2 - R_{\text{бн}}^2)},$$

$$L = \frac{\mu^c(3\lambda^c + 2\mu^c) + (\lambda^c)^2}{2\mu^c(\lambda^c + \mu^c)(3\lambda^c + 2\mu^c)}, J = \frac{R_n^2}{\lambda^c}$$

а значит бетон находится в состоянии всестороннего сжатия, в связи с чем повышается его прочность и несущая способность стойки в целом

Другой тип трубобетонной стойки – бетонная стойка в стальной обойме с внутренней несущей трубой. В этом случае нагрузка прикладывается одновременно на бетон и внутреннюю трубу (Рисунок 2).

Пространственный расчет такой конструкции свидетельствует о менее благоприятных условиях работы бетона в составе данной стойки в сравнении с бетонной стойкой в стальной обойме.

Выполнен пространственный расчет бетонной стойки в композитной обойме. Получены зависимости, описывающие напряженно-деформированное состояние композитной обоймы. Сравнительный расчет показал, что масса композитной оболочки из существующих в настоящее время материалов превышает массу стальной трубы в более чем 1,5 раза при равных несущих способностях.

Предлагается использование нового типа конструкции – предварительно напряженной трубобетонной стойки. Предварительное обжатие бетонного ядра стойки реализуется при помощи её конструктивной особенности, а именно устройством первоначального выступа бетонного ядра над уровнем стальной трубы на величину d в верхней опорной части (Рисунок 3).

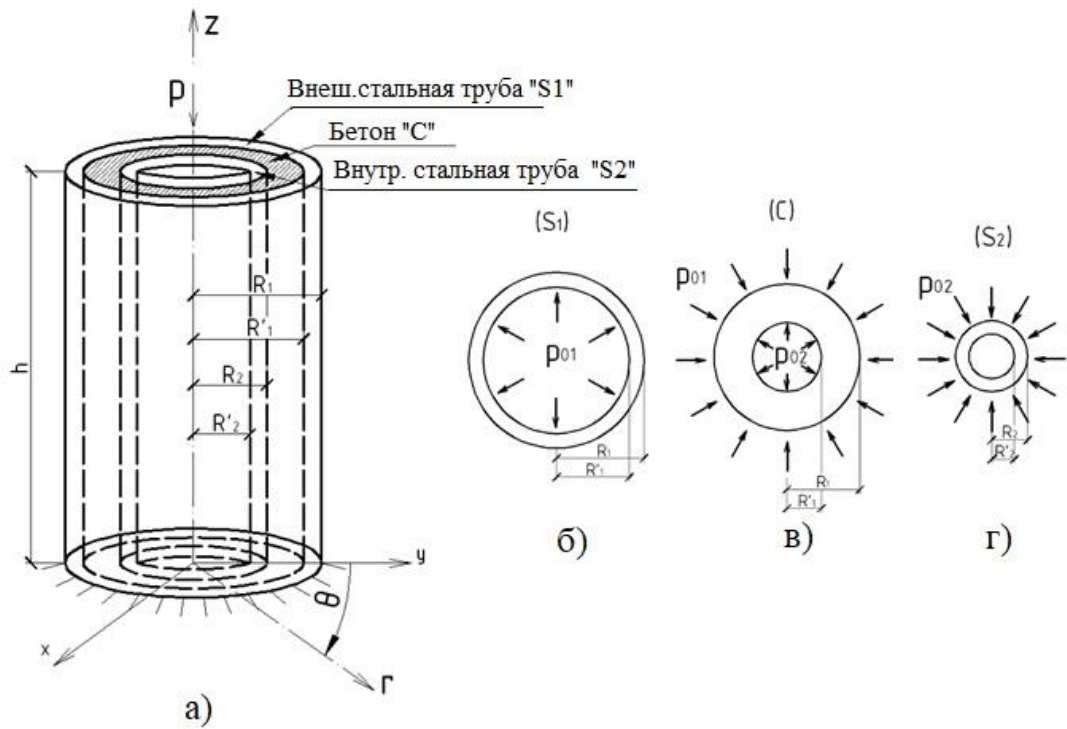


Рисунок 2 – Расчетная схема; а) бетонная стойка в стальной обойме с внутренней несущей трубой; б) сечение внешней стальной трубы-обоймы; в) сечение бетонного полого цилиндра; г) сечение внутренней несущей стальной трубы

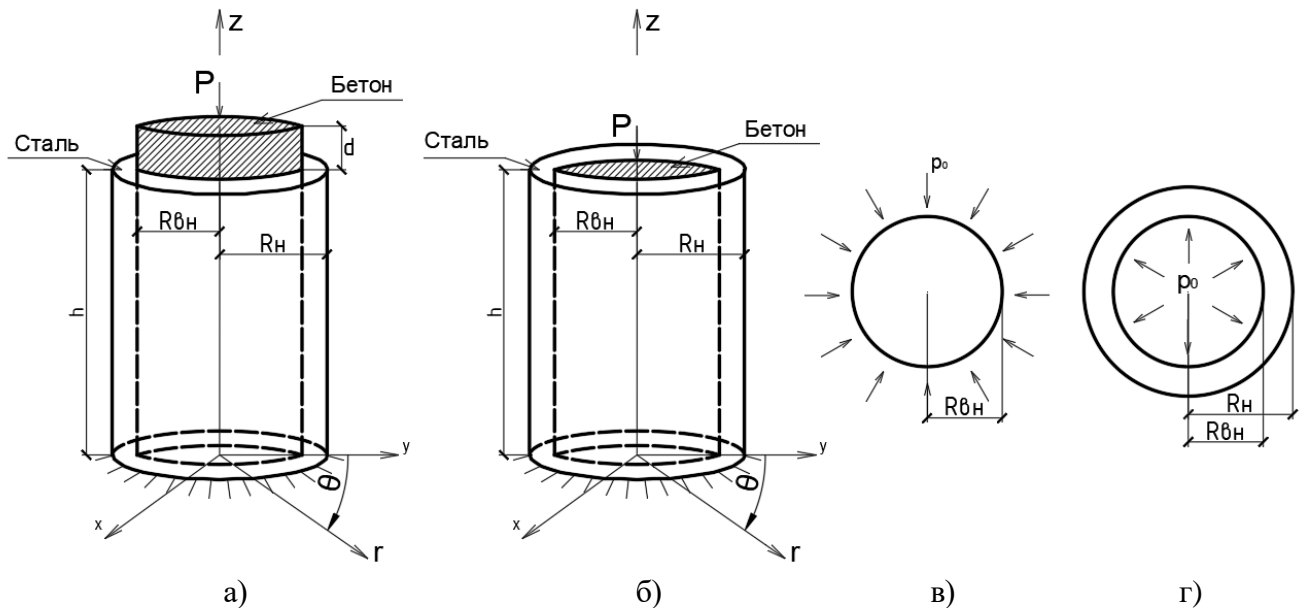


Рисунок 3 – Расчетная схема предварительно напряженной трубобетонной стойки: а) предварительно напряженная трубобетонная стойка на стадии 1 работы; б) предварительно напряженная трубобетонная стойка на стадии 2 работы; в) схема обжата сечения бетонного ядра; г) схема воздействия бетонного ядра на сечение стальной трубы

Работа предлагаемой предварительно напряженной трубобетонной стойки, характеризуется двумя стадиями нагружения, переход между которыми реализуется в следствии возрастания внешней нагрузки. Стадия нагружения 1 «Предварительное обжатие бетонного ядра»: на этой стадии стойка работает, как бетонная стойка в стальной обойме. При приложении нагрузки P_d , высота бетонно ядра

укорачивается на величину d , при этом величина давления обжатия бетона трубой, обозначаемая p_{od} , создает предварительные сжимающие радиальные напряжения в бетоне.

Стадия нагружения 2 «Расчетное рабочее состояние»: в связи с укорочением высоты бетонного ядра, опорные поверхности бетона и стали находятся на одинаковом уровне, нагрузка прикладывается на всё сечение стойки, включая стальную трубу. Стойка работает как традиционная трубобетонная стойка с предварительно обжатым бетонным ядром.

Выполнен пространственный расчет такой конструкции. Установлено, что несущая способность предварительно напряженной стойки оказывается выше несущей способности бетонной стойки в стальной обойме на 9-18% в зависимости от параметров стоек.

Четвертая глава посвящена расчетам трубобетонных стоек с учетом нелинейности деформирования бетона, сравнению результатов расчета с экспериментальными данными.

Для моделирования трехосного нелинейного поведения бетона используется модель гипоупругого тела Трусделла К (Truesdell C., 1955). Получены зависимости, описывающие пространственное напряженно-деформированное состояние бетона в составе трубобетонной стойки с учетом нелинейности деформирования. Весь процесс деформирования бетона разбивается на три этапа ($i=0,1,2$):

$$\begin{aligned} i = 0: \theta \leq \theta^*, S_2^D \leq S_2^{D*}, \mu_0^C &= \frac{E^C}{2(1+\nu^C)}, k_0 = \frac{E^C}{3(1-2\nu)}, \lambda_0^C = \frac{E^C \nu^C}{(1-2\nu^C)(1+\nu^C)}; \\ i = 1: \theta > \theta^*, S_2^D \leq S_2^{D*}, \mu_1^C &= \frac{E^C}{2(1+\nu^C)}, k_1 = \frac{E_1^C}{3(1-2\nu^C)}; \lambda_1^C = \frac{(E_1^C - E^C) + \nu^C(E_1^C + 2E^C)}{3(1-2\nu^C)(1+\nu^C)}; \\ i = 2: \theta > \theta^*, S_2^D > S_2^{D*}, \mu_2^C &= \frac{E_1^C}{2(1+\nu^C)}, k_1 = \frac{E_1^C}{3(1-2\nu^C)}; \lambda_2^C = \frac{E_1^C \nu^C}{(1-2\nu^C)(1+\nu^C)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Значения напряжений и перемещений бетонного ядра выражаются через приращения:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^C &= \sigma_{rr_{i*}}^C + \Delta\sigma_{rr_i}^C, \quad \sigma_{\theta\theta}^C = \sigma_{\theta\theta_{i*}}^C + \Delta\sigma_{\theta\theta_i}^C, \quad \sigma_{zz}^C = \sigma_{zz_{i*}}^C + \Delta\sigma_{zz_i}^C, \\ \varepsilon_{rr}^C &= \varepsilon_{rr_{i*}}^C + \Delta\varepsilon_{rr_i}^C, \quad \varepsilon_{\theta\theta}^C = \varepsilon_{\theta\theta_{i*}}^C + \Delta\varepsilon_{\theta\theta_i}^C, \quad \varepsilon_{zz}^C = \varepsilon_{zz_{i*}}^C + \Delta\varepsilon_{zz_i}^C, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\sigma_{\alpha\alpha_{i*}}^C, \varepsilon_{\alpha\alpha_{i*}}^C$ – значения напряжений и деформаций в бетоне в момент начала этапа с номером i (очевидно, что $\sigma_{\alpha\alpha_{0*}}^C = \varepsilon_{\alpha\alpha_{0*}}^C = 0$); $\Delta\sigma_{\alpha\alpha_i}^C, \Delta\varepsilon_{\alpha\alpha_i}^C$ – приращения напряжений и деформаций на этапе с номером i ; ($\alpha \in \{r, \theta, z\}$).

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{rr_i}^C = (\lambda_i^C + 2\mu_i^C)\Delta\varepsilon_{rr_i}^C + \lambda_i^C(\Delta\varepsilon_{\theta\theta_i}^C + \Delta\varepsilon_{zz_i}^C); \\ \Delta\sigma_{\theta\theta_i}^C = (\lambda_i^C + 2\mu_i^C)\Delta\varepsilon_{\theta\theta_i}^C + \lambda_i^C(\Delta\varepsilon_{rr_i}^C + \Delta\varepsilon_{zz_i}^C); \\ \Delta\sigma_{zz_i}^C = (\lambda_i^C + 2\mu_i^C)\Delta\varepsilon_{zz_i}^C + \lambda_i^C(\Delta\varepsilon_{rr_i}^C + \Delta\varepsilon_{\theta\theta_i}^C). \end{cases} \quad (5)$$

Представлен пространственный расчет бетонной стойки в стальной обойме и предварительно напряженной трубобетонной стойки с учетом нелинейности деформирования бетона.

В результате моделирования пространственной работы предварительно напряженной стойки установлено, что величина давления обжатия бетона трубой p_o возрастает при работе стойки на стадии нагружения 1 и падает при переходе на стадию нагружения 2 (Рисунок 4, для стойки с параметрами $R_{вн}=0,253\text{м}$,

$R_n=0,265\text{м.}$, $d=0,004\text{ м}$, бетон В35, сталь С245). В большинстве расчетных случаев давление обжатия бетона не достигает нуля и бетон продолжает находиться в состоянии всестороннего сжатия на стадии 2 работы стойки. Давление обжатия совпадает по абсолютной величине с давлением воздействия бетонного ядра на трубу. Его относительно высокая величина исключает местную потерю устойчивости стальной трубы.

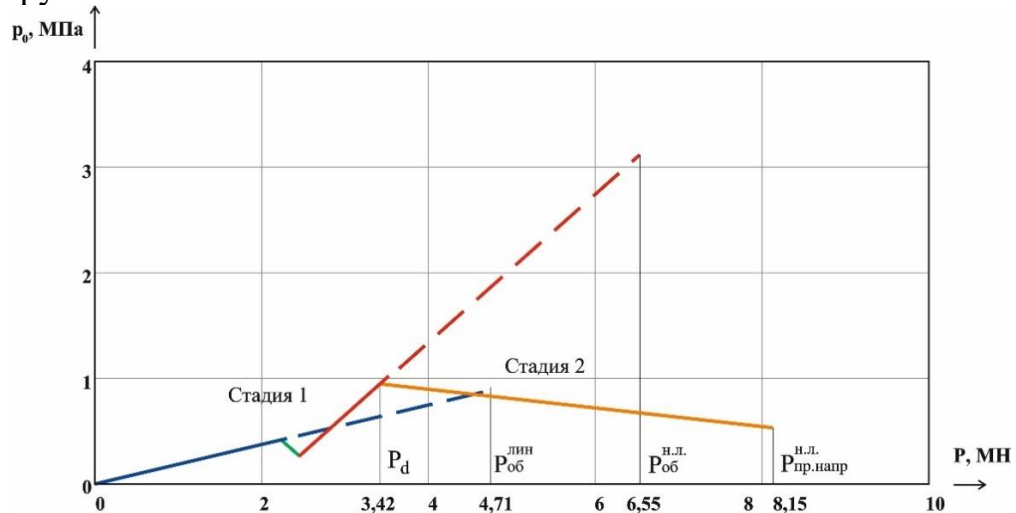


Рисунок 4 – Зависимость величины давления обжатия бетона p_0 от величины осевой сжимающей силы P . $P_{об}$ и $P_{пр.напр}$ – величины предельных сил на бетонную стойку в стальной обойме и предварительно напряженную трубобетонную стойку соответственно, индексы указывают на расчет с учетом линейности либо нелинейности деформирования бетона

В большинстве случаев стойки транспортных сооружений испытывают значительное внецентренное сжатие. Получены зависимости предельных моментов, прикладываемых к стойке, по прочности бетонного ядра и стальной трубы от величины осевой силы P , построены графики (справедливы для $P \geq P_d$, высота стойки $h=3,5\text{ м.}$, бетон В35, сталь С245) (Рисунки 5,6).

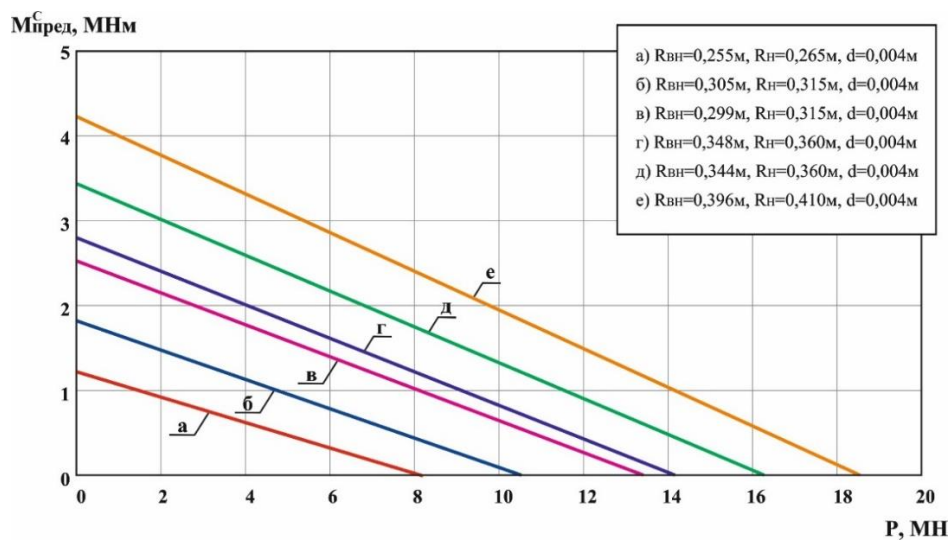


Рисунок 5 – График зависимости предельной величины момента (по прочности бетонного ядра) от осевой сжимающей силы для предварительно напряженной трубобетонной стойки

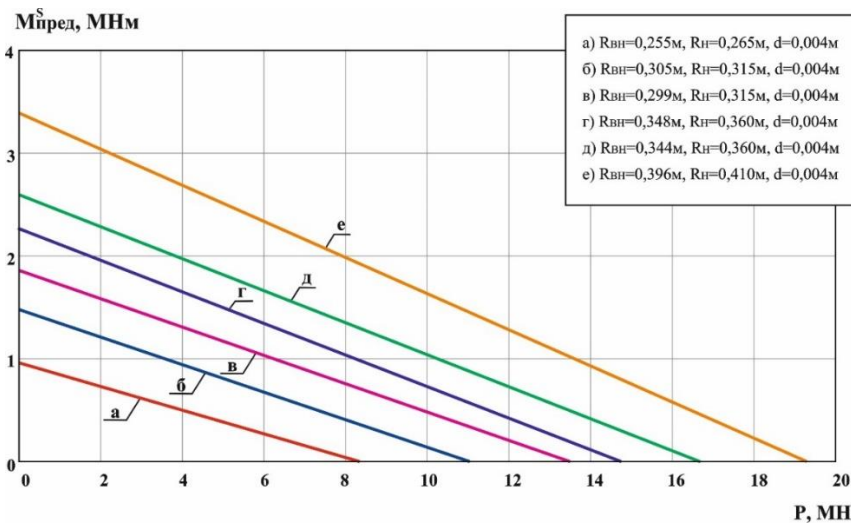


Рисунок 6 – График зависимости предельной величины момента (по прочности стальной трубы) от осевой сжимающей силы для предварительно напряженной труботонной стойки

Представлен пример проектирования предварительно напряженной труботонной стойки многоуровневых железнодорожных подъездных путей, объединенных с метрополитеном (Рисунок 7).

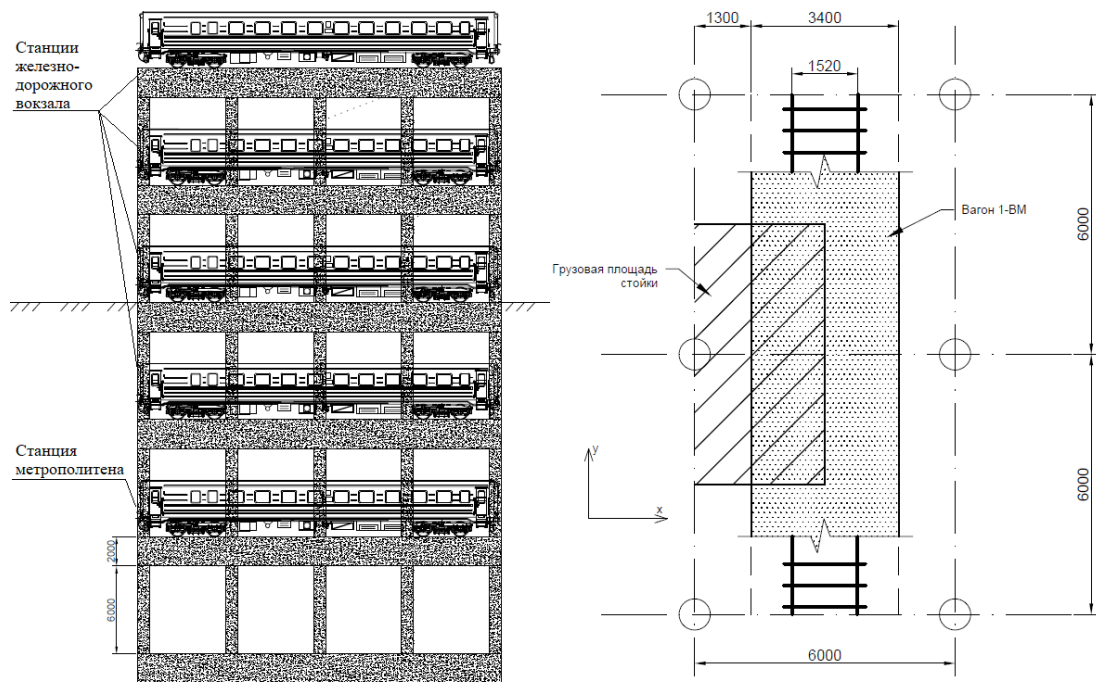


Рисунок 7 – Общий вид многоуровневых подъездных путей и грузовая площадка стойки крайнего ряда

Себестоимость предварительно напряженной стойки, подобранной расчетом по предложенной в диссертации методике, оказывается на 12% ниже себестоимости традиционной труботонной стойки, подобранной расчетом по нормативной методике.

С целью подтверждения описанной в диссертации методики расчета труботонных стоек проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, приведенными в работах Жиренкова А.Н. (2009г., Россия) и Zhi-

wu Yu и др. (2007г., China/USA), Fuyun Huang и др. (2012г., USA/ China) и Amir Fam и др.(2004г., Canada/USA). В исследованиях Жиренкова А.Н. (Рисунок 8) и Zhi-wu Yu и др. (Рисунок 9) нагрузка от испытательной машины передавалась на всё сечение образцов, в исследованиях Fuyun Huang и др. (Рисунок 10) и Amir Fam и др. (Рисунок 11) – только к бетонному ядру. Для измерения деформаций применялись тензодатчики (ТД), тензометрические розетки (ТР), преобразователи линейных перемещений (ПЛП).

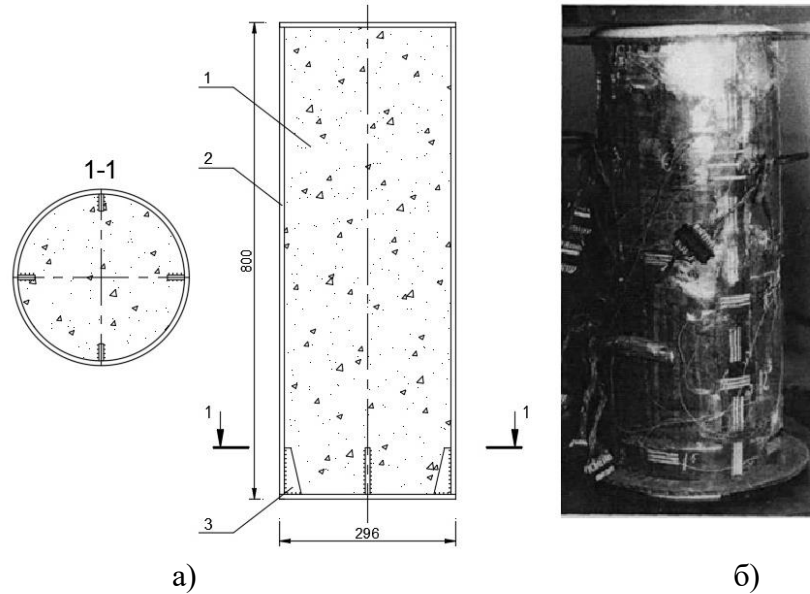


Рисунок 8 – Трубобетонный образец Жиренкова А.Н.: а) конструкция, б) общий вид, 1- бетон, 2- стальная труба, 3- ребро жесткости

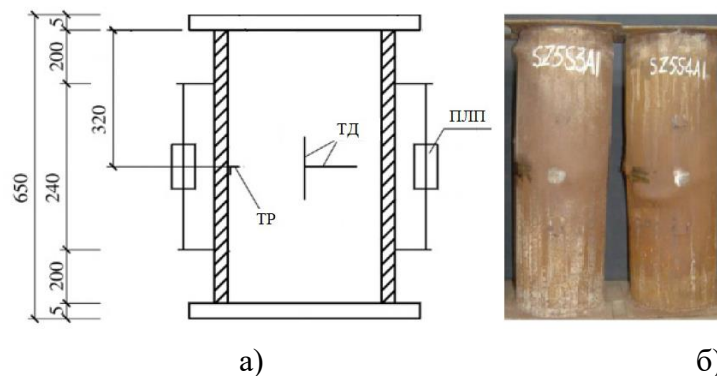


Рисунок 9 – Трубобетонные образцы Zhi-wu Yu и др.: а) общий вид и схема установки измерительных устройств, б) образцы после испытания

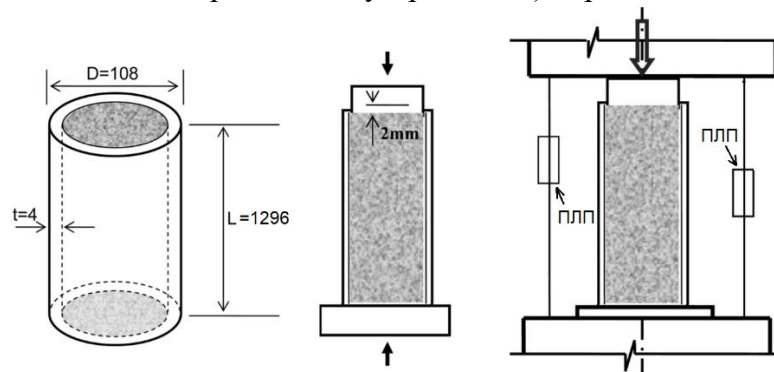


Рисунок 10 – Трубобетонные образцы Fuyun Huang и др.: общий вид и схема установки измерительных устройств

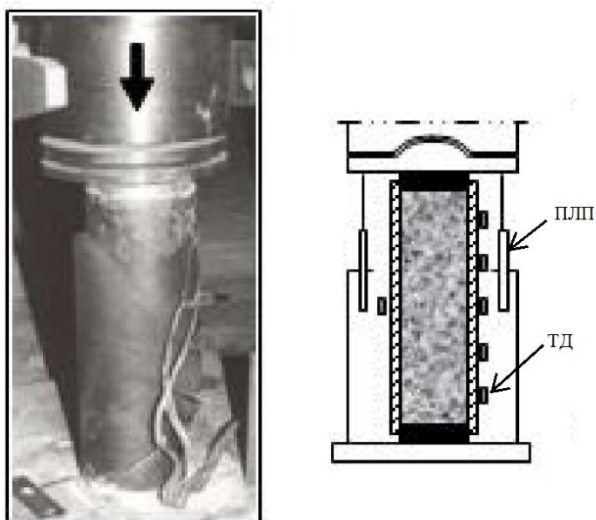


Рисунок 11 – Трубобетонные образцы Amir Fam и др.: общий вид нагружения и схема установки измерительных устройств

Максимальное отклонение данных, полученных расчетом, от экспериментальных данных составляет: 3,1% для продольных и 8,6% для тангенциальных деформаций стальной трубы, 5,3% для продольных деформаций бетонного ядра, 4,5% для осевых напряжений в бетонном ядре и в стальной трубе, 5,5% для усилий, воспринимаемых стальной трубой и 3,7% – бетонным ядром (в сравнении с экспериментами Жиренкова А.Н.); 7,7% и 7,2% для продольных деформаций, 5,6% и 8% для тангенциальных деформаций стальных труб образцов с различными параметрами (в сравнении с экспериментами Zhi-wu Yu и др.); 7,7% для нагрузки на бетонную стойку в стальной обойме при соответствующем укорочении бетонного ядра (в сравнении с экспериментами Fuyun Huang и др.); 7,9% для нагрузки на бетонную стойку в стальной обойме при соответствующем укорочении бетонного ядра, 7,1% для тангенциальных деформаций стальной трубы-обоймы (в сравнении с экспериментами Amir Fam и др.).

Расчет предварительно напряженной трубобетонной стойки предполагает использование результатов моделирования пространственной работы бетонной стойки в стальной обойме и традиционной трубобетонной стойки, для которых было выполнено сравнение с экспериментальными данными. Для более обширного анализа проводится численное экспериментальное исследование методом конечных элементов предварительно напряженной трубобетонной стойки с использованием программного комплекса «Abaqus» (Dassault Systèmes SIMULIA Corp., USA). Геометрические параметры рассчитываемой стойки: высота $h=3\text{ м}$, внешний диаметр трубы 530 мм, толщина стенки 12 мм, выступ бетонного ядра $d=0,005\text{ м}$, бетон В35, сталь С245.

Для описания пространственной работы предварительно напряженной трубобетонной стойки и сравнение результатов с аналитическим решением исследуется график зависимости давления обжатия бетона трубой от величины осевой силы (Рисунок 12).

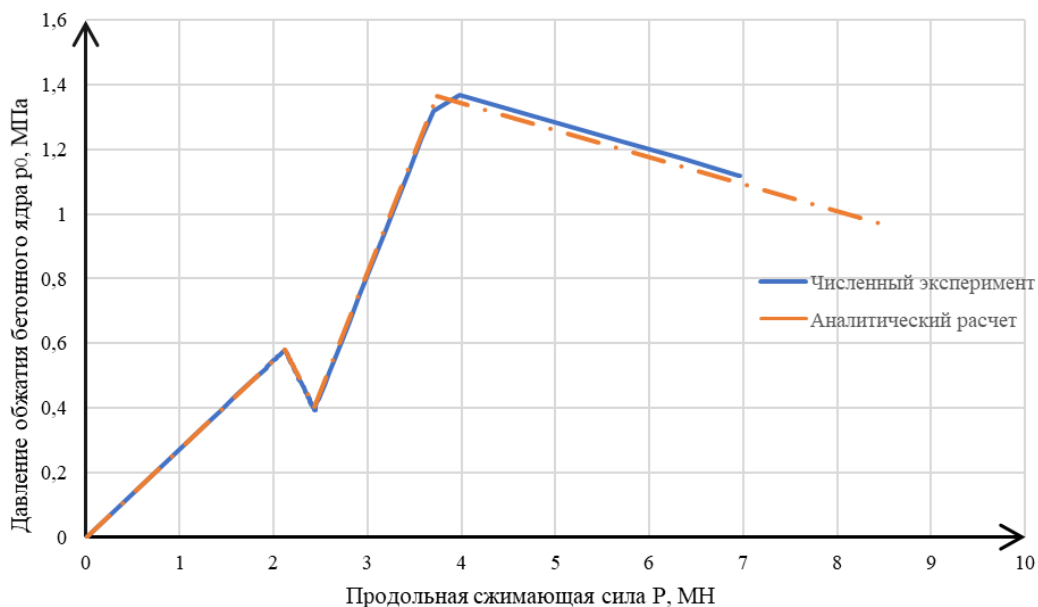


Рисунок 12 – Графики изменения давления обжатия бетона предварительно напряженной трубобетонной стойки

Данные, полученные расчетным путем, сопоставляются с экспериментальными данными, максимальное отклонение расчетных значений от экспериментальных значений составляет 2,3%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках диссертационного исследования в соответствии с основной целью разработана и представлена методика расчета предварительно напряженных конструкций трубобетонных стоек транспортных сооружений по результатам моделирования их напряженно-деформированного состояния.

1. Активное применение трубобетонных стоек сдерживается следующими существующими проблемами: сложность обеспечения совместной работы бетона и стальной трубы (отрыв бетонного сердечника от поверхности трубы); отсутствие единой общепринятой методики расчета трубобетонных конструкций, отражающей особенности пространственной работы.

2. Необходимость совершенствования конструкций трубобетонных стоек транспортных сооружений вызвана повышенным уровнем внецентренно приложенных нагрузок по сравнению с конструкциями гражданских зданий.

3. Получены формулы, позволяющие провести пространственный расчет традиционной трубобетонной стойки, выведена формула определения напряжений взаимодействия стальной трубы и бетонного ядра традиционной трубобетонной стойки, согласно которой стальная оболочка стремится оторваться от бетонного цилиндра, что связано с разностью коэффициентов Пуассона стали и бетона. Бетонное ядро работает на растяжение в радиальном направлении, а значит эффект обжатия не реализуется. Помимо этого, в результате отрыва стальной трубы от бетонного ядра, возникает опасность местной потери устойчивости стенки трубы, что ведет к снижению несущей способности всей конструкции. Факт растяжения бетона трубой в поперечном направлении с последующим ее отрывом наблюдался

при эксплуатации реальных конструкций, а также в экспериментальных исследованиях многих авторов, что подтверждает теоретические исследования, представленные в данной диссертации.

4. Предложены конструкции бетонной стойки в стальной обойме, бетонной стойки в стальной обойме с внутренней несущей трубой, бетонной стойки в композитной обойме, предварительно напряженной трубобетонной стойки. Рассмотрен пример проектирования стойки многоуровневых железнодорожных подъездных путей, объединенных со станцией метрополитена, подобрана предварительно напряженная трубобетонная стойка. Себестоимость предварительно напряженной стойки оказалась на 12% ниже себестоимости традиционной трубобетонной стойки.

5. В результате моделирования напряженно-деформированного состояния предложенных улучшенных трубобетонных конструкций получены формулы, позволяющие провести их пространственный расчет. При работе таких стоек на бетон действуют силы обжатия со стороны трубы, что, как показывают опыты исследователей, оказывает положительное влияние на повышение прочности бетонного ядра. Среди рассмотренных вариантов конструкций предварительно напряженная трубобетонная стойка обладает большей несущей способностью.

6. Произведено сравнение результатов расчета трубобетонных стоек с экспериментальными данными и результатами численного эксперимента. Максимальное расхождение данных, полученных по предложенной в диссертации методике расчета, с экспериментальными данными составило 8,6%, с результатами численного эксперимента – 2,3%.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлениях: изучение вопросов общей устойчивости трубобетонных стоек; исследования ползучести бетонного ядра трубобетонных стоек; учет многократности повторения и динамичности нагрузки при моделировании трубобетонных конструкций транспортных сооружений; разработка конструктивных узлов сопряжения трубобетонных стоек со смежными несущими конструкциям.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния трубобетонных конструкций с учетом нелинейного поведения бетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск, 2017. – № 4(700). – С. 17-29. (№ 1034 из перечня журналов ВАК по состоянию на 27.01.2021).

2. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния бетонной стойки в композитной обойме // Вестник кибернетики. – Сургут, 2018. – № 4(32). – С. 52-58. (№ 375 из перечня журналов ВАК по состоянию на 27.01.2021).

3. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых предварительно напряженных трубобетонных стоек // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск, 2020. – № 12(744). – С. 5-17. (№ 1034 из перечня журналов ВАК по состоянию на 27.01.2021).

Статьи в изданиях, включенных в международные базы цитирования:

1. Snigireva V.A., Gorynin G.L. The nonlinear stress-strain state of the concrete-filled steel tube structures // Magazine of civil engineering. – 2018. – № 7(83). – P. 74–83. (Scopus, Web of Science).

2. Snigireva V.A., Gorynin G.L. Non-linear simulation of load-bearing capacity for steel-encased concrete piles // Advances in Engineering Research. – 2017. – Vol. 133. – P. 816-822. (Web of Science)

Статьи в сборниках материалов конференций и других изданиях:

1. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Пространственный расчет трубобетонной сваи-стойки // Северный регион: Наука, образование, культура. – Сургут, 2015. – № 2(32). – С. 141-147.

2. Снигирева В.А. Решение пространственной задачи об осевом сжатии сваи-оболочки // Наука 60-й параллели: материалы XIX Открытой регион. студ. науч. конф. им. Г.И. Назина. – Сургут, 23 апреля 2015 г. – С. 11-12.

3. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния трубобетонных конструкций // Вестник кибернетики. – Сургут, 2016. – № 1(21). – С. 29-37.

4. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Математическое моделирование композитных трубобетонных конструкций // Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе», посвященная дню рождения великого русского математика академика П.Л. Чебышёва: Тезисы. / (Сургут, 16-20 мая 2016 г.): Тезисы докладов – Сургут: ИЦ СурГУ, 2016. – С. 237-239.

5. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Напряженно-деформированное состояние трубобетонных конструкций при малых нагрузках // Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы строительства», 05-07 апреля 2016 г., г. Новосибирск. – Новосибирск, 2016. – С. 3-8.

6. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Пространственный расчет трубобетонной сваи-стойки с учетом нелинейности диаграммы деформирования бетона // Север России: стратегии и перспективы развития: материалы II Всерос. науч.-практич. конф., 27 мая 2016 г., г. Сургут. – Сургут, 2016. – Т. II. – С. 62-67.

7. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Моделирование НДС трубобетонной сваи-стойки с учетом нелинейного поведения бетона // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации: материалы Международной научно-практической конференции, 07-09 декабря 2016 г., г. Омск. – Омск, 2016. – С. 14-18.

8. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Проблемы применения трубобетонных конструкций // Наука и инновации XXI века: материалы III Всероссийской конференции молодых ученых, 01–02 декабря 2016 г., г. Сургут. – Сургут, 2016. – Т. I – С. 109-113.

9. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Напряженно-деформированное состояние трубобетонных конструкций с учетом нелинейного поведения бетона // Проблемы оптимального проектирования сооружений: доклады 4-й Всероссийской конференции, 11-13 апреля 2017 г., г. Новосибирск. – Новосибирск, 2017. – С.88-97.

10. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Напряженно-деформированное состояние трубобетонных стоек с учетом не-линейности диаграммы деформирования бетона // Север России: стратегии и перспективы развития : материалы III Все-рос. науч.-практич. конф., 26 мая 2017 г., г. Сургут. – Сургут, 2017. – Т. II. – С. 203-210.

11. Снигирева В.А. Перспективы применения трубобетонных конструкций в строительстве // Роль физико-математического и инженерного образования в современном обществе: материалы Все-рос. науч.-практ. конф., 7 ноября 2017 г., г. Сургут. – Сургут, 2017. – С. 74-79.

12. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Инновационные трубобетонные конструкции в сооружениях нефтегазового комплекса // Технологии будущего нефтегазодобывающих регионов: сб. ст. Первой междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, состоявшейся в рамках мероприятий Первого междунар. молодежного науч.-практ. форума «Нефтяная столица», 08-09 февраля 2018 г., г. Сургут. – Сургут, 2018. – С. 70-72.

13. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Моделирование пространственной работы композитной трубобетонной стойки // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов III Международной научно-практической конференции, 29-30 ноября 2018 г., г. Омск. – Омск, 2019. – С. 232-238.

14. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Напряженно-деформированное состояние предварительно напряженной трубобетонной стойки // Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе», посвящённая дню рождения великого русского математика академика П. Л. Чебышёва: труды конференции, 23 мая 2019г, г. Сургут. – Самара, 2019. – С. 295-300.

15. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Моделирование пространственной работы предварительно-напряженной трубобетонной стойки // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, 28-29 ноября 2019 г., г. Омск. – Омск, 2019. – С. 307-313.

16. Снигирева В.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния предварительно напряженной трубобетонной стойки при внецентренном сжатии // Сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», 21-24 апреля 2020 г., г. Томск. – Томск, 2020. – Т.6. – С.81-83.

17. Снигирева В.А., Горынин Г.Л. Внецентренно сжатая предварительно напряженная трубобетонная стойка // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, 03-04 декабря 2020 г., г. Омск. – Омск, 2021. – С. 486-492.

Снигирева Вера Алексеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ СТОЕК
ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 27.12.2021г. Формат 60x84/16
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 140. Заказ №357

Оригинал-макет подготовлен и отпечатан
в Издательском центре СурГУ
Тел. (3462) 76-30-65, 76-30-66, 76-30-67

БУ ВО «Сургутский государственный университет»
628400, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ-Югра,
г.Сургут, пр. Ленина, 1
Тел. (3462) 76-29-00, факс (3462) 76-29-29