

На правах рукописи



ВЕДЕРНИКОВА Алёна Андреевна

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА
ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ,
НАХОДЯЩИХСЯ В ПРЕДЕЛЬНОЙ
И ЗАПРЕДЕЛЬНОЙ СТАДИЯХ РАБОТЫ**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Белый Григорий Иванович

Официальные оппоненты: **Кришан Анатолий Леонидович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г. И. Носова»,
кафедра промышленного и гражданского
строительства, профессор;

Хазов Павел Алексеевич
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет»,
кафедра «Теория сооружений и техническая
механика», заведующий лабораторией
«Непрерывный контроль технического
состояния зданий и сооружений», доцент.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства».**

Защита состоится «02» декабря 2025 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, аудитория №220.

Телефакс: (812) 316-58-73; email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/vedernikova-alyona-andreevna>

Автореферат разослан «09» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попов Владимир Мирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Трубобетонные конструкции (ТБК) широко применяются в строительстве высотных зданий, зданий с повышенными нагрузками на несущий остов, уникальных сооружений – мостов, телебашен, так как отвечают современным требованиям по прочности и устойчивости, экономичности производства и монтажа. Представляя собой комбинацию стальной оболочки и железобетонного (или бетонного) ядра, ТБК обладают рядом преимуществ: высокой экономией металла, повышенной коррозионной и огнестойкостью. Бетон, находясь в обойме круглой трубы, испытывает боковое обжатие, в результате чего несущая способность трубобетонного элемента, работающего на центральное и внецентренное сжатие с малыми эксцентриситетами, повышается до 30–40%.

За последние 80 лет в России и за рубежом ТБК получили применение в высотном строительстве общественных и жилых зданий, строительстве предприятий, транспортных развязок и мостов, линий электропередач и других сооружений.

Расчет на устойчивость трубобетонных элементов в отечественной практике проектирования сводится к расчету на прочность по деформированной схеме и не учитывает фактическую жесткость при потере устойчивости, которая может быть определена при нарушении деформированного равновесного состояния элемента. Задаваясь деформированным состоянием элемента в наиболее нагруженном сечении, можно произвести расчеты на прочность и устойчивость в обратной последовательности, что позволит избавиться от многочисленных итераций, которые в настоящее время используются при расчете по приращению нагрузки до предельного состояния. Рекомендации по определению запредельных состояний ТБК, необходимые в расчетах по защите зданий и сооружений от прогрессирующего разрушения по требованиям СП 385.1325800.2018, в СП 266.1325800.2016 отсутствуют. Определение остаточной несущей способности трубобетонных элементов после потери прочности и устойчивости является неотъемлемой частью расчета зданий и сооружений на устойчивость против прогрессирующего обрушения. Учитывая изложенное, тема диссертации является *актуальной*.

Степень разработанности темы исследования. Основы расчета трубобетонных конструкций заложены А. А. Гвоздевым, Н. Г. Добудогло, В. А. Росновским. Ими была выявлена высокая эффективность трубобетонных конструкций и реализован ряд проектов мостов с их применением.

Обширные экспериментальные и теоретические исследования проводили в разное время Б. И. Голобородько, А. А. Долженко, В. П. Ефимов, А. Л. Кришан, Л. К. Лукша, В. И. Маракуца, И. С. Яровой, В. Н. Кебенко, И. В. Резван, Р. С. Санжаровский, А. А. Сахаров, Л. И. Стороженко, В. М. Сурдин, В. А. Труль, Д. В. Цыгулев, П. А. Хазов, С. А. Харченко, В. А. Шеховцов. Основные задачи, которые решались: устойчивость и прочность трубобетонных элементов при одноосном и двухосном нагружении с применением обыкновенной стали и бетона.

Следует выделить также работы научной школы Магнитогорского строительного института, где ведется разработка методов расчета и различных конструктивных решений трубобетонных элементов. Под руководством А. Л. Кришана были выполнены работы М. А. Астафьевой, А. С. Мельничука, К. С. Кузнецова, А. И. Сагадатова, М. М. Суровцова, которые посвящены совершенствованию методики расчета прочности трубобетонных конструкций, изучению эффективных способов армирования (жесткого, косвенного, преднапряженного), применению самоуплотняющихся бетонов.

За рубежом в 1970-х годах научными исследованиями трубобетонных конструкций занимались *R. Q. Bridge, H. Bode, J. Webb, B. Chen и Z. Chen, W. Furlong, N. J. Gardner, R. B. Knowles и K. Park, M. Tomii, C. Matsui и K. Sakino*, которые экспериментально исследовали упругопластическую работу трубобетонных элементов круглого и квадратного сечения.

В 1990-х г. *H. Shakir-Khalil, R. Bergmann и K. Cederwall* исследовали прочность и устойчивость трубобетонных элементов различного сечения, при использовании обычных и высокопрочных материалов. В России изучением высокопрочных материалов для трубобетонных конструкций занимались В. И. Римшин, А. Р. Олуромби, Д. В. Конин.

В 2017 г. *V. I. Patel, Q. Q. Liang* и др. разработали методику расчета трубобетонных элементов круглого и квадратного сечения на устойчивость при равных концевых эксцентриситетах. В этих работах авторы учитывали фактическую жесткость сечения стержня. При этом предложенный расчет оказался достаточно трудоемким.

Запредельная работа трубобетонных элементов представлена экспериментальными данными и численным моделированием в работах *G. M. Kamil, X. Zhang, M. Dundu, K. Cederwall, J. Zeghniche, X.-F. Yan*. Данные работы предоставляют сведения, полученные экспериментально, о прогибах и деформациях трубобетонных элементов под нагрузкой до потери устойчивости и после нее.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является изучение особенностей напряженно-деформированного состояния трубобетонных элементов конструкций с учетом фактической жесткости, работающих в предельном и запредельном режимах сопротивления, и разработка быстродействующего метода их расчета.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Обобщить обратный численный метод расчета на трубобетонные элементы (ТБЭ) и изучить особенности предельных и запредельных напряженно-деформированных состояний в их поперечных сечениях при действии продольной сжимающей силы с изгибающими моментами в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

2. Разработать метод расчета и изучить особенности напряженно-деформированных состояний ТБЭ для стадий до и после потери общей устойчивости, основанный на обратном численно-аналитическом решении деформационной задачи с учетом фактической жесткости.

3. Выполнить анализ полученных результатов исследования предельных и запредельных состояний по прочности и устойчивости. Выявить зависимости величин остаточной несущей способности в запредельном состоянии в зависимости от физических и геометрических характеристик трубобетонных элементов. Получить новые результаты об остаточной несущей способности запредельных состояний.

4. Сопоставить результаты расчета на прочность и устойчивость по предлагаемым методам с данными экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов, а также с результатами расчета, полученными МКЭ и по действующим нормам.

5. Разработать инженерную методику расчета ТБЭ на прочность и устойчивость, основанную на применении обратного метода расчета, позволяющего учитывать фактическую жесткость элемента.

6. Установить зависимость остаточной несущей способности ТБЭ от уровня запредельных деформаций и разработать инженерную методику ее расчета от допускаемых СП 385.1325800.2018 деформаций после потери прочности и устойчивости.

Научная гипотеза: полагается, что обратный численно-аналитический метод решений задач может быть развит и распространен на расчет трубобетонных элементов, работающих в предельной и запредельной стадии сопротивления, с получением новых данных о запредельных режимах работы и остаточной несущей способности трубобетонных элементов конструкций.

Объект исследования – трубобетонный элемент, состоящий из стальной трубы и железобетонного (бетонного) ядра.

Предмет исследования – характеристики напряженно-деформированного состояния трубобетонных элементов конструкций в предельных и запредельных стадиях работы, обратный численно-аналитический метод.

Область исследования соответствует требованиям Паспорта научной специальности ВАК – 2.1.1. «Строительные конструкции, здания и сооружения», пункт 1 «Построение и развитие теории, разработка аналитических и вычислительных методов расчёта механической безопасности и огнестойкости, рационального проектирования и оптимизации конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений».

Научная новизна исследования.

1. Доказана возможность применения и произведена адаптация для трубобетонных элементов конструкций обратного метода расчета прочности, устойчивости и остаточной несущей способности в запредельных деформированных состояниях.

2. Установлены зависимости остаточной несущей способности после потери прочности и устойчивости от различных сочетаний физических и геометрических характеристик трубобетонных элементов.

3. Определена зависимость снижения остаточной несущей способности трубобетонных элементов в запредельных состояниях от роста деформаций.

Теоретическая значимость работы.

1. Предложенный метод расчета ТБЭ, основанный на обратном решении задачи прочности и устойчивости от заданного деформированного состояния в наиболее нагруженном сечении до определения соответствующего фактического нагружения, позволяют получить достоверные результаты с достаточной степенью точности как для предельных, так и для запредельных состояний и ускорить процесс решения на порядок по сравнению с расчетом, основанным на нелинейной деформационной модели.

2. Получено численно-аналитическое решение задачи определения напряженно-деформированного состояния для запредельных стадий работы ТБЭ после потери прочности и устойчивости и остаточной несущей способности, необходимое в расчете по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения.

Практическая значимость работы.

1. Разработаны быстродействующие метод и программа расчета на прочность и устойчивость трубобетонных элементов, позволяющие получить необходимое и достаточное число данных, обеспечивающих возможность оптимального проектирования.

2. Предложены рекомендации по совершенствованию практических методов расчета трубобетонных элементов круглого и прямоугольного профилей на прочность и устойчивость.

3. Получены и проанализированы новые результаты о запредельной работе ТБЭ, на основании которых разработана практическая методика расчета, позволяющая получить значения остаточной несущей способности трубобетонных элементов по мере развития деформаций, необходимая в расчетах при обеспечении устойчивости конструктивной схемы сооружения против прогрессирующего обрушения.

Методология и методы исследования. В качестве методологической базы диссертационного исследования используются положения деформационной теории упругих стержней, обратный численный и численно-аналитический метод, апробированный алгоритм «сечение», особенностью которого является учет физической нелинейности материалов введением дополнительного догружения фиктивными силами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методы расчета ТБЭ на прочность, устойчивость в том числе для запредельных стадий сопротивления, построенные в обратной последовательности, позволяющие ускорить процесс решения на порядок по сравнению с расчетами, основанными на нелинейной деформационной модели.

2. Результаты исследования запредельных состояний трубобетонных элементов по прочности и устойчивости.

3. Рекомендации по совершенствованию практических методов расчета ТБЭ круглого и прямоугольного сечений на прочность и устойчивость в зависимости от многочисленных сочетаний механических и геометрических характеристик элементов.

4. Зависимости снижения остаточной несущей способности от роста значения деформаций в запредельных стадиях работы элементов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается: использованием общепринятых расчетных допущений:

- теории деформирования упругих стержней с замкнутым профилем;
- стандартных моделей поведения упругопластических материалов. экспериментально-теоретической проверкой:
- хорошим согласованием результатов расчета на основе разработанных методов с результатами известных решений частных задач;
- хорошей сходимостью с многочисленными экспериментальными результатами, опубликованными в научных работах отечественных и зарубежных авторов. численным подтверждением:
- достоверность теоретических выводов подтверждена путем сопоставления с результатами расчета методом конечных элементов в среде программного комплекса ANSYS 18.0.

Апробация работы. Основные выводы и результаты диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «Строительные конструкции здания и сооружения. От науки до инноваций», посвященная 90-летию кафедр деревянных, железобетонных и каменных, и металлических конструкций, Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 10–11 июня 2021 г.

- 74-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» 5–9 апреля 2021 г.

- Научная конференция – XIII Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г. Л., «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», 5–7 июля 2022 г.

- Научная конференция – XIV Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г. Л., «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», 3–6 июля 2023 г.

- Научная конференция – XV Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г. Л., «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», 2–4 июля 2024 г.

- Научная конференция – LXXVIII Международная научно-практическая конференция «Архитектура – Строительство – Транспорт – Экономика», 21–22 ноября 2024 г.

Публикации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в 10 печатных работах, в том числе 5 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ, а также в 2 свидетельства о регистрации программ ЭВМ.

Внедрение результатов работы.

Результаты исследований в практической области подтверждаются справкой о внедрении в работу ООО «Спектр Глобал», о чем имеются подтверждающие внедрение документы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы – 156 страниц машинописного текста, включая 31 таблицу, 64 рисунка и 63 формулы. Список литературы содержит 131 наименование, в том числе 53 – на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность совершенствования методов расчета характеристик предельных и запредельных состояний трубобетонных элементов, работающих в условиях загрузки продольной сжимающей силой с одно- и двухосными эксцентриситетами, проанализирована степень разработанности темы исследования, проведен системный анализ существующих экспериментальных и теоретических разработок в области определения особенностей напряженно-деформированных состояний трубобетонных элементов в предельной и запредельной стадии сопротивления, поставлены цели и задачи проводимых исследований, приведена научная новизна, сформулирована теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, даны сведения об апробации результатов исследования и количестве публикаций.

В первой главе приведен краткий обзор и анализ экспериментальных и теоретических исследований трубобетонных конструкций, работающих в предельных и запредельных стадиях сопротивления, даны сведения о характере работы трубобетонных элементов под нагрузкой. На основании работ Р. С. Санжаровского, В. А. Шеховцова, И. С. Ярового, *T. Perea, V. I. Patel, Q. Q. Liang, M. Hadi* и др. изложены основные методы расчета ТБЭ. Проанализированы результаты экспериментальных исследований, приведенных в работах А. Л. Кришана, Р. С. Санжаровского, Д. В. Цыгулева, И. С. Ярового, Л. И. Стороженко, *D. Liu, M. Mursi, B. Uy, S. Tokgoz, K. Cederwall, H. Shakir-Khalil* и многих других.

Действующие нормы проектирования СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» позволяют производить расчет на прочность в упрощенном виде по методу предельного равновесия и в общем виде по нелинейной деформационной модели. Расчет устойчивости сводится к решению задачи прочности по деформированной схеме. Рекомендации по расчету остаточной несущей способности после потери устойчивости, необходимые для обеспечения устойчивости конструктивной схемы сооружения против прогрессирующего обрушения, в СП 266 отсутствуют. При этом не учитывается фактическая жесткость сечения.

На основании изученных научных материалов сделан вывод о том, что назрела необходимость в совершенствовании существующих методов расчета

ТБК на прочность и устойчивость, и разработке новых при их работе в запредельных стадиях работы. Для решения поставленных задач необходимо выполнить обобщение обратного численно-аналитического метода на расчет трубобетонных элементов, что позволит получить достаточно большой объем данных для построения практического метода расчета.

Во второй главе изложен метод расчета прочности и запредельных состояний поперечных сечений ТБЭ с использованием унифицированных диаграмм работы стали и бетона, основанный на обратном численно-аналитическом методе, разработанном Г.И. Белым применительно к расчету прочности и устойчивости стальных конструкций. Рассмотрен расчет круглых и прямоугольных поперечных сечений, когда в них действует продольная сила N с изгибающими моментами в двух главных плоскостях M_x и M_y (см. рис. 1), приводятся способы учета начальных напряжений $\bar{\sigma}_{k,oc}$ и упрочнения металла в гнutosварных стальных трубах, а также увеличения прочности бетонного ядра в следствие обжатия в трубе круглого сечения.

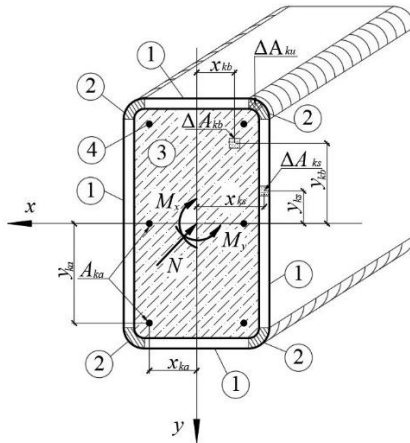


Рисунок 1 – Загрузка трубобетонного элемента прямоугольного сечения:
1 – плоские участки трубы, 2 – участкигиба, 3 – бетон, 4 – арматурные стержни.

Механические свойства бетона и арматуры приведем к соответствующим характеристикам стальной трубы, тогда геометрические характеристики приведенного сечения равны:

$$A_{red} = A_s \left(1 + \frac{A_b E_b}{A_s E_s} + \frac{A_a E_a}{A_s E_s} \right);$$

$$I_{x,red} = I_{x,s} \left(1 + \frac{I_{x,b} E_b}{I_{x,s} E_s} + \frac{I_{x,a} E_a}{I_{x,s} E_s} \right); \quad I_{y,red} = I_{y,s} \left(1 + \frac{I_{y,b} E_b}{I_{y,s} E_s} + \frac{I_{y,a} E_a}{I_{y,s} E_s} \right); \quad (1)$$

где площади сечения A , их моменты инерции I_x, I_y , расчетные сопротивления R и модули упругости E , обозначенные индексом “ s ”, “ b ” и “ a ”, относятся к стальной трубе, бетонному заполнению и продольному армированию стержнями, соответственно.

Для реализации численного алгоритма расчетное сечение трубобетонного элемента за исключением арматурных стержней (см. рис. 1) разбивается на достаточно малые площадки $\Delta A_{ks}, \Delta A_{ksu}$ и ΔA_{kb} с координатами центра тяжести $x_{ks}, y_{ks}; x_{ku}, y_{ku}$ и x_{kb}, y_{kb} соответственно, где дополнительный индекс “ u ” вводится для участков с упрочненной сталью. При этом количество площадок устанавливается для бетонного заполнения n_b , стальной трубы n_s – для плоских участков, n_{su} – для местгиба (упрочненные участки). Каждый арматурный стержень площадью A_{ka} в сечении принимается за одну площадку. Количество стержней арматуры – n_a .

Деформированное состояние по критерию предельной $\bar{\varepsilon}_{lim}$ (решение задачи прочности) или запредельной $\bar{\varepsilon}_{зап}$ (остаточная прочность) деформации наиболее напряженного волокна задается посредством действия в наиболее напряженном поперечном сечении неограниченно упругого трубобетонного элемента «упругих» усилий N^*, M_x^*, M_y^* с параметрами \bar{N}^*, m_x^*, m_y^* .

Решение задачи проводится в безразмерном виде с общим параметром загрузки $\bar{N}^* = N^*/R_y A_{red} = \bar{\varepsilon}_{зад} (1 + m_x^* + m_y^*)^{-1}$, который устанавливается по $\bar{\varepsilon}_{зад}$ ($\bar{\varepsilon}_{lim}$ или $\bar{\varepsilon}_{зап}$). Тогда напряженное и деформированное состояния можно представить в одном виде:

$$\bar{\sigma}_s(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{\varepsilon}_s(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{N}^* (1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x}), \quad (2)$$

где $m_x^* = e_y^*/\rho_x$, $m_y^* = e_x^*/\rho_y$ – относительные эксцентриситеты; $e_y^* = M_x^*/N^*$, $e_x^* = M_y^*/N^*$; $\rho_x = I_{x,red}(y_* A_{red})^{-1}$, $\rho_y = I_{y,red}(x_* A_{red})^{-1}$ – ядровые расстояния; $\bar{x} = x/x_*$; $\bar{y} = y/y_*$; x_*, y_* – координаты наиболее напряженного волокна.

Для определения соответствующего (2) фактического предельного (запредельного) состояния воспользуемся гипотезой плоских сечений, в соответствии с которой относительная деформация k -го волокна как центра тяжести площадки ΔA_k представим в виде:

$$\bar{\varepsilon}_k = \bar{\varepsilon}_{k,oc} + \bar{\varepsilon}_0 - \bar{v}'' \check{y}_k - \bar{u}'' \check{x}_k. \quad (3)$$

где $\bar{\varepsilon}_0 = \varepsilon_0 E_s / R_s$; $\bar{v}'' = v'' E_s / R_s \cdot \rho_x$; $\bar{u}'' = u'' E_s / R_s \cdot \rho_y$; $\tilde{x}_k = x_k / \rho_y$; $\tilde{y}_k = y_k / \rho_x$; ε_0 – относительная деформация оси стержня, имеющего кривизны v'' , u'' – при изгибе относительно осей x и y соответственно.

Используя (3), представим соответствующие предельному (запредельному) деформированному состоянию (2) уравнения равновесия трубобетонного элемента в сечении

$$\left. \begin{aligned} \bar{N} &= \bar{\varepsilon}_0 \bar{A}_{ef} + \bar{v}'' \bar{S}_x + \bar{u}'' \bar{S}_y \\ \bar{N} m_x &= -\bar{\varepsilon}_0 \bar{S}_x - \bar{v}'' \bar{I}_{x,ef} + \bar{u}'' \bar{I}_{xy,ef} \\ \bar{N} m_y &= -\bar{\varepsilon}_0 \bar{S}_y + \bar{v}'' \bar{I}_{xy,ef} - \bar{u}'' \bar{I}_{y,ef} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \bar{A}_{ef} &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \Delta \bar{A}_{ka} \\ \bar{S}_x &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \tilde{y}_{ks} \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \tilde{y}_{ku} \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \tilde{y}_{kb} \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \tilde{y}_{ka} \Delta \bar{A}_{ka} \\ \bar{S}_y &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \tilde{x}_{ks} \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \tilde{x}_{ku} \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \tilde{x}_{kb} \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \tilde{x}_{ka} \Delta \bar{A}_{ka} \\ \bar{I}_{x,ef} &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \tilde{y}_{ks}^2 \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \tilde{y}_{ku}^2 \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \tilde{y}_{kb}^2 \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \tilde{y}_{ka}^2 \Delta \bar{A}_{ka} \\ \bar{I}_{y,ef} &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \tilde{x}_{ks}^2 \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \tilde{x}_{ku}^2 \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \tilde{x}_{kb}^2 \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \tilde{x}_{ka}^2 \Delta \bar{A}_{ka} \\ \bar{I}_{xy,ef} &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \tilde{x}_{ks} \tilde{y}_{ks} \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \tilde{x}_{ku} \tilde{y}_{ku} \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \tilde{x}_{kb} \tilde{y}_{kb} \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \tilde{x}_{ka} \tilde{y}_{ka} \Delta \bar{A}_{ka} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

\bar{A}_{ef} – относительная рабочая площадь сечения, \bar{S}_x и \bar{S}_y – относительные статические моменты рабочей площади, $\bar{I}_{x,ef}$, $\bar{I}_{y,ef}$ и $\bar{I}_{xy,ef}$ – относительные осевые и центробежные моменты инерции соответственно.

$\Delta \bar{A}_k = \Delta A_k / A_{red}$; $\bar{E}_{ks} = tg \alpha_{ks}$ и $\bar{E}_{ku} = tg \alpha_{ku}$ – относительные секущие модули стали; $\bar{E}_{kb} = tg \alpha_{kb} \cdot E_b / E_s$; $tg \alpha_{kb}$ – то же для бетона.

Сопоставляя (2) и (3), можно увидеть, что:

$$\bar{\varepsilon}_0 = \bar{N}^* ; \bar{v}'' = -\bar{N}^* m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} ; \bar{u}'' = -\bar{N}^* m_y^* \frac{\rho_y}{x_*}. \quad (6)$$

Тогда, используя систему (4), с учетом (6) получим фактические параметры предельных (запредельных) усилий при упругопластической работе материалов и возможном выключении из работы бетона в растянутой зоне:

$$\bar{N}_{ef} = \bar{N}^* \cdot C_1 ; m_x = C_2 / C_1 ; m_y = C_3 / C_1, \quad (7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \bar{A}_{ef} - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_x - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_y \\ C_2 &= -\bar{S}_x + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{x,ef} - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{xy,ef} \\ C_3 &= -\bar{S}_y - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{xy,ef} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{y,ef} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Имея (7) с принятием $\bar{\varepsilon}_{зад.} = \bar{\varepsilon}_{lim}$, практический метод расчета на прочность можно привести к виду:

$$\frac{1}{\gamma_c R_s c_p} \left(\frac{N}{A_{red}} + \frac{M_x}{I_{x,red}} y_* + \frac{M_y}{I_{y,red}} x_* \right) \leq 1, \quad (9)$$

где $c_p = \bar{N}_{ef} (1 + m_x + m_y)$. (10)

При этом напомним, что A_{red} , $I_{x,red}$ и $I_{y,red}$ – характеристики сечения, приведенные к материалу трубы. В (10) коэффициент c_p учитывает развитие пластических деформаций и выключение из работы бетонного заполнения в растянутой зоне.

Таким образом, задавая общим нагружением безразмерными силовыми факторами m_x^* , m_y^* в сечении неограниченно упругого элемента, устанавливаем предельное деформированное состояние по $\bar{\varepsilon}_{lim}$ с параметром \bar{N}^* , которое, затем, используется для определения с помощью алгоритма «сечение», фактически воспринимаемые этим элементом предельные по прочности усилия m_x , m_y и \bar{N} по (7). Для практического решения задачи безразмерные силовые факторы m_x^* , m_y^* принимаются в виде диапазона, а поиск по нему значений, соответствующих m_x , m_y и \bar{N} осуществляется методом дихотомии и находится за 7–10 итераций.

Результаты расчета приведенным методом были сопоставлены с расчетом методом КЭ и по НДМ для элементов круглого и прямоугольного сечения при действии продольной сжимающей силы и изгибающих моментов в одной и двух плоскостях. Сопоставление результатов расчета обратным методом с результатами расчета по МКЭ на прочность показывает удовлетворительную сходимость в пределах $-13,2 \dots 12,0\%$. Сопоставление результатов расчета обратным методом с результатами расчета по НДМ показывает удовлетворительную сходимость в пределах $-8,2 \dots 7,3\%$.

При запредельной работе ТБЭ остаточная несущая способность по прочности составила при $m_x = 0,25$ от 0,22 до 0,65 от максимальной, а при $m_x = 1,5$ – от 0,29

до 0,69 (графики зависимости остаточной прочности от величины максимальной запредельной деформации представлены на рис. 2–4).

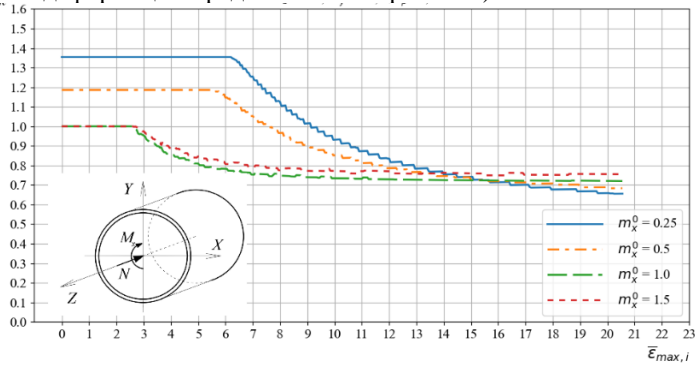


Рисунок 2 – Зависимость при $R_b = 27,5$ МПа, $R_s = 330$ МПа, $t / D_p = 0,0361$

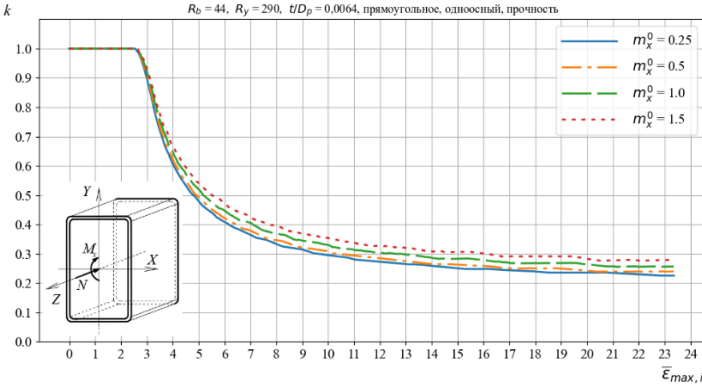


Рисунок 3 – Зависимость при $R_b = 44$ МПа, $R_s = 290$ МПа, $t / H = 0,0064$

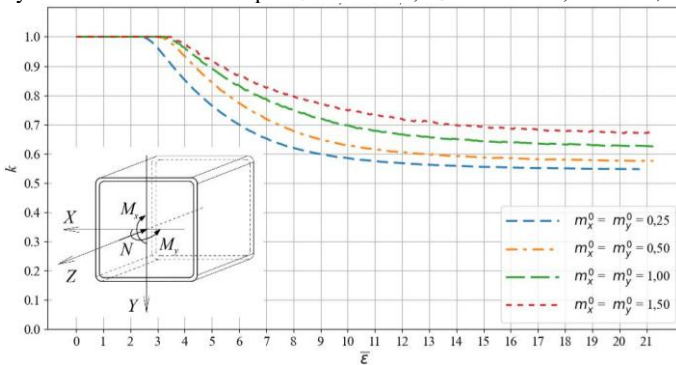


Рисунок 4 – Зависимость при $R_b = 44$ МПа, $R_s = 290$ МПа, $t / H = 0,0361$

Чем большее значение принимает соотношение расчетного сопротивления стали к расчетному сопротивлению бетона R_s/R_b , тем выше значение относительной остаточной несущей способности. Трубобетонные элементы круглого сечения с бетоном, находящимся в условиях бокового обжатия трубой (малые эксцентриситеты) в запредельной стадии работы показывают уменьшение остаточной несущей способности до уровня близкого к элементам, где эффект обжатия не возникает (большие эксцентриситеты). Доля вклада в остаточную несущую способность бетона значительно уменьшается при запредельной работе: с 46,83...65,25% до 2,6...13,15%, основную долю усилий воспринимает стальная труба (рис. 5).

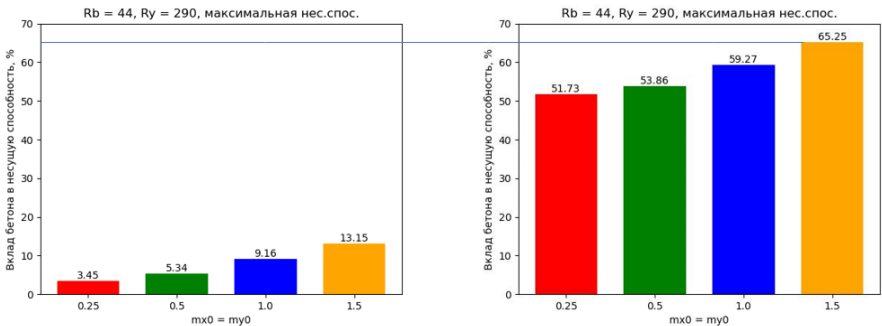
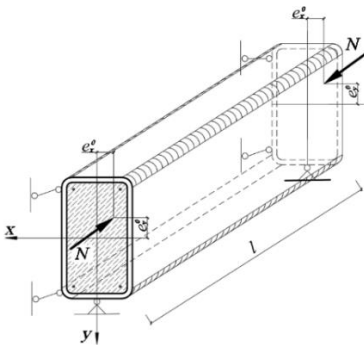


Рисунок 5 – Диаграммы вклада бетонной части в несущую способность при расчете остаточной несущей способности (слева) и при обычном расчете на прочность (справа), %

В третьей главе приведен метод расчета по предельным и запредельным состояниям по устойчивости ТБЭ. Учитывая изложенное в гл. 2, рассматривается трубобетонный стержень, нагруженный продольной силой N с равными концевыми эксцентриситетами $e_x^0 = M_y^0/N$, $e_y^0 = M_x^0/N$.

а)



б)

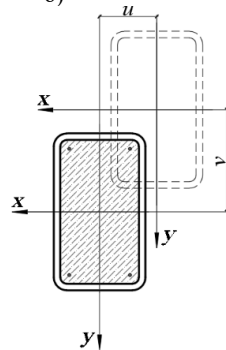


Рисунок 6 – Расчетная модель стержневого элемента:
а – схема нагружения; б – схема деформирования

Деформированное состояние элемента, согласно принятым допущениям, можно определить решением следующих всем известных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} EI_{x,red} v'' + Nv &= -Ne_y^0 \\ EI_{y,red} u'' + Nu &= -Ne_x^0 \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где u и v — перемещения сечения в направлении осей x и y соответственно (рис. 6б).

Приближенные решения уравнений (3.1) широко известны в литературе и имеют вид

$$v(z) = v_0(z) \left(1 - \frac{N}{N_{cr,x}} \right)^{-1}; \quad u(z) = u_0(z) \left(1 - \frac{N}{N_{cr,y}} \right)^{-1}, \quad (12)$$

где $v_0(z)$ и $u_0(z)$ — перемещения, полученные расчетом по недеформированной схеме; $N_{cr,x}$ и $N_{cr,y}$ — критические силы при изгибе относительно осей x и y соответственно.

Воспользуемся этими решениями для принятых схем загрузки и представим деформационные усилия в наиболее напряженном сечении стержня:

$$M_x = Ne_y^0 K_{d,x}; \quad M_y = Ne_x^0 K_{d,y}, \quad (13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} K_{d,x} &= 1 + \frac{\phi_{ex} \bar{\lambda}_x^{-2}}{8} \left(1 - \frac{\phi_{ex} \bar{\lambda}_x^{-2}}{\pi^2} \right)^{-1} \\ K_{d,y} &= 1 + \frac{\phi_{ey} \bar{\lambda}_y^{-2}}{8} \left(1 - \frac{\phi_{ey} \bar{\lambda}_y^{-2}}{\pi^2} \right)^{-1} \end{aligned} \right\}; \quad (14)$$

$K_{d,x}$ и $K_{d,y}$ — деформационные коэффициенты, учитывающие влияние переме-

щений на соответствующие моменты M_x и M_y ; $\phi = N/R_s A_{red}$; $\bar{\lambda}_x = \frac{l_{ef,x}}{i_x} \sqrt{\frac{R_s}{E_s}}$;

$\bar{\lambda}_y = \frac{l_{ef,y}}{i_y} \sqrt{\frac{R_s}{E_s}}$ — условные гибкости стержня.

Имея (13), представим напряженное состояние в наиболее нагруженном сечении ($\bar{z} = 0,5$) в безразмерных параметрах $\bar{\sigma} = \sigma/R_s$ при действии N , M_x и M_y :

$$\bar{\sigma}_{\max}(\bar{x}, \bar{y}) = \phi_{exy} \left(1 + m_x^0 \bar{y} K_{d,y} + m_y^0 \bar{x} K_{d,x} \right), \quad (15)$$

где $\bar{y} = y/y_*$; $\bar{x} = x/x_*$; x_* , y_* — координаты наиболее напряженного волокна,

$m_x^0 = e_y^0/\rho_x$; $m_y^0 = e_x^0/\rho_y$.

Таким образом, используя «нормативные» расчетные модели неограниченно упругого стержневого элемента, подверженного действию продольной силы с равными двухосными концевыми эксцентриситетами, расчетом по деформированной схеме в аналитическом виде получено выражение, описывающее напряженное состояние в наиболее нагруженном сечении.

Следуя расчету на прочность, деформированное состояние в наиболее напряженном сечении неограниченно упругого трубобетонного элемента установим посредством действия «упругих» моментов, характеризующихся относительными эксцентриситетами m_x^* и m_y^* . Тогда приняв $\varphi^* = N^*/R_s A_{red}$ за общий параметр загрузки, представим напряженное и деформированное состояние при $\bar{\sigma}_{\max,i} = \bar{\varepsilon}_{\max,i}$ одним выражением:

$$\bar{\sigma}_i(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{\varepsilon}_i^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi_{exy,i}^* \left(1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x} \right), \quad (16)$$

$$\text{где } \varphi_{exy,i}^* = \bar{\varepsilon}_{\max,i} \left(1 + m_x^* + m_y^* \right)^{-1}, \quad (17)$$

где $\bar{\varepsilon}_{\max,i}$ – i -я деформация наиболее напряженного волокна.

Используя (16), с помощью алгоритма «Сечение» (см. (7)–(8) с заменой \bar{N}^* , \bar{N} , m_x^* , m_y^* на соответствующие $\varphi_{exy,i}^*$, $\varphi_{exy,i}$, $m_{x,i}^*$, $m_{y,i}^*$), получим параметры действующих усилий:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{exy,i} &= \varphi_{exy,i}^* \left(\bar{A}_{ef} - m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_x - m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_y \right) \\ m_{x,i} &= \frac{\varphi_{exy,i}^*}{\varphi_{exy,i}} \left(-\bar{S}_x + m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{x,ef} - m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{xy,ef} \right) \\ m_{y,i} &= \frac{\varphi_{exy,i}^*}{\varphi_{exy,i}} \left(-\bar{S}_y - m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{xy,ef} + m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{y,ef} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

где \bar{A}_{ef} , \bar{S}_x , \bar{S}_y , $\bar{I}_{x,ef}$, $\bar{I}_{y,ef}$, $\bar{I}_{xy,ef}$ определяются по (5) при заданных значениях $\bar{\varepsilon}_{\max,i}$.

При этом параметры фиктивных усилий устанавливаются:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{exy,\phi,i} &= \varphi_{exy,i}^* \left(1 - \bar{A}_{ef} + m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_x + m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_y \right) \\ m_{x,\phi,i} &= \frac{\varphi_{exy,i}^*}{\varphi_{exy,i}} \left(\bar{S}_x + m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{x,\phi} + m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{xy,ef} \right) \\ m_{y,\phi,i} &= \frac{\varphi_{exy,i}^*}{\varphi_{exy,i}} \left(\bar{S}_y + m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{xy,ef} + m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{y,\phi} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

$$\text{где } \bar{I}_{x,\phi} = \frac{I_{x,red}}{\rho_x^2 A_{red}} - \bar{I}_{x,ef}; \quad \bar{I}_{y,\phi} = \frac{I_{y,red}}{\rho_y^2 A_{red}} - \bar{I}_{y,ef}.$$

Развитие пластических деформаций с учетом выключения из работы бетона в растянутой зоне, происходящих в наиболее напряженном сечении, принимаются распространенными (в запас устойчивости) по всей длине стержня. Обобщая метод решения Г.И. Белого, рассмотрим предельное состояние по изгибной в двух плоскостях деформированной схеме при совместном действии фактической $N_{exy,i}$ и фиктивной $N_{exy,\phi,i}$ силами с соответствующими параметрами $\Phi_{exy,i}$ и $\Phi_{exy,\phi,i}$ для труботетонных элементов:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = & \Phi_{exy,i} \left(1 + m_{x,i}^0 \bar{y} \cdot K_{d,x,i}^{np} + m_{y,i}^0 \bar{x} \cdot K_{d,y,i}^{np} \right) + \\ & + \Phi_{exy,\phi,i} \left(1 + m_{x,\phi,i}^0 \bar{y} \cdot K_{d,x,i}^{np} + m_{y,\phi,i}^0 \bar{x} \cdot K_{d,y,i}^{np} \right), \end{aligned} \quad (20)$$

где по (14)

$$\left. \begin{aligned} K_{d,x,i}^{np} &= 1 + \frac{\Phi_{ex,i} \bar{\lambda}_x^2}{8} \left(1 - \frac{\Phi_{ex,i} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2} \right)^{-1} \\ K_{d,y,i}^{np} &= 1 + \frac{\Phi_{ey,i} \bar{\lambda}_y^2}{8} \left(1 - \frac{\Phi_{ey,i} \bar{\lambda}_y^2}{\pi^2} \right)^{-1} \end{aligned} \right\}.$$

В (20) неизвестными являются концевые относительные эксцентриситеты $m_{x,i}^0$ и $m_{y,i}^0$, которые можно получить при сопоставлении (20) и (16):

– при $\bar{x} = 0$; $\bar{y} = 1$:

$$\Phi_{exy,i} \left(1 + m_{x,i}^0 K_{d,x,i}^{np} \right) + \Phi_{exy,\phi,i} \left(1 + m_{x,\phi,i}^0 K_{d,x,i}^{np} \right) = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i} (1 + m_x^*)}{1 + m_x^* + m_y^*} \quad (21)$$

– при $\bar{x} = 1$; $\bar{y} = 0$:

$$\Phi_{exy,i} \left(1 + m_{y,i}^0 K_{d,y,i}^{np} \right) + \Phi_{exy,\phi,i} \left(1 + m_{y,\phi,i}^0 K_{d,y,i}^{np} \right) = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i} (1 + m_y^*)}{1 + m_x^* + m_y^*} \quad (22)$$

тогда:

$$m_{x,i}^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i} (1 + m_x^*)}{(1 + m_x^* + m_y^*) \Phi_{exy,i} K_{d,x,i}^{np}} - \left[\frac{\Phi_{exy,\phi,i}}{\Phi_{exy,i}} \left(\frac{1}{K_{d,x,i}^{np}} + m_{x,\phi,i}^0 \right) + \frac{1}{K_{d,x,i}^{np}} \right]; \quad (23)$$

$$m_{y,i}^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i} (1 + m_y^*)}{(1 + m_x^* + m_y^*) \Phi_{exy,i} K_{d,y,i}^{np}} - \left[\frac{\Phi_{exy,\phi,i}}{\Phi_{exy,i}} \left(\frac{1}{K_{d,y,i}^{np}} + m_{y,\phi,i}^0 \right) + \frac{1}{K_{d,y,i}^{np}} \right]; \quad (24)$$

Рассматривая i -е предельное напряженное состояние при совместном действии $\varphi_{ex,i}$ и $\varphi_{ex,\phi,i}$ по изгибной, например, относительно оси x деформированной схеме ($e_y^0 \neq 0$, $e_x^0 = 0$), имеем

$$m_{x,i}^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max,i}}{\varphi_{exy,i} K_{d,x,i}} - \left[\frac{\varphi_{exy,\phi,i}}{\varphi_{exy,i}} \left(\frac{1}{K_{d,x,i}} + m_{x,\phi,i}^0 \right) + \frac{1}{K_{d,x,i}} \right]; \quad (25)$$

$$\varphi_{ex,i} = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max,i}}{1 + m_x^*} \left(\bar{A}_{ef,i} - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_{x,i} \right); \quad \varphi_{ex,\phi,i} = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max,i}}{1 + m_x^*} - \varphi_{ex,i}; \quad m_{x,\phi,i} = \frac{\bar{S}_x + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{x,\phi,i}}{1 - \bar{A}_{ef,i} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_{x,i}}.$$

Таким образом, по i -му упругому деформированному состоянию $\bar{\varepsilon}_{\max,i} = \bar{\varepsilon}_{\text{пц}} + \Delta \bar{\varepsilon} \cdot i$ ($i=1, \dots, n$, где $n = \left(0,025 E_s / R_s - \bar{\varepsilon}_{\text{пц}} \right) / \Delta \bar{\varepsilon}$), определяемому по заданным деформационным относительным двухосным эксцентриситетам m_x^* , m_y^* , обратным численно-аналитическим методом расчета можно определить относительные параметры фактического нагружения трубобетонного элемента на его опорах: $\varphi_{exy,i}$, $m_{x,i}^0$, $m_{y,i}^0$.

Для получения фактического параметра нагружения, соответствующего коэффициенту устойчивости, будем вести обратный деформационный расчет трубобетонных элементов при заданных деформациях наиболее напряженного волокна по приращению деформированных состояний в наиболее нагруженном сечении по максимальной деформации наиболее напряженного волокна с $\bar{\varepsilon}_{\max,i} = \varepsilon_{\max,i} E_s / R_s$ ($R_{\text{нл}} / R_s \leq \bar{\varepsilon}_{\max,i} \leq 0,025 E_s / R_s$) с координатами x_* и y_* . Зависимость общего параметра нагружения φ_{exy} от всего диапазона до предельных, предельных и запредельных состояний, характеризующихся по мере роста $\bar{\varepsilon}_{\max,i}$, показано на рис. 7. Вершина графика соответствует нарушению равновесного деформированного состояния (потеря устойчивости), за которой следует нисходящая кривая, свидетельствующая об остаточной несущей способности в зависимости от $\bar{\varepsilon}_{\max,i}$. При этом необходимо удерживать значения относительных эксцентриситетов $m_{x,i}^0$, $m_{y,i}^0$ постоянными. На практике для решения задачи при каждом значении $\bar{\varepsilon}_{\max,i}$ из рассматриваемого диапазона определяются фактические параметры нагружения $\varphi_{exy,i}$, $m_{x,i}^0$, $m_{y,i}^0$ по заданному диапазону m_x^* и m_y^* , обход которого осуществляется методом деления отрезка пополам.

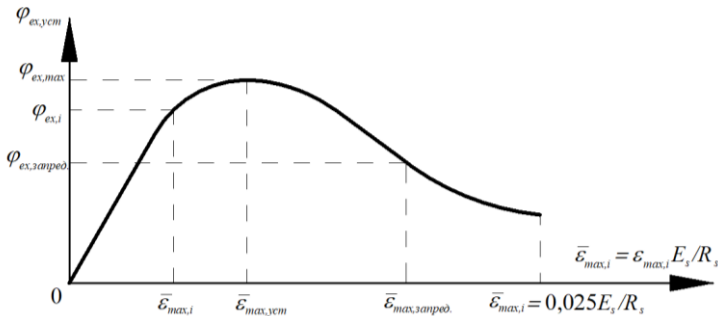


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента продольной силы от максимальной относительной деформации

В четвертой главе представлен сравнительный анализ данных, полученных при использовании обратного численно-аналитического метода и результатов испытаний (на прочность, устойчивость и запредельных состояний элементов конструкций), полученных российскими и зарубежными исследователями в разное время (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Рассмотренные исследования трубобетонных конструкций.

Авторы	Страна	Год	Кол-во экспериментов	Тип сечения
Прочность ТБЭ				
<i>D. Liu</i>	Китай	2005	16	прямоугольное
<i>T. Fujimoto</i> и др	Япония	2004	8	прямоугольное
В.В. Пинский	СССР	1988	3	круглое
И.С. Яровой	СССР	1974	3	круглое
Л.И. Стороженко	СССР	1988	3	круглое
Устойчивость ТБЭ				
<i>K. Cederwall</i> и др.	Швеция	1990	9	прямоугольное
<i>H. Shakir-Khalil, J. Zegnische, M. Mouli</i>	Великобритания	1989, 1990	16	прямоугольное
<i>P. H.Schiller, J. F. Hajjar</i>	США	1996	7	круглое
И.С. Яровой	СССР	1974	4	круглое
<i>J. Zegnische</i>	Алжир	2005	8	круглое
Запредельная работа ТБЭ				
<i>K. Cederwall</i> и др.	Швеция	1990	4	прямоугольное
<i>G. Muciaccia</i>	Италия	2022	1	круглое

Сопоставление расчетов на прочность с данными экспериментальных исследований в подавляющем числе случаев (84%) показало удовлетворительную схожимость, которая находится в пределах от $-7,11\%$ до $7,6\%$, сопоставление расчетов на устойчивость – в 70% случаев в пределах от $-8,1\%$ до $7,7\%$. Некоторые результаты сопоставления представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2 – Сопоставление с экспериментами *T. Fujimoto* (прочность)

Наименование образца	H , мм	B , мм	R_b , МПа	E_b , МПа	e , мм	$N_{эксп}$, кН	$N_{обр}$, кН	%
ER4-A-4-57	148	148	40,5	29300	45	823	810	1,6
ER4-C-2-56	214	214	25,4	25100	60	1141	1188	-4,1
ER4-C-4-51	215	215	40,5	29300	60	1369	1493	-9,1
ER4-C-8-46	215	215	77,0	35900	60	2014	2113	-4,9
ER6-A-4-61	144	144	40,5	29300	45	1701	1819	-6,9
ER6-C-2-58	210	210	25,4	25100	60	2393	2212	7,6
ER6-C-4-57	209	209	40,5	29300	60	2694	2524	6,3
ER6-C-8-54	210	210	77,0	35900	60	3396	3078	9,4

Примечание: стержни ER4-A-4-57, ER4-C-2-56, ER4-C-4-51, ER4-C-8-46 – $R_y = 262$ МПа, $R_{y\text{ ult}} = 411$ МПа, $t = 4,38$ мм;
стержни ER6-A-4-61, ER6-C-2-58, ER6-C-4-57, ER6-C-8-54 – $R_y = 618$ МПа, $R_{y\text{ ult}} = 673$ МПа, $t = 6,36$ мм.

Таблица 3 – Сопоставление с экспериментами *H. Shakir-Khalil* (устойчивость)

Образец	$A_{ред}$, см ²	\bar{x}_x	m_x^0	m_y^0	R_b , МПа	R_{br} , МПа	Φ_{eff}	$N_{обр}$, кН	$N_{эксп}$, кН	%
Z-6	30,44	3,26	0,6	0,8	343,3	33,2	0,248	259,2	268	-3,3
Z-7	30,44	3,33	1,49	1,99	357,5	35,2	0,156	170,1	160	6,3
M-2	30,12	3,25	0,30	0,40	341	33,2	0,314	322,2	348	-7,4
M-3	29,8	3,24	1,03	1,38	341	36,0	0,199	202,6	198,5	2,1
M-4	29,48	3,33	1,47	1,96	362,6	33,1	0,184	196,7	206,8	-4,9
M-5	29,48	3,33	0,59	0,78	362,6	31,8	0,195	208,6	209,8	-0,6
M-7	42,2	2,64	0,3	0,4	346,7	36,0	0,378	552,8	596,2	-7,3
M-8	42,2	2,61	0,85	1,14	340	36,4	0,247	354,5	329,2	7,7
M-9	42,2	2,61	1,43	1,91	340	36,8	0,182	260,8	254,6	2,4

Примечание: стержни Z-6, Z-7, M-2–M-5 – прямоугольная труба 120×80×5 мм; модуль деформации бетона $E_b = 34\ 000$ МПа;
стержни M-7–M-9 – труба 150×100×5 мм; модуль деформации бетона $E_b = 36\ 000$ МПа;
расчетные длины каждого из стержней составили $l_x = 321$ см, $l_y = 294$ см.

На рис. 8 показано сопоставление кривых «прогиб-нагрузка» для гибких трубобетонных элементов в том числе и после потери устойчивости. Точки перегиба графика лежат на одних и тех же абсциссах и характер изгиба графиков довольно сходный. Можно сделать вывод о том, что предлагаемый метод достоверно описывает поведение трубобетонных элементов и в запредельном состоянии.

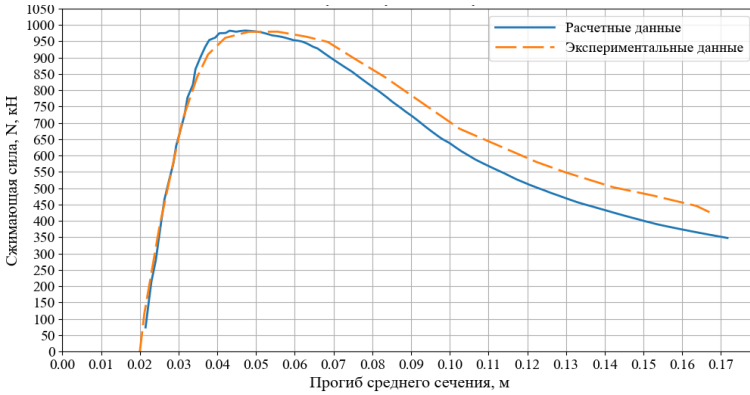


Рисунок 8 – Сопоставление с результатами испытаний *K. Cederwall* (запредельная работа) – сопоставление графиков «нагрузка-прогиб»

В пятой главе приводится инженерная методика расчета на прочность, устойчивость и остаточной несущей способности при загрузении продольной силой с эксцентриситетом в одной плоскости. Расчет прочности сечений проводится с использованием коэффициента c_p , который определяется по формулам табл. 4 для круглых и прямоугольных сечений в зависимости от R_b , R_y , t/D_p (t/H и H/B – для прямоугольных сечений) m_{x0} . В этом случае проверка прочности осуществляется по формуле:

$$\frac{1}{\gamma_c R_s c_p} \left(\frac{N}{A_{red}} + \frac{M_x}{I_{x,red}} y_* \right) \leq 1. \quad (26)$$

В табл. 5 и 6 приводятся формулы, позволяющие определить коэффициенты устойчивости φ_{eff} для стержней прямоугольного и круглого сечений соответственно. Тогда расчет на устойчивость можно выполнить в привычном для проектировщика виде:

$$\frac{N}{\gamma_c A_{red} R_y \varphi_{eff}} \leq 1. \quad (27)$$

В приведенных формулах установлена зависимость коэффициентов c_p (расчет на прочность) и φ_{eff} (устойчивость) от прочности бетона R_b , предела текучести стали R_y , соотношения толщины трубы к большему размеру сечения (t/D_p или t/H), относительного эксцентриситета m_{x0} и гибкости $\bar{\lambda}_x$. Для прямоугольных труб, кроме того, был принят во внимание коэффициент соотношения высоты сечения к ширине H/B .

Коэффициенты остаточной несущей способности при максимально допускаемыми за пределными деформациями $\bar{N}_{eff,ост.}$ (по прочности) и $\Phi_{eff,ост.}$ (по устойчивости) приводятся в табл. 7 и 8, соответственно, значения которых определяются в традиционном виде.

Таблица 4 – Значение коэффициента c_p

R_b	Прямоугольные сечения	
От 19,5 до 44 МПа	$c_p = 1,459 + 0,0767 \cdot \ln(m_x) + 0,0113 \cdot \bar{R}_b - 0,000063 \cdot \bar{R}_b^2 -$ $-0,00097 \cdot \bar{R}_y + 0,136 \cdot \ln(t/H) + 0,0555 \cdot H/B$	(28)
От 44 до 57 МПа	$c_p = 0,558 + 0,609 \cdot \ln(m_x) + 0,0543 \cdot \bar{R}_b - 0,00053 \cdot \bar{R}_b^2 -$ $-0,00125 \cdot \bar{R}_y + 0,115 \cdot \ln(t/H) + 0,0387 \cdot H/B$	(29)
R_b	Круглые сечения	
От 19,5 до 44 МПа	$c_p = 0,988 + 0,059 \cdot \ln(m_x^0) + 0,0067 \cdot \bar{R}_b - 0,0011 \cdot \bar{R}_y +$ $+6,157 \cdot t/D_p$	(30)

Таблица 5 – Фактический параметр нагружения Φ_{eff} для прямоугольных сечений

Фактический параметр нагружения		
$\bar{\lambda}_x$	R_b от 19,5 до 44 МПа	R_b от 44 до 57 МПа
От 0,5 до 2,0	$\Phi_{eff} = 0,724 - 0,148 \cdot \ln(m_x^0) -$ $-0,120 \cdot \ln(\bar{R}_y) + 0,090 \cdot \ln(\bar{R}_b) +$ $+6,946 \cdot t/H - 66,147 \cdot (t/H)^2 +$ $+0,027 \cdot H/B - 0,053 \cdot \bar{\lambda}_x$ (31)	$\Phi_{eff} = 0,596 - 0,157 \cdot \ln(m_x^0) -$ $-0,00044 \cdot \bar{R}_y + 0,00045 \cdot \bar{R}_b +$ $+5,494 \cdot t/H - 44,494 \cdot (t/H)^2 +$ $+0,0215 \cdot H/B - 0,040 \cdot \bar{\lambda}_x$ (32)
От 2,5 до 4,0	$\Phi_{eff} = 0,399 - 0,106 \cdot \ln(m_x^0) -$ $-0,00008 \cdot \bar{R}_y + 0,00019 \cdot \bar{R}_b +$ $+5,812 \cdot t/H - 60,305 \cdot (t/H)^2 +$ $+0,015 \cdot H/B - 0,227 \cdot \ln(\bar{\lambda}_x)$ (33)	$\Phi_{eff} = 1,240 - 0,122 \cdot \ln(m_x^0) -$ $-0,122 \cdot \ln(\bar{R}_y) + 0,0096 \cdot \ln(\bar{R}_b) +$ $+4,656 \cdot t/H - 43,823 \cdot (t/H)^2 +$ $+0,111 \cdot H/B - 0,072 \cdot \bar{\lambda}_x$ (34)

Таблица 6 – Фактический параметр нагружения Φ_{eff} для круглых сечения

$\bar{\lambda}_x$	Фактический параметр нагружения	
0,5-2,0	$\Phi_{eff} = 0,813 - 0,172 \cdot \ln(m_x^0) - 0,00037 \cdot \bar{R}_y + 0,0033 \cdot \bar{R}_b +$ $+0,0683 \cdot \ln(t/D_p) - 0,0692 \cdot \bar{\lambda}_x$	(35)
2,5-4,0	$\Phi_{eff} = 0,687 - 0,094 \cdot \ln(m_x^0) - 0,000155 \cdot \bar{R}_y + 0,00148 \cdot \bar{R}_b +$ $+0,0478 \cdot \ln(t/D_p) - 0,0663 \cdot \bar{\lambda}_x$	(36)

Таблица 7 – Значения $\bar{N}_{eff,ост.}$ для стержней прямоугольного и круглого сечения

Прямоугольное сечение		
R_b	Фактический параметр нагружения	
19,5 – 57 МПа	$\bar{N}_{eff,ост.} = 1,858 + 0,047 \cdot Ln(m_x^0) - 0,183 \cdot Ln(\bar{R}_b) +$ $+ 0,0007 \cdot \bar{R}_y + 0,238 \cdot Ln(t/H)$	(37)
Круглое сечение		
m_x^0	Фактический параметр нагружения	
0,25...0,75	$\bar{N}_{eff,ост.} = 1,597 + 0,217 \cdot m_x^0 - 0,179 \cdot Ln(\bar{R}_b) +$ $+ 0,0004 \cdot \bar{R}_y + 0,194 \cdot Ln(t/D_p)$	(38)
0,75...2,0	$\bar{N}_{eff,ост.} = 1,903 + 0,053 \cdot m_x^0 - 0,208 \cdot Ln(\bar{R}_b) +$ $+ 0,0007 \cdot \bar{R}_y + 0,238 \cdot Ln(t/D_p)$	(39)

Таблица 8 – Фактический параметр остаточной несущей способности $\varphi_{eff,ост.}$ для стержней круглого и прямоугольного сечения

R_b	Фактический параметр нагружения	
Прямоугольное сечение		
$R_b = 19,5 \dots 44$ МПа $R_s = 290 \dots 420$ МПа	$\varphi_{eff,ост.} = -0,408 + 0,046 \cdot Ln(m_x^0) - 0,083 \cdot Ln(\bar{R}_b) +$ $+ 0,253 \cdot Ln(\bar{R}_y) + 0,088 \cdot Ln(t/H) - 0,257 \cdot Ln(\bar{\lambda}_x)$	(40)
Круглое сечение		
$R_b = 19,5 \dots 44$ МПа $R_s = 290 \dots 420$ МПа	$\varphi_{eff,ост.} = -0,259 + 0,045 \cdot Ln(m_x^0) - 0,065 \cdot Ln(\bar{R}_b) +$ $+ 0,240 \cdot Ln(\bar{R}_y) + 0,122 \cdot Ln(t/D_p) - 0,265 \cdot Ln(\bar{\lambda}_x)$	(41)

Зависимость фактического параметра нагружения от деформаций представим в виде:

$$\varphi_{ост.} = A + B/\bar{\varepsilon}, \quad (42)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – деформация, находящаяся в пределах $\bar{\varepsilon}_{lim} \leq \bar{\varepsilon} \leq \bar{\varepsilon}_{max}$.

Коэффициенты A и B при определении остаточной несущей способности определяются из разрешения системы уравнений:

– при расчете прочности:

$$\left. \begin{aligned} A + B/\bar{\varepsilon}_{b2} &= c_p / (1 + m_{x0}) \\ A + B/\bar{\varepsilon}_{max} &= \bar{N}_{eff,ост.} \end{aligned} \right\}; \quad (43)$$

– при расчете устойчивости:

$$\left. \begin{aligned} A + B/\bar{\varepsilon}_{lim} &= \varphi_{eff} \\ A + B/\bar{\varepsilon}_{max} &= \varphi_{eff,ост.} \end{aligned} \right\}; \quad (44)$$

где $\bar{\varepsilon}_{lim} = 2,05 - 0,0011 \cdot \bar{R}_y - 0,197 \cdot \bar{\lambda}$. (45)

Графически зависимость фактического параметра остаточной несущей способности от относительных деформаций представлена на рис. 9а, б.

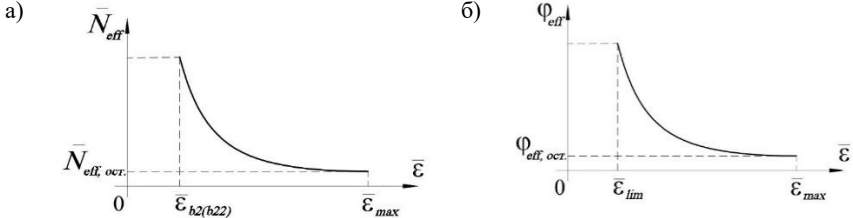


Рисунок 9 – Зависимость фактического параметра остаточной несущей способности от относительных деформаций: а) по расчету на прочность;

б) по расчету на устойчивость

В заключении изложены основные итоги и выводы по результатам диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обратный метод расчета стальных элементов обобщен на трубобетонные, что позволило избавиться от излишних многочисленных итерационных процессов по сравнению с расчетом по приращению нагрузки с использованием нелинейной деформационной модели, получить новые данные характеристик напряженно-деформированных состояний ТБЭ в запредельных стадиях сопротивления. При этом расчет выполняется по фактической жесткости трубобетонных элементов с приведением характеристик сечения к стали трубы и учетом начальных напряжений и упрочнения металла.

2. Сопоставление результатов расчета по прочности и устойчивости с МКЭ и многочисленными экспериментальными данными, полученными в разное время разными авторами, показывает удовлетворительную сходимость, что свидетельствует о достоверности разработанного метода.

3. Учет фактической жесткости элемента в расчетах на устойчивость по нарушению равновесного деформированного состояния, позволяет получать некоторые резервы несущей способности, которая составляет 5–12%.

4. Получены новые данные об остаточной несущей способности в зависимости от относительных запредельных деформаций в сечении, допускаемых СП 385.1325800.2018, которая составляет 13...77% от прочности и зависит от геометрических и механических параметров бетона и стали. При малых эксцентриситетах ($e_0/D_p < 0,133$) с развитием деформаций эффект обжатия в трубах круглого сечения исчезает. Влияние ползучести бетона на остаточную несущую способность ТБЭ оказывается незначительным.

5. Остаточная несущая способность трубобетонных элементов после потери устойчивости при максимальных относительных деформациях, допускаемых СП

385.1325800.2018, составляет 11%...50% от изначальной и зависит от геометрических и механических параметров бетона и стали.

6. Установлена зависимость снижения остаточной несущей способности по прочности и устойчивости от роста относительных деформаций до достижения предельных значений, допускаемых СП 385.1325800.2018.

7. На основании анализа полученных результатов исследования разработаны практические рекомендации по расчету на прочность, устойчивость и остаточную несущую способность в зависимости от многочисленных соотношений характеристик материалов и сечения, а также гибкости ТБЭ (устойчивость) и относительных эксцентриситетов нагрузки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. **Ведерникова А. А.** Численное моделирование трубобетонных элементов конструкций круглого сечения [Текст] / А.А. Ведерникова // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 6 (71). – С. 14–18.

2. **Ведерникова А. А.** Расчет несущей способности внецентренно сжатых трубобетонных элементов с учетом нелинейных диаграмм материалов [Текст] / А. А. Ведерникова, Э. К. Опбул // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 1 (84). – С. 36–45.

3. Белый Г. И. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом [Текст] / Г. И. Белый, **А. А. Ведерникова** // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 2 (85). – С. 26–35.

4. **Ведерникова А. А.** Численные исследования трубобетонных элементов при внецентренном сжатии [Текст] / А. А. Ведерникова // Инженерный Вестник Дона. – 2022. – №11.

5. **Ведерникова А. А.** Совершенствование методики расчета трубобетонных элементов обратным численно-аналитическим методом и ее применение [Текст] / А. А. Ведерникова // Инженерный вестник Дона. – 2023. – №11.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

1. Свидетельство №2022663635 о регистрации программы для ЭВМ Российская Федерация. Программа для расчета трубобетонных конструкций «обратным» методом [Текст] / Белый Г.И. **Ведерникова А. А.** ; заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – № 2022663036 ; заявл. 11.07.2022 ; опубл. 18.07.2022.

2. Свидетельство №2022682845 о регистрации программы для ЭВМ Российская Федерация. Программа для расчета трубобетонных конструкций «обратным»

методом. Версия 2.0. [Текст] / Белый Г. И. **Ведерникова А. А.** ; заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – № 2022682028; заявл. 17.11.2022 ; опубл. 28.11.2022.

Публикации в других изданиях:

1. **Ведерникова А. А.** Расчет гибких трубобетонных элементов на внецентренное сжатие [Текст] / А. А. Ведерникова // АРХИТЕКТУРА – СТРОИТЕЛЬСТВО – ТРАНСПОРТ: материалы 73-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. – 2017. – С. 18–24.

2. **Ведерникова А. А.** Численно-аналитический расчет устойчивости внецентренно сжатых трубобетонных стержней круглого и квадратного сечения [Текст] / А. А. Ведерникова // Вестник СевКавГТИ. – 2017. – № 3 (30). – С. 112–118.

3. **Ведерникова А. А.** Краткий обзор исследований о расчетах прочности и устойчивости трубобетонных конструкций при внецентренном сжатии // Научный аспект. – 2023. – №11. URL: na-journal.ru/11-2023-tehnologii-proizvodstva/6771-kratkij-obzor-issledovanij-o-raschetah-prochnosti-i-ustojchivosti-trubobetonnyh-konstrukcij-pri-vnecentrennom-szhatii (дата обращения: 19.11.2023).

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 22.09.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 102.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А