

Федеральное государственное бюджетное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-
строительный университет»

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Белый Г.И.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	13
1.1 Области применения трубобетонных конструкций и краткая история.....	13
1.2 Достоинства и недостатки трубобетонных конструкций	16
1.3 Материалы для трубобетонных конструкций	18
1.4 Работа трубобетонных элементов конструкций под нагрузкой	19
1.5 Краткий обзор исследований прочности трубобетонных элементов	21
1.6 Краткий обзор теоретических исследований устойчивости трубобетонных элементов	25
1.7 Краткий обзор экспериментальных исследований устойчивости трубобетонных элементов	31
1.8 Методы расчета трубобетонных стержней на прочность и устойчивость по современным нормам	33
1.9 Обзор исследований остаточной несущей способности трубобетонных элементов и ее расчет по нормативным методикам	37
1.10 Выводы по главе	39
ГЛАВА 2. ПРЕДЕЛЬНЫЕ И ЗАПРЕДЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЯХ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	40
2.1 Постановка задачи, гипотезы и допущения	40
2.2 Остаточные напряжения и упрочнение металла в прямоугольных трубах	42
2.3 Унифицированные диаграммы работы материалов. Учет обжатия бетона.....	44
2.4 Обратный метод решения задач прочности и остаточной несущей способности запределельных состояний трубобетонных элементов	49
2.5 Алгоритм решения обратной задачи	55

2.6 Влияние начальных напряжений и упрочнения в стальной части трубобетонного элемента	57
2.7 Сопоставление результатов расчета на прочность обратным методом и методом конечных элементов	58
2.8 Сопоставление результатов расчета обратным методом с расчетом по нормативной методике	65
2.9 Остаточная несущая способность трубобетонных элементов по прочности.....	67
2.10 Выводы по главе	76
ГЛАВА 3. ПРЕДЕЛЬНЫЕ И ЗАПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО УСТОЙЧИВОСТИ	77
3.1 Постановка задачи, гипотезы и допущения	77
3.2 Деформационный расчет сжато-изогнутых трубобетонных элементов, работающих в предельном (устойчивость) и запредельном состояниях	77
3.3 Алгоритм решения обратной задачи устойчивости	84
3.4 Влияние начальных напряжений и упрочнения в стальной части трубобетонного элемента на устойчивость	86
3.5 Сопоставление результатов метода конечных элементов и обратного метода при расчете на устойчивость	87
3.6 Запредельная работа гибких трубобетонных элементов	92
3.7 Выводы по главе 3	102
ГЛАВА 4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ ЗАРУБЕЖНЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ АВТОРОВ	104
4.1 Сопоставление результатов исследования по прочности трубобетонных элементов	104
4.1.1 Сопоставление с экспериментами, выполненными D. Liu в Китае	104
4.1.2 Сопоставление с экспериментами T. Fujimoto, выполненными в Японии	106
4.1.3 Сопоставление с экспериментами В.В. Пинского, И.С. Ярового и Л.И. Стороженко	107

4.2 Сопоставление результатов исследования устойчивости трубобетонных элементов	108
4.2.1 Сопоставление с экспериментами К. Cederwall, В. Engstrom, М. Grauers, выполненные в Швеции	109
4.2.2 Сопоставление с экспериментами Н. Shakir-Khalil, J. Zegniche, М. Mouli, выполненные в Великобритании	110
4.2.3 Сопоставление с экспериментами, выполненными в США	112
4.2.4 Сопоставление с экспериментами J. Zegniche, К. Chaoui, выполненными в Алжире	113
4.2.5 Сопоставление с экспериментами И.С. Ярового	113
4.3 Сопоставление экспериментальных данных и численно-аналитического расчета предельной работы трубобетонных элементов	114
4.4. Выводы по главе	117
ГЛАВА 5. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА	119
5.1 Инженерная методика расчета на прочность трубобетонных элементов.....	119
5.2 Инженерная методика расчета на устойчивость трубобетонных элементов.....	122
5.3 Инженерная методика расчета остаточной несущей способности в предельном состоянии	124
5.4 Выводы по главе 5	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	129
Приложения	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Трубобетонные конструкции (ТБК) представляют собой комбинацию стальной оболочки и бетонного (или железобетонного) ядра, что позволяет получить ряд преимуществ: экономию металла в сочетании с повышенной коррозионной и огне- стойкостью. Бетон, находясь в обойме круглой трубы, испытывает боковое обжатие, в результате чего несущая способность трубобетонного элемента при центральном и внецентренном сжатии 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 сооружениях.

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. Рекомендации по определению предельных 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

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, В.И. Римшин, Р.С. Санжаровский, А.А. Сахаров, Л.И. Стороженко, В.М. Сурдин, В.А. Трулль, Д.В.

Цыгулев, П.А. Хазов, С.А. Харченко, В.А. Шеховцов. и др. Основные задачи, которые решались: устойчивость и прочность трубобетонных элементов при одноосном нагружении с применением обыкновенной стали и бетона.

За рубежом в 1970-х научными исследованиями трубобетонных конструкций занимались *R.Q. Bridge, H. Bode, J. Webb, B. Chen* и *Z. Chen, R. 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* исследовал прочность трубобетонных сечений различной формы, при использовании обычных и высокопрочных материалов.

В 1990-2000 гг. *Y.C. Cai* работал над диаграммой взаимодействия для трубобетонных колонн, которая сейчас известна по Еврокоду-2 и 4. *X.-L. Zhao* и др. изучали поведение трубобетона при чистом изгибе, изгибе со сжатием, а также совместно с *L.-H. Han* и *Y.-F. Yang* испытывал короткие трубобетонные стержни.

В последние годы исследователи обратились к высокопрочным материалам: сталям и бетонам. Основная работа проводилась: *R. Bergmann* и *K. Cederwall* за рубежом, А.Р. Олуромби, Д.В. Кониным, В.И. Римшиным в России.

J.F. Hajjar и *P.H. Shiller* занимались разработкой упругопластической модели поведения трубобетона под нагрузкой. Разработку методики расчета проводил также *M.A. Bradford*, которая ключена в действующий *EN-1994* (Еврокод 4).

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 настоящее время в России под руководством А.Л. Кришана ведется разработка различных эффективных модификаций трубобетонных конструкций, которые были выполнены в работах А.С. Мельничука, К.С. Кузнецова, А.И. Сагадатов, И.В. Резвана, Сахарова А.А., Харченко С.А., М.А. Астафьевой. В работах самого А.Л. Кришана развита теоретическая основа для совершенствования нелинейной деформационной модели на основе механики

деформирования железобетона и проведены подтверждающие экспериментальные исследования.

Запредельная работа трубобетонных элементов представлена экспериментальными данными в работах *G.M. Kamil, X. Zhang, M. Dundu, K. Cederwall, J. Zeghniche, X.-F. Yan*. Данные работы предоставляют сведения о прогибах и деформациях трубобетонных элементов под нагрузкой до потери несущей способности и после. В графиках содержатся данные об остаточной несущей способности.

Целью работы 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 жёсткости.

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 предельных 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 работы заключается в следующем:

1. Доказана возможность применения и адаптирован для трубобетонных элементов конструкций обратный метод 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 МКЭ-моделирования в среде *ANSYS*.

Апробация результатов исследования. 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», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 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 общим объемом 5,18 п.л., лично автором – 4,72 п.л., в том числе 5 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Свидетельства и патенты. Программа расчета трубобетонных конструкций «обратным» методом» зарегистрирована в Роспатенте №2022663635 и №2022682845.

Внедрение результатов работы. Результаты исследований в практической области подтверждаются справкой о внедрении в практическую работу ООО «Спектр Глобал».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы – 166 страниц машинописного текста, включая 36 таблиц, 74 рисунка и 65 формул. Список литературы содержит 121 наименование, в том числе 55 – на иностранных языках.

Работа выполнена при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО СПбГАСУ).

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1.1 Области применения трубобетонных конструкций и краткая история

Трубобетонные конструкции (ТБК) применяются с начала XX века как несущие конструкции мостов. В 30-х годах в СССР и Европе для сжатых элементов, таких как опоры мостов, верхние пояса арочных строений, изготавливались пакеты труб небольшого диаметра, заполненные бетоном. Р.С. Санжаровский в [29] так описывает один из примеров применения ТБК в арочных мостах (г. Париж, 1931 г., пролет 9 м): «две арки этого моста состоят каждая их шести труб диаметром 60х3,5мм, заполненных бетоном». Практически одновременно с парижским мостом «в 1936 под руководством акад. Г.П. Передерия был сооружен мост пролетом 101 м через реку Неву в г. Ленинграде, в котором в качестве пролетного строения была использована безраскосная ферма с верхним поясом из трубобетонного пакета» [29] (см. рис. 1.1).

В указанной публикации Р.С. Санжаровского также приводится пример однотрубной системы, которую «в 1940-х годах проф. В.А. Росновский предложил использовать» и которая легла в основу проекта моста пролетом 140 м через реку Исеть [29, 49] (см. рис. 1.1).

Мосты с применением трубобетона получили широкое применение, например, в Китае: первый трубобетонный арочный мост пролетом 115 м был построен в провинции Сычуань в 1991 году [92]. В настоящее время в КНР построено более 200 мостов пролетом 50 до 500 м, а также крупные транспортные развязки. Крупнейший из них: мост *Chongqing Wushan Bridge* через реку Янцзы пролетом 460 м, построенный в 2005 году [92].

Эффективно применение трубобетонных элементов в несущем каркасе высотных зданий. В Санкт-Петербурге в 2011 году построено здание АО «Банк Санкт-Петербург» с применением трубобетонных колонн [5] (см. рис. 1.2в). В США самое известное здание с использованием ТБК – 58-этажное

административное здание «*Two Union Square*» высотой 230,7 м (1989 г., рис. 1.2б) [5]. В Китае построены сейсмостойкое здание «*SEG Plaza*» с каркасом из трубобетона на площади Сайгэ в г. Шэньчжэнь (1997 г., рис. 1.2а) [44] и многие другие.

а)



б)



Рисунок 1.1 – Трубобетонные мосты: а) мост через р. Исеть [23], б) мост Г.П. Передерия через р. Неву [120]

Известны также производственные здания, выполненные из трубобетонных конструкций: здание лаборатории НИИ в г. Ольное (Франция), производственное здание на Семилукском заводе огнеупоров в Воронежской области. В обоих зданиях из трубобетона выполнены колонны. В Бельгии при строительстве судового дока были использованы трубобетонные фермы пролетом 13 м. Из трубобетона выполнены их стойки и верхний пояс [29]. О практическом применении ТБК для производственных предприятий пишет А.Л. Кришан [35]: «в Магнитогорске и Челябинской области практическое внедрение ТБК осуществлено на шести объектах, в том числе при строительстве уникального комплекса толстолистового стана 5000 ОАО «ММК». Экономическая эффективность от внедрения новых конструкций составила 4,2 млн. руб.»

Оправдано применение трубобетона и в мачтовых сооружениях, телебашнях и конструкциях ЛЭП. Телебашня «*Canton Tower*» высотой 600 м в городе Гуанчжоу, Китай, построенная в 2009 году, является ярким примером [16, 112] (см. рис. 1.3). Сети ЛЭП из ТБК покрывают некоторые горные перевалы в Швейцарии [29].

a)



б)



в)



Рисунок 1.2 – Здания с применением трубобетонных конструкций: а) здание «*SEG Plaza*» [121], б) офисное здание «*Two Union Square*» [27], в) здание банка «Санкт-Петербург» [38]

а)



б)



Рисунок 1.3 – Телебашня «Canton Tower», а) вид снизу, б) вид сверху [119]

Сечения применяемых конструкций достаточно разнообразны (рис. 1.4) [20]. Применяются трубы, не только заполненные бетоном, но и имеющие внутри гибкую или жесткую арматуру, стальные сердечники, внутреннюю трубу.

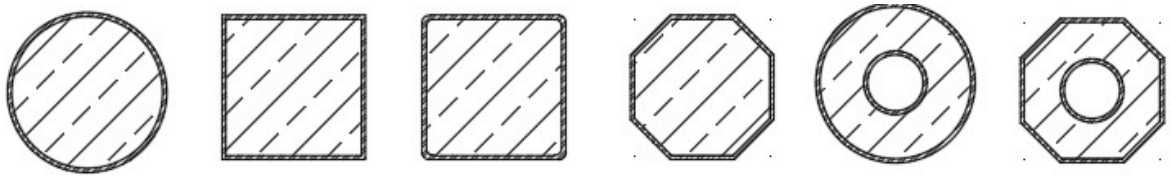


Рисунок 1.4 – Формы сечений трубобетонных колонн

Широкое применение трубобетона стало возможным благодаря пониманию его высокой экономической эффективности, развитию методов расчета, компьютерного моделирования, современным технологиям укладки бетона, появлению самоуплотняющихся бетонных смесей большой подвижности, самоупругающегося и расширяющегося бетона.

1.2 Достоинства и недостатки трубобетонных конструкций

Трубобетонные конструкции имеют ряд достоинств. Заполненные бетоном трубы имеют высокую коррозионную стойкость, так как внутренняя поверхность трубы защищена бетоном. Гибкость элементов уменьшается, по сравнению с трубами без заполнения бетоном, а местная устойчивость оболочки и ее

сопротивление вмятию в местах сопряжений увеличивается. Трубобетонные элементы обладают свойством равноустойчивости при равных расчетных длинах.

Трубобетонные конструкции при изготовлении не требуют опалубки, что сокращает расходы на возведение. При этом, еще до полного схватывания бетона можно продолжать вести монтажные работы без технологических перерывов, которые обычно требуются для обычного железобетона. Это повышает скорость возведения зданий в несколько раз.

ТБК проще в эксплуатации, чем прокатные и сварные сечения, так как имеют гладкую поверхность и форму, на которой не откладывается грязь и пыль. Площадь наружной поверхности под покраску, в среднем, в 2 раза меньше, чем у обычных стальных стержней открытого профиля.

О недостатках ТБК подробно написано в публикации А.Л. Кришана [36]: это «факторы, возникающие при изготовлении и монтаже конструкций:

- возможность расслоения бетонной смеси при заполнении труб небольшого диаметра;
- трудоемкость стыков трубобетонных колонн с несущими конструкциями перекрытий зданий;
- возможность отслаивания бетонного ядра от оболочки вследствие неблагоприятного влияния усадки бетона;
- возможность разрыва металлической оболочки под действием внутреннего давления паров связанной воды, освобождающейся при сильном нагревании во время пожара».

Недостатки могут быть устранены технологическими решениями по бетонированию, подбором нужных составов бетона, устройством дополнительной огнезащиты, заводским изготовлением стыковочных узлов. Например, в 2023 г. специалисты Нижнетагильского завода металлургических конструкций (НТЗМК) на выставке «*TechnoBuild 100+*» в г. Екатеринбурге представили конструктивное решение узла стыка трубобетонной колонны с кессонным железобетонным перекрытием (рис. 1.5), которое было применено при строительстве двух высотных зданий.



Рисунок 1.5 – Конструктивные решения стыка с перекрытием НТЗМК (фото автора)

1.3 Материалы для трубобетонных конструкций

Российские нормы (СП 266) допускают применение классов бетона В10 – В60 (согласно СП 63.13330.2018), и марок сталей С245 – С690 (СП 16.13330.2017). Еврокод 4 [70] допускает применение бетонов в диапазоне от $C20/25$ до $C60/75$ (классы В25 – В75 по табл. А.1 [17]) и сталей с пределом текучести до 460 МПа. В Китае нормы о применении трубобетонных конструкций позволяют применение бетонов с прочностью до 80 МПа [75].

Действующий СП 311.1325800.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции из высокопрочных бетонов. Правила проектирования» содержит информацию о применении высокопрочных бетонов классов В70 – В150, однако в тексте документа указано, что его действие не распространяется на расчет сталежелезобетонных конструкций. При этом исследователи отмечают большой потенциал применения высокопрочных бетонов для ТБК. В [1] указывается, что бетоны классов В60-В100 хорошо подходят для работы в условиях обжатия. В работах [68, 70, 76-78, 89, 108, 99, 105] проводятся экспериментальные исследования трубобетонных элементов с высокопрочными сталями и бетонами, которые показали хорошие результаты по росту несущей способности стержней и их экономичности.

В монографии [31] рекомендуется использовать бетоны классов В20 – В100, сталь класса С235 – С590. При этом прочность бетона должна быть соразмерна прочности стали, а эффективными конструкциями из практики являются бетоны классов В40 – В70, сталь – не ниже класса С345. *R. Liew* с соавторами [87] провел исследование, которое также показало, что чем выше марка стали трубы, тем выше класс бетона должен быть внутри трубы. Например, для марки стали *S550* минимальный класс бетона *C70/85*.

Строительная практика свидетельствует о востребованности не только обычных, но и высокопрочных материалов. Наряду с использованием обычного бетона прочностью 30-40 МПа в разных городах Китая построены высотные здания, в которых использован высокопрочный бетон, например, *Peace World Plaza* (высота 116,3 м), *SEG Plaza* (высота 261,6 м). В других странах: башни Петронаса в Куала-Лумпур, Марина-Бэй в Сингапуре (бетон марки В80), *Tokyo Sky Tree* (сталь марки *S700*) [87].

Таким образом, для ТБК характерно применение и обычных, и высокопрочных материалов. Следовательно, в данной диссертации рассматриваются и те, и другие.

1.4 Работа трубобетонных элементов конструкций под нагрузкой

Трубобетонным элементам соответствуют повышенные показатели по несущей способности при работе в условиях бокового обжатия бетона за счет стеснения его поперечных деформаций трубой (эффект «обоймы») по сравнению с аналогичными по площади железобетонными сечениями. Этот эффект достигается в трубах круглого сечения при центральном сжатии и внецентренном с малым эксцентриситетом, а также в прямоугольных со спиральным армированием. В нормативной литературе условием малого эксцентриситета считается выполнение соотношения эксцентриситета к диаметру трубы $e/D \leq 0,1 \dots 0,133$ (Еврокод 4, СП 266, соответственно). В случае гибких стержней деформационный эксцентриситет может значительно увеличиваться, следовательно, возможность возникновения бокового обжатия в бетоне необходимо оценивать по нему. По этой причине

европейские нормы ограничивают приведенную гибкость трубобетонного стержня ($\bar{\lambda} \leq 2$ [21]).

В трубах прямоугольного сечения эффект обоймы, как правило, не учитывается (за исключением специально разработанных конструкций [3]), а также коротких стержней при центральном сжатии [32, 43].

Для эффективной работы трубобетонного стержня имеет значение способ приложения нагрузки: на бетонную часть, на стальную трубу или на обе одновременно. Прикладывая нагрузку только на бетон, можно увидеть, что труба работает как обойма, испытывая в основном кольцевые напряжения [24]. При этом сцепление бетона со стальной трубой при значительных нагрузках вовлекает трубу в работу и в продольном направлении, что понижает значимость эффекта обоймы [81, 74]. При передаче нагрузки только на трубу эффект обоймы не возникает и повышения несущей способности не происходит. Способ передачи нагрузки одновременно на трубу и бетон является наиболее распространенным и эффективным.

Совместную работу трубы и бетона обеспечивают конструктивными решениями: устройством анкеров, подбором не дающего усадку состава бетона и бетонированием под давлением [58, 59]. *Y. Hunaiti* [81] испытал колонны с разной степенью сцепления трубы с бетоном и показал, что, если они связаны по концам элемента с помощью анкеров и нагружены совместно, связь между трубой и бетоном в колоннах между анкерными устройствами не оказывает эффекта на несущую способность. Учитывая изложенное, нормативные документы обоснованно рекомендуют применение анкеров.

Исследования эффекта сцепления трубы с бетоном показали, что он зависит от шероховатости внутренней поверхности трубы, давления бетона на трубу и усадки бетона. По данным [81] прочность связи при центральном сжатии оценивается в 1,1 МПа. При нагрузке, приложенной с эксцентриситетом, возникает эффект «заклинивания» бетона в трубе, результат которого заключается в том, что прочность сцепления трубы с бетоном увеличивается до 2,5 раз [81].

Аналитическое решение задачи о смещении бетона в трубе под нагрузкой приводится в статье *S. Schnabl* [101].

Сведения о работе трубобетонных колонн под нагрузкой в зависимости от их гибкости приведены в работах [28, 81]. Короткие колонны разрушаются в следствие потери местной устойчивости оболочки или разрушения бетона на сдвиг, при этом разрушение происходит при глубоких упругопластических деформациях. В то же время колоннам средней длины в меньшей степени свойственно развитие упругопластических деформаций. Гибкие длинные стержни, как правило, теряют устойчивость еще в упругой стадии. Многие исследователи склоняются к тому, что граница между длинными и короткими трубобетонными колоннами лежит при отношении $L/D = 12...15$ [81]. Для длинных (гибких) трубобетонных колонн учет устойчивости более критичен нежели прочность сечения.

1.5 Краткий обзор исследований прочности трубобетонных элементов¹

Как показано автором данной работы в [12], исследования прочности трубобетонных конструкций проводили: Х.Х.Х. Аль-Саеди, М.А. Астафьева, А.А. Долженко, В.П. Ефимов, А.Л. Кришан, К.С. Кузнецов, Л.К. Лукша, А.С. Мельничук, В.В. Пинский, В.И. Римшин, А.И. Сагадатов, Р.С. Санжаровский, Л.И. Стороженко, И.С. Яровой, *Y.C. Cai, R.W. Furlong, T. Fujimoto* и др., *R. Leon, D. Liu, X. Wang, Y.-F. Yang*, и др.

Темы исследований касались учета обжатия трубой бетона и начальных напряжений в трубе, построения расчетов на прочность с учетом этих факторов. А.А. Долженко [22] исследовал работу центрально и внецентренно сжатых труб, заполненных бетоном с учетом усадки и ползучести трубобетонных стержней. В.И. Маракуца [41] под руководством Л.И. Стороженко [53, 54] исследовал перераспределение напряжений между бетонным ядром и металлической

¹ Результаты данной работы были опубликованы автором в исследовании: 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).

оболочкой при длительном нагружении. Л.К. Лукша [39, 40] разработал методику расчета и подбора сечения для центрально сжатых трубобетонных элементов с учетом обжатия. Х.Х.Х. Аль-Саеди [2] представил метод расчета центрально сжатых и внецентренно сжатых стержней с учетом эффекта обжатия и разработал программу расчета для ЭВМ. В.П. Ефимов [24, 25] изучал прочность сквозных трубобетонных колонн (двухветвевых). В.В. Пинский [45] разработал методику расчета на прочность и определил, при каких относительных эксцентриситетах сохраняется эффект обжатия бетона. А.Н. Жиренков провел экспериментальные исследования по работе бетона в условиях трехосного сжатия [26]. А.Л. Кришан [31-33, 35] предложил методику расчета трубобетонных элементов на сжатие с эксцентриситетом итерационным методом, основанном на уравнениях механики железобетона, учитывающим обжатие бетона, в том числе, в предварительно напряженных элементах. А.С. Мельничук [43] разработал методику и программу по расчету прочности ТБК квадратного поперечного сечения с использованием нелинейной деформационной модели. К.С. Кузнецов [37] исследовал предварительно напряженные трубобетонные короткие стержни и на основании нелинейной деформационной модели разработал методику оценки напряженно-деформированного состояния и расчета прочности нормальных сечений трубобетонных колонн, работающих на внецентренное сжатие. А.И. Сагадатов [50] предложил усовершенствованную конструкцию ТБЭ с сердечником и методику их расчета. М.А. Астафьева [3] разработала методику расчета прочности прямоугольных и круглых трубобетонных элементов со спиральным армированием, обычным и самоупрочающимся бетоном и провела эксперименты, на которые опирается исследование. В.И. Римшин совместно с А.Л. Кришаном провели экспериментальные исследования трубобетонных элементов с высокопрочным бетоном [54].

R.W. Furlong [74] был одним из основоположников инженерной методики расчета трубобетонных элементов за рубежом. *T. Fujimoto* [73] разработал методику расчета на прочность трубобетонных стержней при использовании высокопрочных материалов, исследовал влияние относительной толщины стенки

трубы на прочность сечения, а также провел ряд экспериментов (более 60 образцов) для подтверждения своих гипотез.

R. Leon [87] с соавторами создал обширную базу экспериментальных данных для разработки методов расчета и изучил влияние применяемых при расчете диаграмм материалов на точность расчетов. *Y.C. Cai* [105] усовершенствовал диаграмму взаимодействия для трубобетонных колонн, которая сейчас известна по Еврокоду 4 [21]. *D. Liu* [89] показал, что нормы Евросоюза (Еврокод 4) несколько переоценивают (около 4%), а американские нормы для железобетона и стали (ACI 318-02) недооценивают прочность трубобетонных элементов (до 24%). *X. Wang* [108, 109], *L.-H. Han* и *Y.-F. Yang* [110] также провели испытания коротких трубобетонных стержней на прочность.

Российские и зарубежные ученые предлагают методы решения задачи прочности, которые условно можно разделить на две группы: метод предельного равновесия и методы на основе нелинейной деформационной модели.

Метод предельных усилий

При расчете данным методом считается, что напряжения в бетоне и трубе достигли пределов прочности (см. рис. 1.6). Для поперечного сечения выполняются уравнения равновесия:

$$\begin{cases} N_{\text{внеш}} = N_{\text{внутр}} \\ M_{\text{внеш}} = M_{\text{внутр}} \end{cases}$$

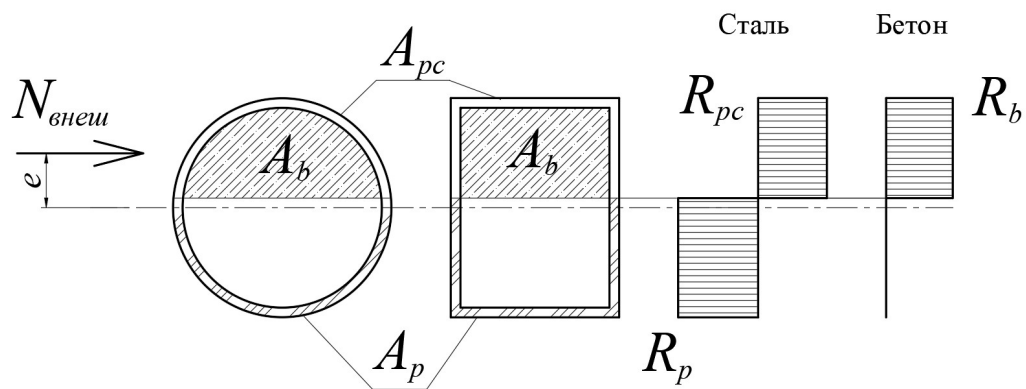


Рисунок 1.6 – К расчету по методу предельного равновесия. R_b – расчетное сопротивление бетона на сжатие, R_p – расчётное сопротивление стали трубы на растяжение, R_{pc} – расчетное сопротивление стали трубы на сжатие, e – эксцентриситет приложения силы N .

Данный метод дает довольно точное решение задачи прочности для железобетонных конструкций, однако не учитывает фактическое распределение напряжений в трубобетонном элементе.

Нелинейная деформационная модель (НДМ)

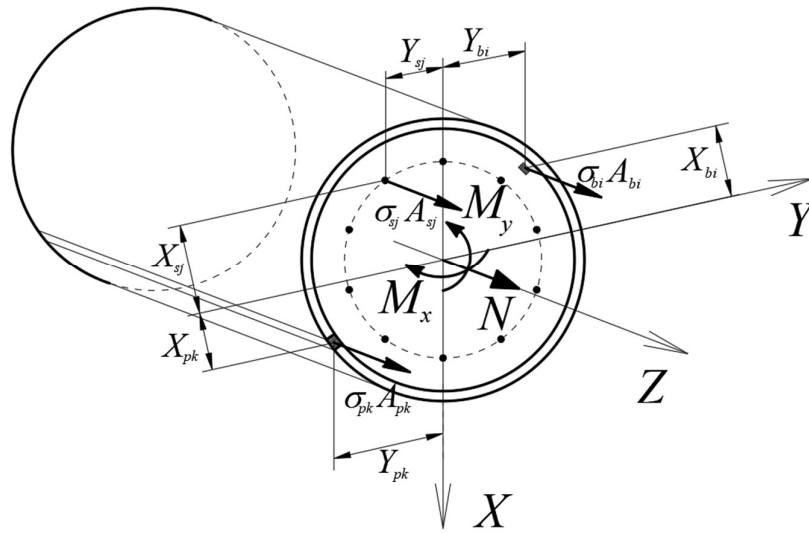


Рисунок 1.7 – К расчету по нелинейной деформационной модели

Предполагается, что справедлива гипотеза плоских сечений, а напряжения определяются по диаграммам деформирования бетона и стали, которые могут быть различными: диаграмма Прандтля, трехлинейная, Саржина.

Уравнение равновесия внешних и внутренних сил выглядит следующим образом (см. рис. 1.7):

$$M_y = \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} X_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} X_{sj} + \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} X_{pk} ;$$

$$M_x = \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} Y_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} Y_{sj} + \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} Y_{pk} ;$$

$$N = \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} + \sum_k \sigma_{pk} A_{pk} .$$

Внешняя нагрузка прикладывается пошагово, пока предельные деформации не достигнут предельных относительных деформаций

$$|\varepsilon_{b,max}| \leq \varepsilon_{b,ult} ;$$

$$|\varepsilon_{s,max}| \leq \varepsilon_{s,ult};$$

$$|\varepsilon_{p,max}| \leq \varepsilon_{p,ult};$$

Таким образом решение по нелинейной деформационной модели представляет собой итерационный процесс. Данная модель достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным. Решение находится за 20-25 итераций. Однако, данный метод позволяет определять несущую способность по прочности только в диапазоне до предельных деформаций. При превышении предельных деформаций решение расходится.

Учет обжатия бетона трубой может быть учтен в этом решении, например, так как это сделано в работах А.Л. Кришана, причем не на основе эмпирических зависимостей, а в соответствии с уравнениями механики железобетона.

Соотношение толщины стенки трубы и размера сечения для трубобетонных элементов может оказывать влияние на прочность. *R. Leon* [87], а также *M.A. Bradford* [67] посвятили свои исследования предельным гибкостям стенки трубы. Нормативные документы обычно приводят границы соотношения толщины стенки к диаметру трубы, при которых действует тот или иной метод решения. Например, СП 266 предлагает использовать трубы, толщина стенки которых по отношению к диаметру находится в диапазоне от 0,0064 до 0,046 и решать задачу прочности методом предельного равновесия и по НДМ.

1.6 Краткий обзор теоретических исследований устойчивости трубобетонных элементов

Вопросами устойчивости трубобетонных элементов занимались Р.С. Санжаровский [29, 51], И.С. Яровой [64], В.П. Ефимов [24, 25], В.А. Шеховцов [63], Д.В. Цыгулев [61] в России, *R. Leon* и *T. Perea* [87, 98], *M.A. Bradford* [96], *V.I. Patel*, *Q.Q. Liang* и *M. Hadi* [78, 118], *M.L. Romero* [99], *A.H. Varma* и *Z. Lai* [85, 86], *J. Hajjar* и *B.C. Gourley* [38], *K. Sakino* [75], *R.Q. Bridge* [97], *Y.C. Cai* [19], *K. Cederwall* [41] за рубежом.

Обычно рассматривают по отдельности устойчивость центрально-сжатых стержней и внецентренно-сжатых. Также разделяют устойчивость стержней круглых и прямоугольных сечений. Рациональным кажется рассмотреть преимущественно внецентренно сжатые стержни, так как даже при нулевом эксцентриситете действия нагрузки, назначается случайный эксцентриситет в соответствии с современными нормами.

В процессе анализа методов расчета стержней на устойчивость было выявлено несколько подходов. Условно их можно разделить на расчет ТБЭ по принципу железобетонного элемента, расчет, аналогичный расчету стальных конструкций с составлением таблиц коэффициентов устойчивости, и «фибровый» метод.

Расчет с учетом коэффициента внецентренности

Как и в СП 63.13330.2018 [42] и СП 266.1325800.2016, подобные методы предлагают рассчитываться трубобетонные стержни по недеформированной схеме с учетом коэффициентов внецентренности.

Например, такое решение было предложено И.С. Яровым [56]:

$$\eta = \frac{1}{1 - 12c_m Z R_u F_{пр} \left(\frac{L}{r_{инп}} \right)^2},$$

где N – внешняя продольная сила, R_u – сопротивление бетона сжатой зоны элемента, L – расчетная длина стержня, $F_{пр}$ – приведенная площадь поперечного сечения, $r_{инп}$ – радиус инерции приведенного сечения, c_m – характеристика жесткости, приведенная автором в табличной форме, z – коэффициент, зависящий от соотношения размеров сечения и эксцентриситета.

Решение задачи устойчивости сводится к задаче прочности с увеличенным эксцентриситетом для продольной силы.

Построение таблиц коэффициентов устойчивости

Другим решением задачи было ввести коэффициент продольного изгиба φ , подобный известному в расчете устойчивости металлических конструкций, на который бы умножалось значение несущей способности сечения на сжатие. Такой подход был выбран: Р.С. Санжаровским, В.А. Шеховцовым, В.И. Ефименко. Для учета внецентренного сжатия вводился коэффициент приведенного эксцентриситета.

Работа Р.С. Санжаровского [29] наиболее полно описывает расчет на устойчивость трубобетонных стержней центрально и внецентренно сжатых, подвергнутых кратковременным и длительным нагрузкам. Уравнения равновесия и кривая, по которой деформируется стержень описана функцией косинуса:

$$M_{\text{вн}} = \int_F \sigma z dF ;$$

$$P_{\text{вн}} = \int_F \sigma dF ;$$

$$y = f \cos\left(\frac{x}{L}\right).$$

Интегрирование производится с учетом гипотезы плоских сечений.

Условия равновесия дают:

$$P = P_{\text{вн}} ; M_{\text{вн}} = P(e + f),$$

где f – прогиб стержня.

Преобразовывая выражения, получают систему нелинейных уравнений. Точное решение представляет собой довольно сложный итерационный процесс, реализуемый на ЭВМ. Основанная на нем методика инженерного расчета проста.

Методика позволяет произвести расчет с учетом развития пластических деформаций с использованием коэффициента устойчивости φ . Для расчета при известных параметрах рассчитывается относительный эксцентриситет:

$$m_{\text{прив}} = \frac{e}{R} - \frac{1}{0,5 - 0,25 \frac{1}{1 + \frac{\mu n}{k}}},$$

где $\mu = \frac{F_c}{F_b}$; $k = \frac{\sigma_T^6}{\sigma_T}$; $n = \frac{\varepsilon_T^6}{\varepsilon_T}$, R – радиус бетонного ядра, e – эксцентриситет приложения нагрузки, F_c и F_b – площади стали и бетона соответственно, σ_T и σ_T^6 – расчетное сопротивление стали и бетона, ε_T и ε_T^6 – деформации стали и бетона по пределу текучести.

Приведенная гибкость:

$$\lambda_{\text{прив}} = \frac{L}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{0,5 - 0,25 \frac{1}{1 + \frac{\mu n}{k}}}},$$

где L – длина стержня.

По этим двум величинам по графикам, данным автором, находится коэффициент продольной гибкости и несущая способность.

$$N_{\text{нес}} = \varphi \cdot \Phi_2,$$

где $\Phi_2 = m(k_b \sigma_T^6 F_b + k_c R_c F_c)$, $m = 1$.

В работе [63] проводится теоретическое и экспериментальное исследование устойчивости трубобетонных стержней при различных схемах нагружения. Эта диссертация дополняет работу Р.С. Санжаровского, так как в рассмотрение вводятся стержни, загруженные дополнительно поперечной равномерно распределенной нагрузкой.

Устойчивость трубобетонных стержней рассмотрена также в работе В.П. Ефимова [24, 25]. В данной работе предложено приведение бетонного сечения к

стальному и расчет по формулам СНиП «Стальные конструкции». Идея особенно хороша для гибких и внецентренно сжатых стержней, так как в них вклад в несущую способность бетона сравнительно не велик (в основном бетонное ядро обеспечивает местную устойчивость стенок трубы).

Работа Д.В. Цыгулева [61], посвященная вопросу устойчивости прямоугольных труб, заполненных бетоном, тоже предлагает расчет с учетом коэффициента устойчивости. Предлагается определять несущую способность по устойчивости из несущей способности сечения трубы на центральное сжатие, умноженной на коэффициент устойчивости, определяемый в зависимости от значения относительного эксцентриситета по предложенным графикам.

Все перечисленные работы, кроме [61], предполагают загрузку в одной плоскости с равными концевыми эксцентриситетами. В указанных работах не проводился учет начальных напряжений в трубе.

«Фибровая» модель

Третьим решением является «фибровая» модель и инженерные методики на ее основе. Модель освещается в работах *T. Perea, V.I. Patel, Q.Q. Liang, M. Hadi* и др. [78, 98], где используется нелинейная процедура расчета трубобетонных элементов круглого и прямоугольного сечения. Фибровым расчет называется потому, что сечение разбивается на отдельные малые площадки, которые в осевом направлении образуют волокна-фибры. Для стали и бетона задаются действительные диаграммы растяжения-сжатия, задаются параметры для обжатого бетона. Несущая способность определяется с учетом прогибов среднего сечения стержня. Дополнительные кривизны для гибких элементов задаются уравнением синусоиды.

$$v_m = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 u_m,$$

где u_m – перемещения сечения на середине высоты трубобетонной стойки.

Общая схема загрузки представлена на рис. 1.8.

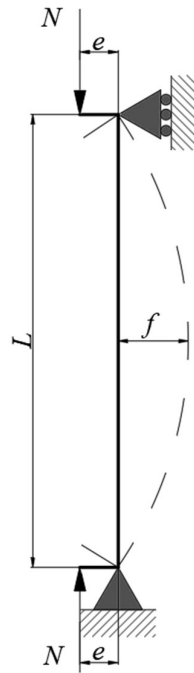


Рисунок 1.8. – Схема загрузки трубобетонного стержня

Подобно «фибровой» модели Р.С. Санжаровский также разбивал сечение трубобетонного элемента на полосы и использовал диаграммы Прандтля для стали и бетона.

Указанная методика позволяет произвести расчет с использованием различных диаграмм деформирования материалов, учесть упрочнение бетона как в [47]. Благодаря развитию компьютерных технологий кажущаяся сложность расчета не представляет проблем. Ближайшим ее аналогом в РФ является нелинейная деформационная модель, применяемая в СП 266.1325800.2016. Более совершенный вариант реализация расчетов, с учетом объемной работы бетона, представлен в работах А.Л. Кришана и его учеников. В работах [31, 34] расчеты гибких стержней развились дальше: учитывается не только обжатие бетона, плоское напряженное состояние трубы, но и изменение жесткости стержня по длине – стержень разбивается на участки, между которыми по 9 сечениям контролируется жесткость по уравнениям НДМ.

Все «фибровые» методы являются итерационными, с пошаговым приложением нагрузки. Упрощенный инженерный анализ для случая равных одноосных эксцентриситетов приводится, например, у *F.W. Lu* [90].

Недостатком всех перечисленных методов расчета является невозможность расчета в запредельной стадии работы, а также большое количество итераций.

1.7 Краткий обзор экспериментальных исследований устойчивости трубобетонных элементов

Большой объем экспериментальных исследований был проведен как в России, так и за рубежом.

В СССР крупные исследования провел Р.С. Санжаровский [51]. Им было испытано порядка 60 труб различной длины и диаметра: от 1800 до 4000 мм в длину, от 89 до 133 мм в диаметре. Большинство труб были загружены с одинаковыми концевыми эксцентриситетами со значением от 5 до 50 мм, и имелся небольшой объем трубобетонных стоек, испытанных с разными концевыми эксцентриситетами, расположенными в одной плоскости.

Экспериментальное исследование было проведено также В.А. Шеховцовым [63] для элементов со средней гибкостью. Выбор был обоснован наибольшей чувствительностью таких стержней к значению эксцентриситета, а также характер их потери устойчивости – с развитием обширных пластических деформаций. Рассматривалось несколько вариантов загрузки: с равными односторонними эксцентриситетами, с различными, с разносторонними, и с добавлением равномерно распределенной поперечной нагрузки. Все эксцентриситеты находились в одной плоскости. Значение продольных деформаций определялись в нескольких сечениях. По результатам испытаний были построены графики зависимостей деформаций от продольной сжимающей силы и графики прогибов от продольной силы.

В результате обобщения данных экспериментов Р.С. Санжаровского и В.А. Шеховцова были построены графики для определения коэффициента устойчивости в зависимости от относительного эксцентриситета и гибкости стержней, разработана инженерная методика расчета.

И.С. Яровой [64] провел испытания партии гибких трубобетонных стержней. В серии были представлены трубы длиной 5000 мм, сечением 102x2,2 мм и 102x4,2

мм, заполненные бетоном средней прочности. Эксцентриситет приложения нагрузки – 20, 50 и 100 мм.

Д.В. Цыгулев [61] провел испытания на устойчивость труб прямоугольного сечения, выполненных из спаренных холодногнутых швеллеров, выполненных из обыкновенной стали. Загружение проводилось с равными концевыми эксцентриситетами, расположенными в двух плоскостях. Значения эксцентриситетов изменялись от 0,6 до 1,6 см. Испытывались трубобетонные элементы длиной 1670 мм, сечением 70x100 мм.

J.M. Protoles и *M.L. Romero* [99] испытывали гибкие трубобетонные элементы, в общей сложности 24 стойки. Значение эксцентриситетов было равно 0, 20, 50 мм, диаметр стержней – 159 мм, длина – 2135 мм. Прочность бетона варьировалась от 35 до 135 МПа. Прочность стали была равна 360 МПа. Трубы были заполнены обычным бетоном, высокопрочным, с добавлением фибры. В результате экспериментов авторы пришли к выводу, что добавление фибры может быть альтернативой армированию в обычном бетоне, но в бетоне повышенной прочности и высокопрочных нет. Также был определен коэффициент вклада бетона в несущую способность: в центрально сжатых прочность по сравнению с трубой без бетона она повышалась в 6-8 раз, при эксцентриситете 20 мм ($e/D_p = 0,133$) в 3-4 раза, при 50 мм – не более 2.5 раз.

V.I. Patel, *M. Hadi* и *Q.Q. Liang* [78] провели испытания трубобетонных стоек прямоугольного сечения, выполненных из высокопрочной стали.

M. Mursi и *B. Uy* [94] также проводили испытания прямоугольных трубобетонных стержней, выполненных из стальных листов, сваренных между собой по углам.

S. Tokgoz и *C. Dundar* [107] провели испытания прямоугольных стоек, выполненных из гнутосварного профиля, заполненных обычным бетоном и фибробетоном. Сечение стержней было 60x60x3 мм, 80x80x3 мм и 100x100x3 мм, длина всех образцов 1250 мм, значение эксцентриситетов варьировалось от 35 до 65 мм. Результаты показали, что 0,55% добавки фибры не влияют на несущую

способность по устойчивости, но обеспечивает более пластичное поведение образцов после достижения предельного состояния.

E. Ellobody [71] исследовал работу круглых труб, заполненных фибробетоном.

Также в разное время эксперименты на коротких, а также длинных гибких стержнях проводились *J.C. Chapman* и *P.K. Neogi* [114], *Y.C. Cai* и *M.N. Su* [105], *T. Perea* [98, 18, 32, 109], *H. Prion* и *J. Boehme* [113], *H. Nakahara* и *K. Sakino* [73, 95], *M.D. O'Shea* и *R.Q. Bridge* [111].

Большую работу по сбору статистических данных экспериментов, их обобщению сделали *B.C. Gourley*, *J.F. Hajjar* [75, 100], опубликовав доклады об испытаниях трубобетонных элементов круглого и прямоугольного сечения, в которых проанализирована работа при различных геометрических соотношениях, при различной прочности стали и бетона. Значимость этих работ в том, что на их основе строятся инженерные методики расчета в США, Японии, Европе.

K. Cederwall испытывал прямоугольные стержни длиной 3000 мм из обыкновенной и высокопрочной стали с бетонами различной прочности [68].

H. Shakir-Khalil [102-104] с соавторами также рассмотрел серию стержней, нагруженных одноосными и двухосными эксцентриситетами.

На данные экспериментов указанных исследователей автор работы опирается в процессе разработки алгоритма расчета и использует их для верифицирования конечноэлементных моделей и разрабатываемого метода расчета.

1.8 Методы расчета трубобетонных стержней на прочность и устойчивость по современным нормам

Приводятся нормативные методики расчета трубобетонных элементов:

- методика Еврокода 4 (Европейский Союз);
- методика СП 266.1325800.2016 (РФ);

Все они используют следующие предпосылки:

- гипотезу плоских сечений;
- аппроксимацию изогнутой оси полувошной синусоиды (косинусоиды);

- совместность деформаций оболочки и ядра.

Методика расчета по СП 266 представляет собой расчет прочности сечения при учете прогиба коэффициентом η (расчет по недеформированной схеме). Значение эксцентриситета e рассчитывается с учетом коэффициента η и случайного эксцентриситета e_a , значение которого принимается наибольшим из $1/600$ длины элемента, $1/30$ высоты сечения, 10 мм.

Расчет по недеформированной схеме производится при условии:

Критическая сила для расчета коэффициента η находится по формуле:

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{D}{L_0^2},$$

Где D определяется наименьшим из

$$D = \begin{cases} 0,15 \cdot E_{b1} \frac{I_b}{\phi_l \cdot (0,3 + \delta_e)} + 0,7 \cdot (E_s \cdot I_s + E_p \cdot I_p) \\ 0,15 \cdot E_{b1} \frac{I_b}{\phi_l \cdot (0,3 + \delta_e)} + 0,7 \cdot E_s \cdot I_s + \frac{L_0^2}{\pi^2} R_{pc} A_p \end{cases}$$

где E_s, E_p - модули арматуры и трубы соответственно;

E_{b1} - модуль упругости бетона, принимается с учетом длительности действия нагрузки,

I_b, I_s, I_p - моменты инерции соответственно сечения бетона, всей продольной арматуры (в виде приведенного кольцевого сечения) и сечения трубы относительно оси, проходящей через центр тяжести поперечного сечения элемента;

R_{cp}, A_p, L_0 - прочность стальной трубы на сжатие, площадь поперечного сечения трубы, расчетная длина соответственно.

Несущая способность элемента вычисляется по формуле

$$N \cdot e = \frac{2}{3} r_b^3 R_{bp} \sin^2 \alpha + \frac{1}{\pi} A_s r_s (R_s + R_{sc}) + \frac{1}{\pi} A_p r_p \sin \alpha (R_y + R_{pc})$$

Угол α (в радианах) находят из уравнения

$$r_b^2 \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2 \alpha \right) R_{bp} + \frac{\alpha}{\pi} A_s R_{sc} - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) A_s R_s + \frac{\alpha}{\pi} A_p R_{pc} - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) A_p R_y = N.$$

Данные методы оправданы при расчете коротких массивных стержней, в которых вклад бетона в несущую способность является решающим, а малая гибкость позволяет не учитывать эффекты с нею связанные или использовать упрощенную методику с коэффициентом внецентренности. В таких элементах расчет на прочность по предельным состояниям вполне оправдан.

Универсальным методом является расчет по НДМ, который также приведет в СП 266 для расчета сечений.

Рассмотрим методику, представленную в Еврокоде 4 (см. также [69]). Рассматривается случай внецентренного сжатия. Нижний индекс «а» относится к трубе, «с» – к бетону. Для расчета строится диаграмма взаимодействия (см. рис. 1.9), которая построена на четырех точках:

1. Центральное сжатие стержня (точка А):

$$N_{plRd} = A_a \cdot f_{yd} + A_c \cdot f_{cd}.$$

Определение этой точки может учитывать обжатие путем умножения расчетного сопротивления стали f_{yd} на коэффициент η_a , сопротивления бетона f_{cd} на коэффициент η_c при условии, что $0 < e/D_p \leq 0,1$.

$$\eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) \cdot \frac{10}{D_p},$$

$$\eta_c = \eta_{c0} \cdot \left(1 - \frac{10e}{D_p} \right),$$

$$\eta_{a0} = 0,25(3 + 2 \cdot \bar{\lambda}) \leq 1,$$

$$\eta_{c0} = 4,9 - 18,5 \cdot \bar{\lambda} + 17 \cdot \bar{\lambda}^2 \geq 0,$$

где $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}}$, $N_{cr} = \frac{\pi^2(E_a \cdot I_a + k_e \cdot E_{cm} \cdot I_c)}{L_0^2}$, $N_{pl,Rk}$ рассчитывается как $N_{pl,Rd}$,

но от нормативных значений сопротивления материалов и без учета обжатия, $k_e = 0,6$.

2. Изгиб (точка D).
3. Совместное действие момента и сжимающей силы, при которой сжатая зона бетона составляет половину его сечения (точка C).
4. Совместное действие момента и продольной силы (точка B).

$$N_{pm} = A_c \cdot f_{cd}.$$

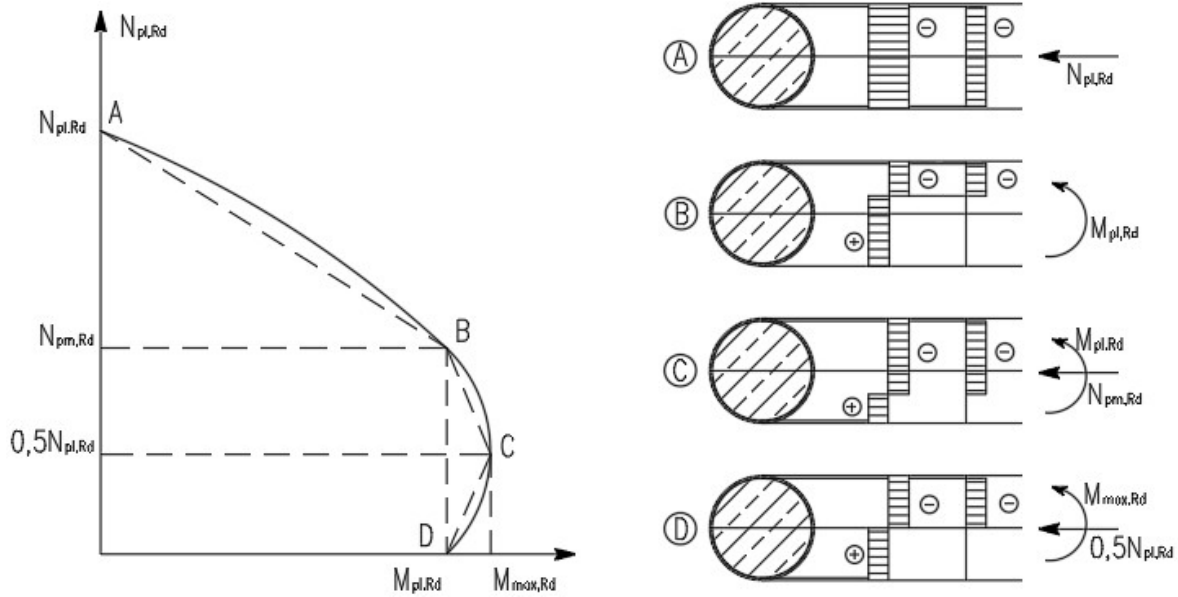


Рисунок 1.9 – Кривая взаимодействия и эпюры напряжений в бетоне и стали по , где $N_{pm,Rd}$ – расчетное значение несущей способности бетона по осевой сжимающей силе; $M_{max,Rd}$ – максимальное расчетное значение несущей способности по изгибающему моменту при наличии продольной сжимающей силы

Эффекты второго порядка по длине колонны могут быть учтены умножением наибольшего расчетного изгибающего момента первого порядка M_{Ed} на коэффициент k , определяемый подобно коэффициенту η .

$$k = \frac{\beta}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,eff}}} \geq 1,0.$$

В итоге получаем кривую взаимодействия, которая огибает все допускаемые для данного сечения сочетания момента и продольной сжимающей силы.

Для того, чтобы определить, обладает ли необходимой несущей способностью конкретный элемент при действии продольной силы и момента, на графике находят изгибающий момент, соответствующий приложенной силе, и проверяют, не превышает ли максимальный действующий момент по длине стержня это значение. Обычно вводят дополнительный коэффициент надежности и максимальное допускаемое соотношение для моментов равно 0,8...0,9 в зависимости от марки стали.

Еврокод 4 дает также указания к расчетам «второго порядка», т.е. с учетом прогибов и начальных несовершенств.

Фактическая жесткость трубобетонного элемента при расчете коэффициентов внецентренности принимается по эмпирической формуле.

1.9 Обзор исследований остаточной несущей способности трубобетонных элементов и ее расчет по нормативным методикам

Основная доля исследований остаточной несущей способности связана с такими воздействиями на конструкцию как пожар, внезапный удар, взрыв, например, [115, 116]. В указанных работах рассматривается несущая способность с измененными физическими характеристиками материалов, геометрией сечения или при воздействии внешней силы. Были проведены эксперименты и численное моделирование.

В данной работе рассматривается обратный численно-аналитический метод расчета трубобетонных конструкций при любом значении нагрузки в предельном и запредельном состоянии.

Экспериментальные исследования по запредельной работе ТБЭ проводил *M. Dundu* [117], который выполнил серию испытаний трубобетонных стержней на устойчивость и предоставил графики вида «нагрузка-прогиб» и «нагрузка-деформации» до полного разрушения. Аналогичную работу проводили уже упомянутые *K. Cederwall, J. Zegnische* [111], *G.M. Kamil* [65] дополнительно провел численное моделирование, которое показало хорошую сходимость с экспериментом. *G. Muciaccia* [93] опубликовал результаты серии экспериментов с гибкими трубобетонными элементами. Работы по экспериментальному исследованию работы в предельной и запредельной стадиях работы провел для коротких элементов *Y.-F. Yang* [96].

В СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения» под особым предельным состоянием понимается «состояние, возникающее после превышения установленных в нормах критериев несущей способности конструкций по первой группе предельных состояний». В настоящий момент расчет несущей способности ТБК по первой группе предельных состояний ведется по предельной допускаемой относительной деформации. Следовательно, запредельная работа трубобетонных конструкций наступает после достижения нормативных предельных деформаций. В указанных нормах ограничение деформаций бетона принимается равным 0,0035 (для бетонов класса выше В60 – несколько меньше), стали – 0,01 и 0,025 (с условным и физическим пределом текучести, соответственно). При этом, согласно СП 63.13330.2018 сжатая арматура не учитывается после достижением бетоном относительных деформаций сжатия равных 0,002. Таким образом, можно предположить, что рассмотрение запредельного состояния следует вести в пределах деформаций стали, считая, что бетон на каком-то этапе запредельной работы полностью или почти полностью выключится из работы, а труба продолжить сохранять некоторую остаточную несущую способность.

1.10 Выводы по главе 1

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования прочности и устойчивости ТБЭ позволили разработать практические методы расчета. При этом расчет на устойчивость фактически заменяется расчётом на прочность по деформированной схеме по назначенной жесткости. Устойчивость, как известно, определяется по нарушению равновесного деформированного состояния с учетом фактической жесткости, что не учитывается в настоящих нормах.

Опубликованные результаты исследования запредельных состояний не позволяют построить инженерную методику расчета остаточной несущей способности после потери прочности и устойчивости.

Проведенный анализ исследований напряженно-деформированных и предельных состояний ТБК позволяет сделать следующие выводы:

1. Назрела необходимость совершенствования методов расчета ТБК на прочность и устойчивость, в том числе в запредельных стадиях работы, обеспечивающих получение достаточно большого объема данных для построения инженерной методики расчета.

2. В настоящее время отсутствует достаточное количество исследований, обеспечивающих построение инженерной методики расчета остаточной несущей способности после потери прочности и устойчивости.

3. Следует разработать быстродействующий метод расчета трубобетонных конструкций, который позволяет производить расчет по прочности и устойчивости ТБЭ, в том числе в запредельных стадиях работы и определить их остаточную несущую способность.

4. На основании разработанного метода построить инженерную методику расчета прочности, устойчивости и остаточной несущей способности ТБЭ.

ГЛАВА 2. ПРЕДЕЛЬНЫЕ И ЗАПРЕДЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫЕ СОСТОЯНИЯ В ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЯХ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассматривается прочность трубобетонных элементов круглого и прямоугольного сечений, работающих в предельных и запредельных стадиях сопротивления (рис. 2.1). Первые, согласно СП 266.1325800.2016¹, определяются по критерию ограниченных деформаций, а вторые при развитии деформаций, допускаемых СП 385.1325800.2018². Предлагается быстродействующий автоматизированный алгоритм расчета на прочность, основанный на обратном численном методе [7, 11]. Приводится метод определения предельного и запредельного состояний в нормальных сечениях трубобетонных элементов при общем характере загрузки: действии продольной сжимающей силы с изгибающими моментами в двух главных плоскостях.

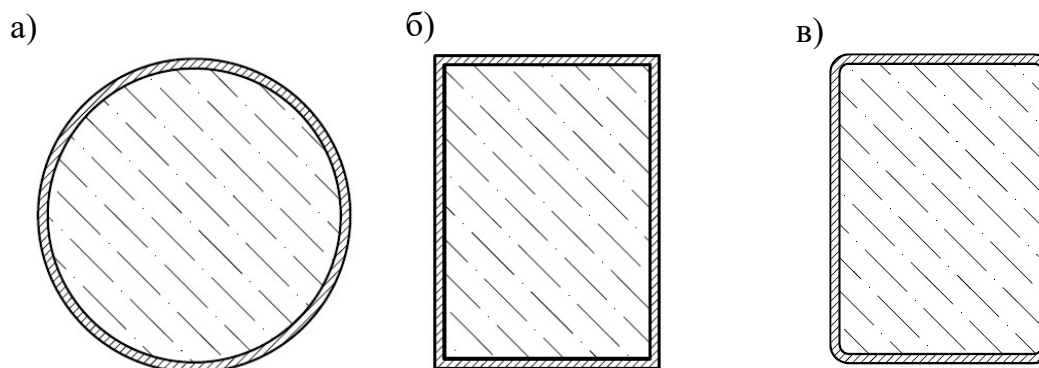


Рисунок 2.1 – Сечения трубобетонных элементов: а) круглое; б) прямоугольные сварные; в) прямоугольные из холодногнутой профилей

2.1 Постановка задачи, гипотезы и допущения

К расчету принимаются стержни, состоящие из стальных труб, заполненных бетоном, армированным продольными арматурными стержнями.

¹ СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. М.: Минрегионразвития, 2016 – 124 с.

² СП 385.1325800.2018. Свод правил. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2018. – 24 с.

Рассматриваются сечения, широко распространённые в практике проектирования. Геометрические параметры трубобетонного элемента приводятся к материалу стальной трубы.

Определение напряженно-деформированных и предельных состояний в сечении трубобетонных элементов приводятся при использовании следующих гипотез и предпосылок:

- гипотеза плоских сечений;
- использование унифицированных диаграмм работы стали и бетона согласно действующим нормам проектирования;
- учет бокового обжатия бетона в трубах круглого сечения при малом эксцентриситете e , который относится к наружному диаметру трубы D_p как 0,133 и менее;
- фактическое распределение механических характеристик стали и остаточных напряжений, связанных с упрочнением металла при формовании прямоугольных гнутосварных труб.

При этом считается, что действующая сила в сечении с изгибающими моментами в двух плоскостях воспринимаются трубой и бетоном в соответствии с гипотезой плоских сечений, которая обеспечивается на концах элемента дополнительными конструктивными мероприятиями (см. пример на рис. 2.2). Раздельное нагружение только бетона или только стальной трубы не рассматривается.

В «центрально» сжатых (с учетом случайных эксцентриситетов) трубах круглого сечения бетон может находиться в трехосном напряженном состоянии. При этом стеснение поперечных деформаций бетона оболочкой трубы обеспечивает эффект «обоймы», который учитывается введением коэффициентов для расчетного сопротивления бетона и стали (см. п. 2.3). Продольные смещения между бетоном и стальной трубой считаются отсутствующими.

В трубах прямоугольного гнутосварного профиля учитываются начальные напряжения и упрочнения металла в местах гибов, что также принимается во внимание при составлении алгоритма расчета (см. п. 2.2).

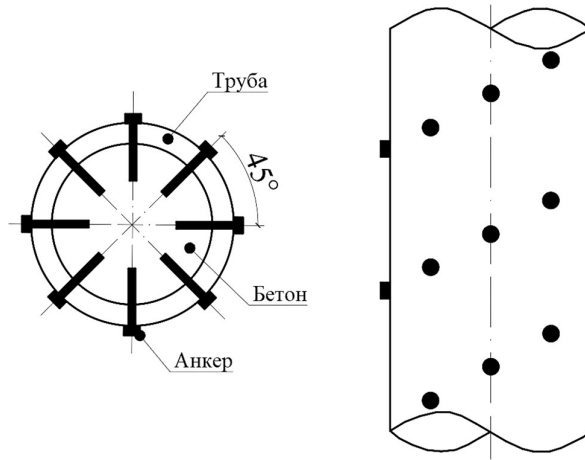


Рисунок 2.2 – Обеспечение совместной работы трубы и бетона: анкера в трубобетонном элементе [31]

2.2 Остаточные напряжения и упрочнение металла в прямоугольных трубах

В расчетах трубобетонных элементов, в качестве труб которых используются гнутосварные профили (ГСП), следует учитывать приобретенные в процессе их изготовления упрочнение металла в местахгиба и остаточные напряжения (см. рис. 2.3). Плоские участки трубы имеют прочностные характеристики исходных заготовок R_s , а в зонахгиба – повышенные $R_{su} = R_s K_{уп}$. Величина упрочнения $K_{уп}$ и распространение зоннаклепа зависят от ряда факторов, которые приведены в соответствующей литературе, например, [56, 58, 84]. Способ учета упрочнения и остаточных напряжений изложен автором диссертации в публикации [15].

Методика определения остаточных напряжений в ГСП также хорошо разработана, например, в [46], согласно которой, сжимающие напряжения на плоских участках находятся в равновесии с растянутыми в зонахгиба (см. рис. 2.3а).

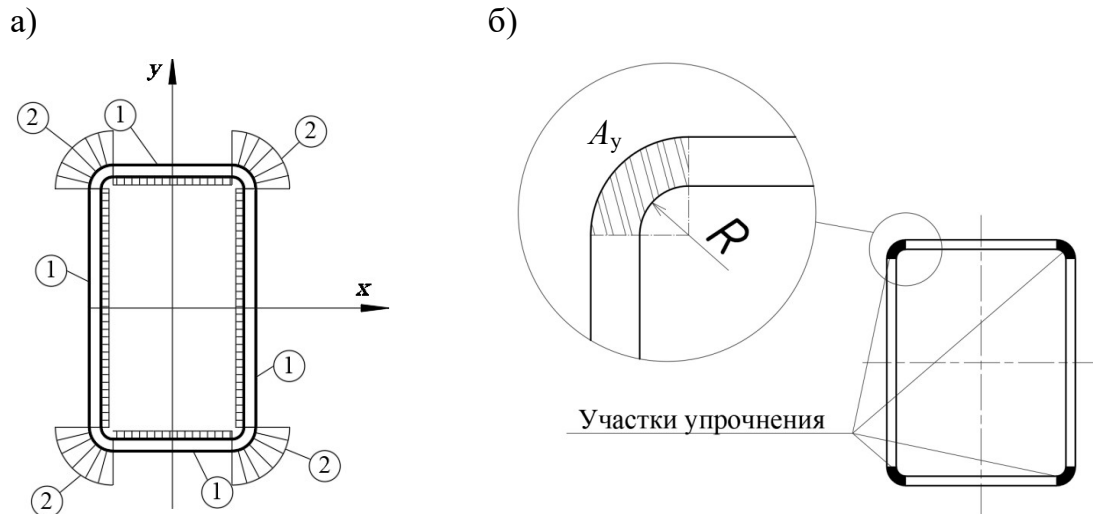


Рисунок 2.3 – Начальные напряжения в сечении гнутоварного профиля: а) на плоских участках 1 и зонахгиба 2; б) участки упрочнения

Определение начальных деформаций и напряжений производится следующим образом: в процессе гибки в сечении на участкахгиба развиваются неравномерные напряжения, которые заменяются равномерными растягивающими:

$$\sigma_y = K_{уп} \cdot \sigma_m; \quad (2.1)$$

где σ_m – предел текучести стали до процессагиба. При этом считается, что участки, подвергнутые деформациямгиба являются упрочненными с коэффициентом $K_{уп} = 1,4$ [46].

Тогда реактивное усилие, которое возникает в этих местах, можно определяется:

$$P = \sigma_y \cdot A_y; \quad (2.2)$$

где A_y – площадь деформированных угловых участков, см. рис. 2.2б.

При этом плоские участки испытывают сжимающие напряжения:

$$\sigma_{k,oc} = \frac{\sigma_y \cdot A_y}{A}; \quad (2.3)$$

а в местахгиба растягивающие:

$$\sigma_{k,oc} = \frac{\sigma_y(A-A_y)}{A}. \quad (2.4)$$

Остаточные напряжения являются самоуравновешенными:

$$\begin{cases} N^y = \sum_{k=1}^m \sigma_{k,oc} \cdot \Delta A_k = 0; \\ M_x^y = \sum_{k=1}^m \sigma_{k,oc} \cdot y_k \cdot \Delta A_k = 0; \\ M_y^y = \sum_{k=1}^m \sigma_{k,oc} \cdot x_k \cdot \Delta A_k = 0. \end{cases} \quad (2.5)$$

Деформации, вызванные силовыми воздействиями ε_{ki} с учетом остаточных составляющих в i -ом волокне площадью ΔA_{ki} , можно представить в виде:

$$\varepsilon_{ki} = \varepsilon_k + \varepsilon_{k,oc}(x_k, y_k); \quad (2.6)$$

где $\varepsilon_{k,oc}(x_k, y_k)$ – условные начальные деформации, определенные по напряжениям по (2.1) на малой площадке ΔA_k с координатами (x_k, y_k) (см. рис. 2.9).

2.3 Унифицированные диаграммы работы материалов. Учет обжатия бетона

1. Унифицированная диаграмма стали

Физические зависимости между напряжениями и деформациями для стали основываются на принятой нелинейно-упругой модели материала:

$$\bar{\sigma} = \bar{\varepsilon} \cdot \bar{E}_c; \quad (2.7)$$

где $\bar{E}_c = E_c / E$; – соответствует секущему модулю. $\bar{\sigma} = \sigma / R_y$; $\bar{\varepsilon} = \varepsilon E / R_y$ – значения напряжений и деформаций в относительных величинах.

В качестве исходной для стали принята унифицированная диаграмма стали: двухлинейная диаграмма с плавным переходом между участками (см. рис. 2.4).

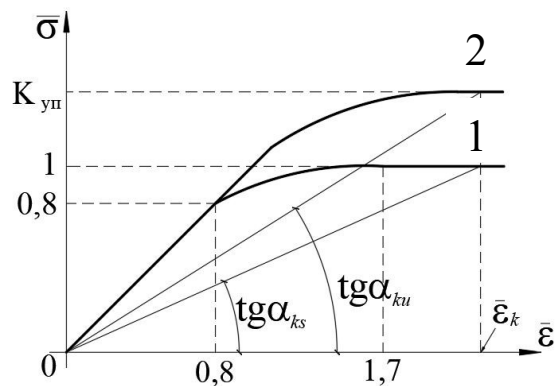
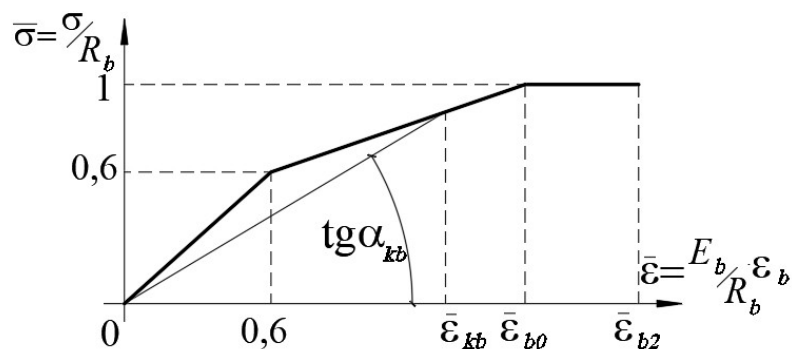


Рисунок 2.4 – Обобщенная диаграмма деформирования стали с физическим пределом текучести: 1 – для плоских участков, 2 – в местахгиба с учетом упрочнения

2. Унифицированная диаграмма бетона и арматуры

Унифицированные диаграммы зависимости напряжений от деформаций для бетона приняты согласно СП 63.13330.2018 для средней и высокой прочности бетона (см. рис. 2.5 а, б), в которых точки перелома установлены по абсолютным величинам ϵ_{b0} , ϵ_{b1} и ϵ_{b2} .

а)



б)

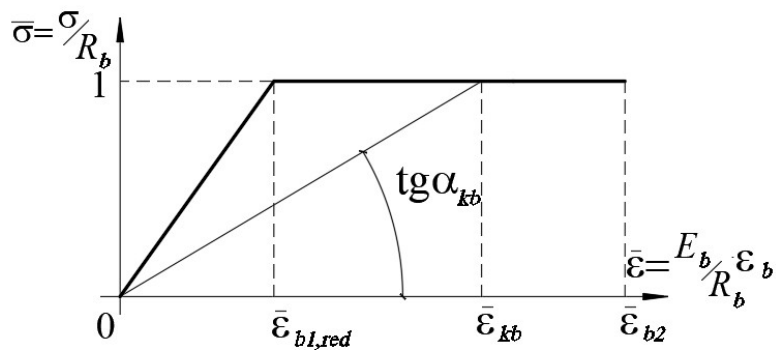


Рисунок 2.5 – Унифицированные диаграммы работы: а) бетона средней прочности; б) высокопрочного бетона

При этом учет ползучести бетона учитывается пониженным модулем деформации бетона $E_{b,\tau}$, в соответствии с п. 6.1.14 - 6.1.16 СП 63.13330.2018:

$$E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}},$$

где $\varphi_{b,cr} \geq 1$ принимается по табл. 6.12 СП 63. Пример диаграммы деформирования бетона с учетом длительной работы показан на рис 2.6 красной линией.

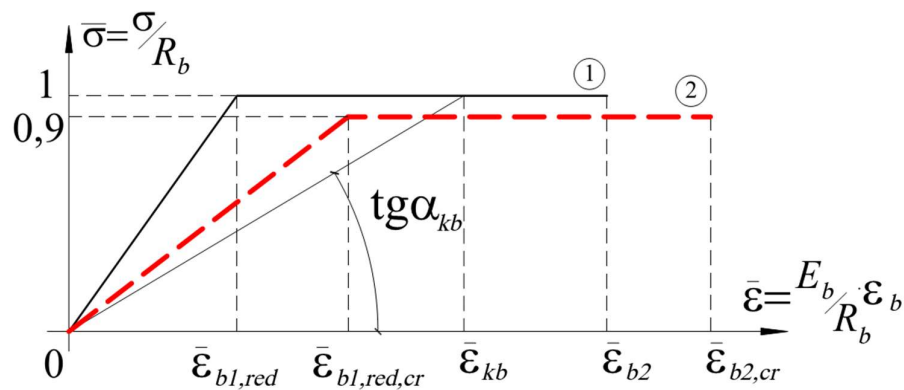


Рисунок 2.6 – Унифицированные диаграммы работы бетона: 1 – при кратковременном действии нагрузки; 2 – при длительной и постоянной нагрузке

Армирование трубобетонных конструкций принято согласно с п.8.4.4 СП 63.13330.2018 с учетом требований как для железобетонных конструкций.

Диаграммы работы для стержневой арматуры с физическим пределом текучести (рис. 2.7а) и условным (рис. 2.7б) приняты в соответствии с СП 63.13330.2018.

СП 63.13330.2018 устанавливает применение арматуры периодического профиля классов А400, А500 и А600, на практике отдавая предпочтение высокопрочной арматуре [31].

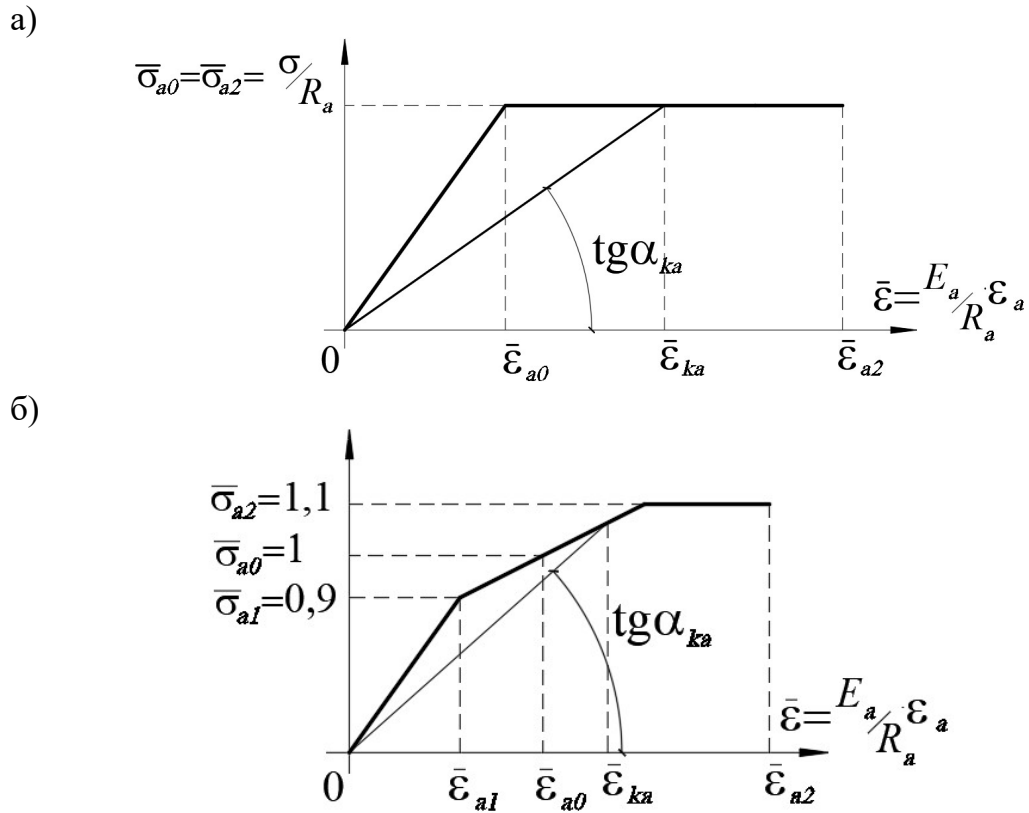


Рисунок 2.7 – Унифицированная диаграмма работы арматурной стали: а) – с физическим, б) – условным пределом текучести

3. Унифицированная диаграмма бетона с учетом обжатия

При сжатии с малым эксцентриситетом трубобетонных элементов круглого сечения бетон начинает работать в условиях трехосного напряженного состояния [43]. В этих условиях диаграмма деформирования бетонного ядра видоизменяется (см. рис. 2.8).

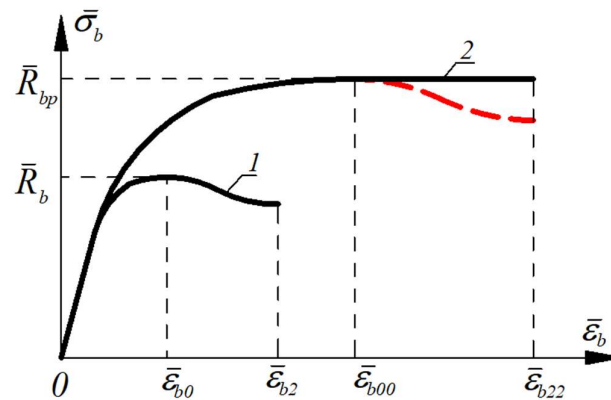


Рисунок 2.8 – Диаграмма работы бетона: 1 – работа при одноосном сжатии, 2 – то же при трехосном

Для нахождения характерных точек диаграммы воспользуемся уравнениями [6]:

$$\varepsilon_{b00} = \varepsilon_{b0} \alpha_b^{2,5} - \frac{R_b}{E_b} (\alpha_b^{2,5} - \alpha_b); \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_{b22} = \varepsilon_{b2} \frac{\varepsilon_{b0}}{\varepsilon_{b0}}; \quad (2.21)$$

где $\alpha_b = \frac{R_{bp}}{R_b}$.

Остальные точки диаграммы можно найти по приложению Г СП 63.13330.2018.

4. Расчетное сопротивление бетона при обжатии

В настоящем исследовании методика учета обжатия бетона с понижением прочностной характеристики стальной трубы принята по СП 266.1325800.2016.

Расчетное сопротивление металла трубы на сжатие R_{pc} при полном сжатии бетонной части понижается:

$$R_{pc} = R_y - \frac{1}{4} R_y \left(1 - \frac{7,5e}{D_p - 2t_p} \right), \quad (2.16)$$

где

$$1 - \frac{7,5e}{D_p - 2t_p} \geq 0. \quad (2.17)$$

R_y – расчетное сопротивление стали, t_p – толщина стенки трубы, D_p – наружный диаметр трубы, e – эксцентриситет.

При этом прочность бетона на сжатие R_{bp} возрастает:

$$R_{bp} = R_b + \Delta R_b \left(1 - \frac{7,5e}{D_p - 2t_p} \right), \quad (2.18)$$

$$\Delta R_b = R_b \left(2 + 2,52 \cdot e^{\frac{-1}{c}(R_p A_p + R_b A_b)} \right) \frac{t_p}{D_p - 2t_p} \cdot \frac{R_p}{R_b}. \quad (2.19)$$

R_b – призмочная прочность бетона на сжатие, R_p – прочность стали трубы на растяжение, A_p – площадь стали, A_b – площадь бетона, $c = 25$ МН при измерении величин в МПа и м.

2.4 Обратный метод решения задач прочности и остаточной несущей способности за пределных состояний трубобетонных элементов

Совершенствование и развитие практических методов расчета стержневых элементов конструкций по предельным состояниям с учетом физической и геометрической нелинейности традиционными методами, требующими выполнения многочисленных итерационных операций, может оказаться достаточно трудозатратным мероприятием. Эти методы можно характеризовать как прямые: по заданным соотношениям и по мере роста нагрузок (усилий) численно определяются их предельные значения, как, например, в [4, 19]. Использование такого подхода к исследованию за пределных состояний, как известно, становится невозможным. Для решения этой проблемы и сокращения объема расчетных операций в работах [7, 10] предложен обратный ход исследования: по заданному предельному или за пределному (при определении остаточной несущей способности) деформированному состоянию в сечении, соответствующему в первом случае критерию предельной нормативной деформации наиболее напряженного волокна $\bar{\varepsilon}_{\text{lim}} = \varepsilon_{\text{lim}} \frac{E}{R}$ стали и бетона по СП 266.1325800.2016, а во втором по СП 385.1325800.2018, численно, с помощью алгоритма «сечение» определяется фактические – предельные и за пределные усилия и их соотношения. При этом, в отличие от расчета на прочность, например, металлических конструкций по

СП 16.13330.2017³, развитие пластических деформаций учитывается при совместном взаимодействии всех действующих усилий, что позволяет вскрыть существенные резервы прочности [11]. Для совершенствования практических рекомендаций по расчету трубобетонных элементов, изложенных в СП 266.1325800.2016, и разработки рекомендаций по расчёту их запредельных состояний, воспользуемся обратным решением таких задач [7, 10], которое хорошо апробировано на примерах расчета стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), а также запредельных состояний с учетом потери местной устойчивости двутавровых элементов и прямоугольных труб [11, 13, 14].

Принимая во внимание изложенное, рассмотрим общее нагружение, когда в поперечных сечениях армированного трубобетонного элемента прямоугольного сечения действует продольная сила N с изгибающими моментами в двух главных плоскостях M_x и M_y (см. рис. 2.9).

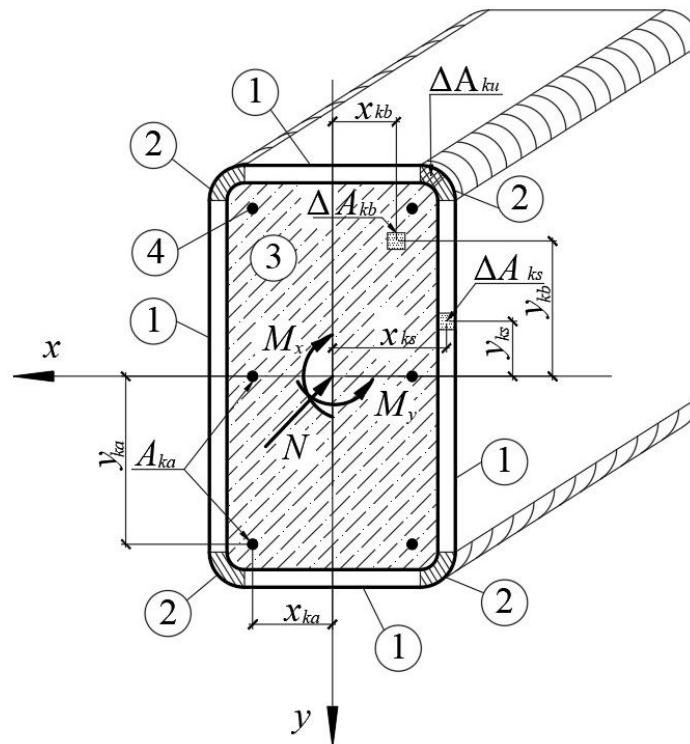


Рисунок 2.9 – Нагружение трубобетонного элемента прямоугольного сечения: 1 – плоские участки трубы, 2 – участкигиба, 3 – бетон, 4 – арматурные стержни

³ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М.: Минстрой России, 2017. 148 с.

Для удобства построения алгоритма расчета механические свойства бетона и арматуры приведем к соответствующим характеристикам стальной трубы, тогда геометрические характеристики приведенного сечения примут вид:

$$\begin{aligned}
 A_{red} &= A_s \left(1 + \frac{A_b E_b}{A_s E_s} + \frac{A_a E_a}{A_s E_s} \right); \\
 I_{x,red} &= I_{x,s} \left(1 + \frac{I_{x,b} E_b}{I_{x,s} E_s} + \frac{I_{x,a} E_a}{I_{x,s} E_s} \right); \\
 I_{y,red} &= I_{y,s} \left(1 + \frac{I_{y,b} E_b}{I_{y,s} E_s} + \frac{I_{y,a} E_a}{I_{y,s} E_s} \right);
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

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. 2.7) разбивается на достаточно малые площадки ΔA_{ks} , ΔA_{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 за предельной $\bar{\varepsilon}_{запр}$ (остаточная прочность) деформации наиболее напряженного волокна задается посредством действия в наиболее

нагруженном поперечном сечении неограниченно упругого трубобетонного элемента «упругих» усилий N^* , M_x^* , M_y^* с параметрами \bar{N}^* , m_x^* и m_y^* .

Решение задачи проводится в безразмерном виде с общим параметром загрузки

$$\bar{N}^* = N^* / R_y A_{red} = \bar{\varepsilon}_{зад.} (1 + m_x^* + m_y^*)^{-1}, \quad \text{который}$$

устанавливается по $\bar{\varepsilon}_{зад.}$ ($\bar{\varepsilon}_{lim}$ или $\bar{\varepsilon}_{запр.}$). Тогда напряженное и деформированное состояния можно представить в одном виде:

$$\bar{\sigma}_s^*(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{\varepsilon}_s^*(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{N}^* (1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x}), \quad (2.23)$$

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

Для определения соответствующего (2.23) 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:

$$\bar{\varepsilon}_k = \bar{\varepsilon}_{k,oc} + \bar{\varepsilon}_0 - \bar{v}'' \tilde{y}_k - \bar{u}'' \tilde{x}_k. \quad (2.24)$$

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

Используя (2.24), представим соответствующие предельному (запредельному) деформированному состоянию (2.23) уравнения равновесия трубобетонного элемента в сечении

$$\left. \begin{aligned} \bar{N} &= \bar{\varepsilon}_0 \bar{A}_{ef} + \bar{v}'' \bar{S}_x + \bar{u}'' \bar{S}_y \\ \bar{N} m_x &= -\bar{\varepsilon}_0 \bar{S}_x - \bar{v}'' \bar{I}_{x,ef} + \bar{u}'' \bar{I}_{xy,ef} \\ \bar{N} m_y &= -\bar{\varepsilon}_0 \bar{S}_y + \bar{v}'' \bar{I}_{xy,ef} - \bar{u}'' \bar{I}_{y,ef} \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \bar{A}_{ef} &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \Delta \bar{A}_{ka} \\ \bar{S}_x &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \tilde{y}_{ks} \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \tilde{y}_{ku} \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \tilde{y}_{kb} \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \tilde{y}_{ka} \Delta \bar{A}_{ka} \\ \bar{S}_y &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \tilde{x}_{ks} \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \tilde{x}_{ku} \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \tilde{x}_{kb} \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \tilde{x}_{ka} \Delta \bar{A}_{ka} \\ \bar{I}_{x,ef} &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \tilde{y}_{ks}^2 \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \tilde{y}_{ku}^2 \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \tilde{y}_{kb}^2 \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \tilde{y}_{ka}^2 \Delta \bar{A}_{ka} \\ \bar{I}_{y,ef} &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \tilde{x}_{ks}^2 \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \tilde{x}_{ku}^2 \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \tilde{x}_{kb}^2 \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \tilde{x}_{ka}^2 \Delta \bar{A}_{ka} \\ \bar{I}_{xy,ef} &= \sum_{k_s=1}^{n_s} \bar{E}_{ks} \tilde{x}_{ks} \tilde{y}_{ks} \Delta \bar{A}_{ks} + \sum_{k_u=1}^{n_u} \bar{E}_{ku} \tilde{x}_{ku} \tilde{y}_{ku} \Delta \bar{A}_{ku} + \sum_{k_b=1}^{n_b} \bar{E}_{kb} \tilde{x}_{kb} \tilde{y}_{kb} \Delta \bar{A}_{kb} + \sum_{k_a=1}^{n_a} \bar{E}_{ka} \tilde{x}_{ka} \tilde{y}_{ka} \Delta \bar{A}_{ka} \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

\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 центробежный момент инерции

соответственно.

$\Delta \bar{A}_k = \frac{\Delta A_k}{A_{red}}$; $\bar{E}_{ks} = tg \alpha_{ks}$ и $\bar{E}_{ku} = tg \alpha_{ku}$ – относительные секущие модули

стали, показанные на рис. 2.4; $\bar{E}_{kb} = tg \alpha_{kb} \cdot \frac{E_b}{E_s}$; $tg \alpha_{kb}$ – то же для бетона (см.

рис. 2.5). Учет ползучести при длительном нагружении бетона, как это уже упоминалось, определяется по п. 6.1.12-6.1.22 СП 63.13330.2018⁴ и заключается в изменении уклона диаграммы работы бетона (см. рис. 2.5).

Сопоставляя (2.23) и (2.24), можно увидеть, что:

⁴ СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М.: Минстрой России. 2015. 168 с.

$$\bar{\varepsilon}_0 = \bar{N}^* ; \bar{v}'' = -\bar{N}^* m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} ; \bar{u}'' = -\bar{N}^* m_y^* \frac{\rho_y}{x_*}. \quad (2.27)$$

Тогда, используя систему (2.25), с учетом (2.27) получим параметры предельных (запредельных) усилий при упругопластической работе материалов и возможном выключении из работы бетона в растянутой зоне:

$$\bar{N}_{ef} = \bar{N}^* \cdot C_1 ; m_x = C_2 / C_1 ; m_y = C_3 / C_1, \quad (2.28)$$

Где

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \bar{A}_{ef} - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_x - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_y \\ C_2 &= -\bar{S}_x + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{x,ef} - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{xy,ef} \\ C_3 &= -\bar{S}_y - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{xy,ef} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{y,ef} \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Имея (2.28) с принятием $\bar{\varepsilon}_{зад.} = \bar{\varepsilon}_{lim}$, практический метод расчета на прочность можно привести к виду:

$$\frac{1}{\gamma_c R_s c_p} \left(\frac{N}{A_{red}} + \frac{M_x}{I_{x,red}} y_* + \frac{M_y}{I_{y,red}} x_* \right) \leq 1, \quad (2.30)$$

$$\text{где } c_p = \bar{N}_{ef} (1 + m_x + m_y). \quad (2.31)$$

При этом напомним, что A_{red} , $I_{x,red}$, $I_{y,red}$ – характеристики сечения, приведенные к материалу трубы. В (2.31) коэффициент c_p учитывает развитие пластических деформаций и выключение из работы бетонного заполнения в растянутой зоне.

Таким образом, задаваясь 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 (2.28).

В частном случае, когда сечение трубобетонного элемента подвергается действию сжимающей силы и изгиба в одной плоскости (рис. 2.10), формулы (2.23) – (2.31) упрощаются, сечение для ускорения решения задачи разбивается на полосы. Схематично ход решения представлен на рис. 2.11.

С изложенным в п. 2.4. методом расчета более кратко можно также ознакомиться в публикации автора [15].

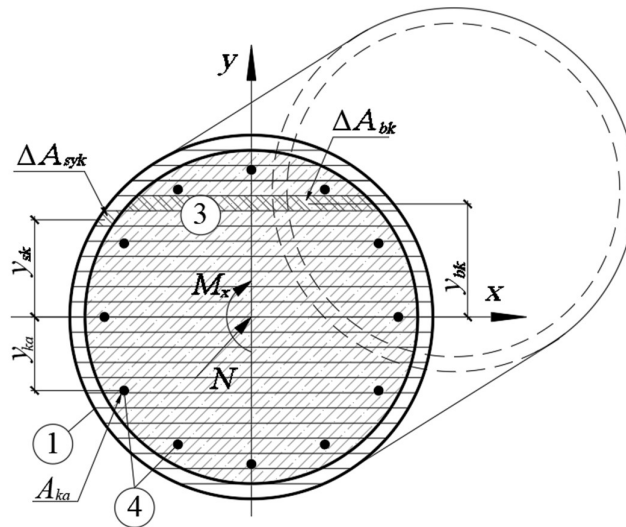


Рисунок 2.10 – Загружение трубобетонного элемента круглого сечения

2.5 Алгоритм решения обратной задачи

Решение задачи прочности и запредельного состояния в сечениях трубобетонного элемента заключается в поиске значений относительных эксцентриситетов продольной силы \bar{N}_{ef} , $m_{x,ef}$ и $m_{y,ef}$, по заданному деформированному состоянию при заданных m_x^* и m_y^* соответствующих $\bar{N}^* = \bar{\varepsilon}_{зад} (1 + m_x^* + m_y^*)^{-1}$.

1. Определяются геометрические характеристики сечения элемента и физические характеристики материалов. Учитываем особенности формы сечения.

2. Вычисляются приведенные к стали характеристики сечения трубобетонного стержня.

3. Бетонная и стальная части трубы разбиваются на малые площадки.

4. Задается диапазон возможных деформационных эксцентриситетов m_x^* ; m_y^* , таким образом, чтобы настоящее значение относительного деформационного эксцентриситета попало в данный диапазон. При этом заметим, что зависимости $m_x(m_x^*)$ и $m_y(m_y^*)$ являются непрерывно возрастающими функциями. Это позволяет использовать метод дихотомии для подбора таких m_x^* и m_y^* , которым соответствуют искомые m_x , m_y и значение \bar{N}_{ef} .

5. При заданных значениях m_x^* и m_y^* , а также $\bar{\varepsilon}_{зад}$, получим \bar{N}_{ef} , $\bar{\varepsilon}_0$, \bar{v}'' , \bar{u}'' . По этим значениям определим концевые эксцентриситеты $m_{x,ef,i}^0$ и $m_{y,ef,i}^0$, которые сравниваются с m_x^0 и m_y^0 . При их равенстве решение \bar{N}_{ef} считается найденным.

На рис. 2.11 ход решения проиллюстрирован блок-схемой.



Рисунок 2.11 – Ход решения задачи прочности ТБЭ

2.6 Влияние начальных напряжений и упрочнения в стальной части трубобетонного элемента

Для оценки влияния начальных напряжений и упрочнения в стальной части трубы учтем в расчете положения п. 2.2. Вычисленные при этом коэффициенты $c_{p,u}$ для данного случая сравним с коэффициентами c_p при тех же физических и геометрических характеристиках сечений, но без учета начальных напряжений и гибов. Значение радиуса гiba по наружной линии трубы принимается в зависимости от ее толщины t равным $3t$, как наиболее характерное значение по ГОСТ 30245-2003 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций». На рис. 2.12. показано, насколько процентов коэффициент $c_{p,u}$ отклонится от c_p в зависимости от относительной толщины трубы (t/D_p). Очевидно, что начальные напряжения в трубе не влияют прочность (см. формулу (2.5)), а упрочнение участков гiba дает некоторое повышение прочности до 5,1% для самых толстых труб ($t/D_p = 0,046$). Значение относительной толщины трубы приняты согласно СП 266 в диапазоне от 0,0064 до 0,046, из которого выбрано 5 характерных значений с равными промежутками между ними (0,0064; 0,0163; 0,0262; 0,0361; 0,046). Таким образом, при расчете на прочность и запредельных состояний трубобетонных элементов упрочнение металла в местах гiba в силу малого его влияния и в запас несущей способности учитывать не будем.

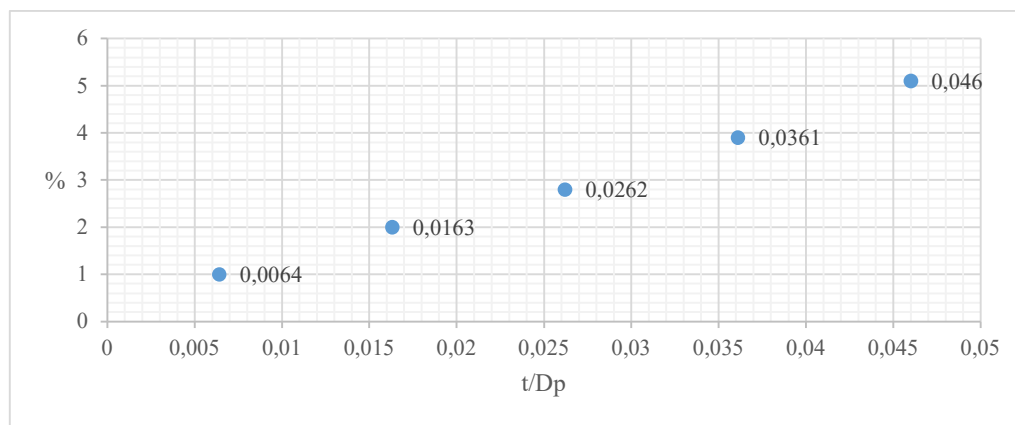


Рисунок 2.12 – Значения максимального отклонения $c_{p,u}$ при учете начальных напряжений и упрочнения гибов в трубе от c_p без учета данного факта, в %

2.7 Сопоставление результатов расчета на прочность обратным методом и методом конечных элементов⁵

Численные исследования трубобетонных конструкций проводились многими исследователями, наиболее современными из которых являются работы И.М. Гаранжа [9], *E. Ellobody* [72], *V. Patel* [118], *G.D. Hatzigeorgiou* [79], *H. Hua* [80], *Md. M. Islam* [82] и другие. В работах применялись программные комплексы *ABAQUS* и *ANSYS*. Автором данного исследования использован *ANSYS 18.0*. Описание моделей и расчета дается в [8]. Для моделирования стали, как правило, применяются билинейные кривые или таблично заданные диаграммы деформирования, например, *Bilinear Isotropic Hardening* и *Multilinear Isotropic Hardening*. Для бетона в МКЭ используются *Solid65* или *Solid185*, поддерживающие модель бетона [30].

Для моделирования бетона используется комбинация *Druker-Prager Concrete* [83] и трехлинейная диаграмма бетона. Для верификации модели в среде *ANSYS* были созданы призмы из бетона, которые подвергались растяжению и сжатию [8].

В случае работы бетона в условиях трехосного сжатия, а также при статической работе трубобетонных стержней учет раскрытия трещин в бетоне становится не столь актуальным, так как по мнению многих исследователей, бетон в трубе приобретает свойства псевдопластичности [75]. Основное преимущество широко известного *Solid65* – расчет трещин, в данной задаче теряет свою необходимость, т.к. при обжатии бетон работает как упругопластический материал, а образованием микротрещин можно пренебречь [39].

Таким образом, для расчетов был принят *Solid185* – восьмиузловой конечный элемент, способный на упругопластические деформации.

⁵ Результаты данной работы были опубликованы автором в исследовании: Ведерникова А.А. Численные исследования трубобетонных элементов при внецентренном сжатии [Текст] / А.А. Ведерникова // Инженерный Вестник Дона. – 2022. – №11.

Классическая модель Друкера-Прагера [106] применима к такому материалу бетон. Описание модели происходит при помощи параметров - прочностных характеристик, указанных в табл. 2.1.

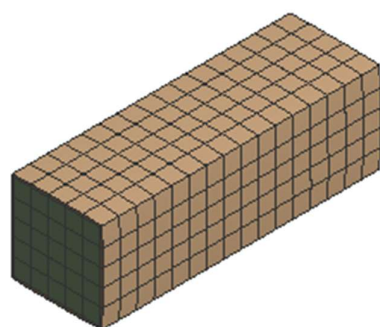
Таблица 2.1 – Расчетные характеристики бетона

Начальный модуль упругости бетона	Коэффициент Пуассона	Прочность бетона при одноосном сжатии	Прочность бетона при растяжении	Прочность бетона при двухосном сжатии [55]
E_b	ν	R_b	R_{bt}	От R_b до $\sqrt{2}R_b$

Такая модель трехосной работы наиболее соответствует обжатому бетону из предлагаемых в *ANSYS 18.0*. В исследованиях [66, 83] производится анализ модели Друкера-Прагера, при котором она была признана подходящей для расчета трубобетонных колонн.

На рис. 2.13 показаны компьютерные модели ТБЭ. При создании расчетной модели использовались конечные элементы: *SOLID185* – для бетона, *SHELL* – для трубы, *BEAM180* - для арматуры, для контактной пары применялись элементы *CONTA174* (бетон), *TARGE170* (сталь). Конечноэлементная сетка подбиралась так, чтобы количество элементов было минимальным, но не влияло на результат расчета.

а)



б)

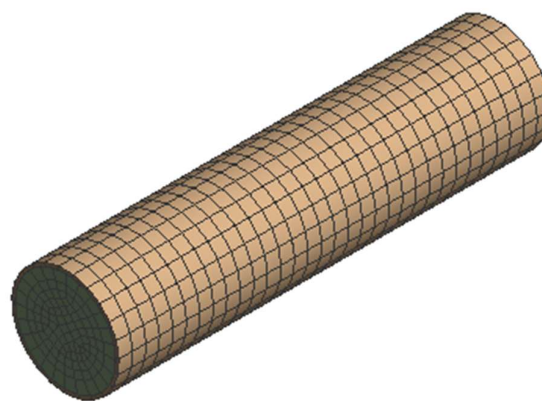


Рисунок 2.13 – КЭ модель короткого трубобетонного элемента прямоугольного (а) и круглого (б) сечения

В расчетной схеме обеспечивается шарнирное опирание торцов, заданных через *Remote Displacement*.

Для моделирования поверхностного контакта была использована опция *General Contact*. В работах *Y. Hunaiti* [81] экспериментально подтверждено, что

совместная работа бетона с трубой обеспечена, если они соединены по концам и нагрузка приложена одновременно на стальную и бетонную части. Поэтому был выбран вариант не смещающихся относительно друг друга трубы и бетона. Соединение трубы и бетона считается обеспеченным («*bonded*»).

Нагружение моделировалось заданием пошагового перемещения. Такой подход позволяет улучшить сходимость решения. Для лучшей сходимости были настроены параметры *Step Controls*, максимальное количество шагов было увеличено до 1000.

Решатель программного комплекса был настроен на несимметричный метод Ньютона-Рафсона. Оценка сходимости шага была назначена в 0,5%.

Нелинейный расчет выполнялся методом Ньютона-Рафсона с использованием полной процедуры *NROPT, FULL* и автоматическим выбором шага. Для улучшения сходимости применена несимметричная схема хранения матриц.

Сопоставление результатов расчета обратным методом с результатами расчета МКЭ производится для нескольких сочетаний материалов и геометрических характеристик трубы.

При сопоставлении варьируются следующие параметры:

- расчетные сопротивления стали R_y и бетона R_b ;
- соотношение толщины трубы к ее внешнему диаметру t/D_p ;
- относительные эксцентриситеты m_x^0 и m_y^0 .
- соотношение высоты сечения H к ширине B для прямоугольных труб.

Марки стали назначены по СП 16: С290, С330, С420, С560, С650. Стали С235, С245 и С255 в расчет не взяты, так как для трубобетонных конструкций рекомендуется использовать более прочные стали [31].

Применение бетонов малой прочности показывает малую эффективность, так как большую нагрузку в этом случае, очевидно, будет брать на себя стальная часть элемента. Исследования показывают, что предпочтительными являются бетоны класса В35 и выше [31, 88, 89, 99]. Поэтому прием класс обычного бетона в диапазоне В35-В100.

Отношение параметра t/D_p по нормам СП 266 лежит в диапазоне от 0,0064 до 0,046. Расчет будем производить для дискретных значений 0,0064; 0,0163; 0,0262; 0,0361; 0,046, расположенных через равные промежутки. Здесь под D_p понимается внешний диаметр трубы для круглых труб и высота сечения для прямоугольных ($D_p = H$). Относительные эксцентриситеты принимаются от 0,25 до 2,0 с шагом 0,25. Соотношение высоты сечения к ширине H/B принимается от 1 до 2 с шагом 0,25. За базовый размер взята ширина сечения (диаметр для труб круглого сечения) $B = 150$ мм. Все эти параметры сведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры трубобетонных элементов

Относительный эксцентриситет, m_x^0	0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0
Предел текучести стали, R_y	290; 330; 420; 560; 650
Предел прочности бетона, R_b	19,5; 27,5; 37; 44; 50; 54; 57
Отношение толщины трубы к диаметру (высоте сечения H), t/D_p	0,0064; 0,0163; 0,0262; 0,0361; 0,046
Соотношение высоты сечения к ширине H/B (для прямоугольных сечений)	1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0

Сопоставляются расчеты для трубобетонных элементов круглого и прямоугольных сечений:

а) при нагружении сжимающей силой с одноосным эксцентриситетом – для круглых сечений и прямоугольных (табл. 2.3 и 2.4 соответственно);

б) при нагружении сжимающей силой с двухосным эксцентриситетом элементы квадратного сечения (табл. 2.5).

На рис. 2.14 и 2.15 показаны напряжения в среднем сечении элемента №3 из табл. 2.3 в бетонной и стальной части, соответственно. В момент достижения предельных допускаемых деформаций напряжения в бетонной части достигают значения -29,83 МПа в наиболее напряженном волокне, в стальной -230,29 МПа. Это хорошо согласуется с расчетными данными по предлагаемому методу, в котором по формуле (2.16) и (2.19) значения прочности бетона и стали составляют $R_{bp} = 34,2$ МПа и $R_{pc} = 236,7$ МПа.

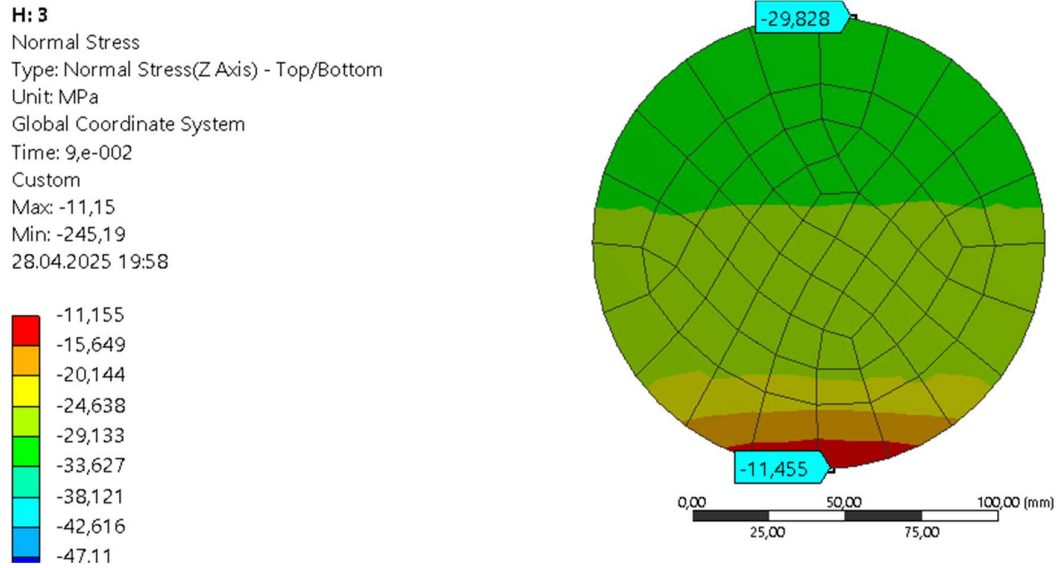


Рисунок 2.14 – Напряжения в бетонной части трубобетонного элемента №3(среднее сечение)

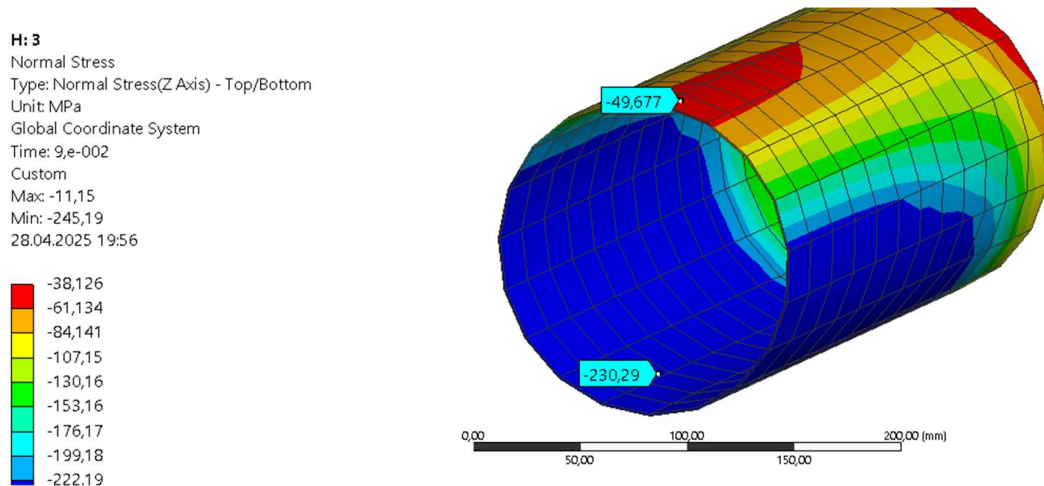


Рисунок 2.15 – Напряжения в стальной части трубобетонного элемента №3 (среднее сечение, перевернуто)

Таблица 2.3 – Сопоставление результатов расчетов обратным методом с результатами расчета в ANSYS (круглые сечения)

№	Ry, МПа	Rb, МПа	t/Dp	mx0	Нобр, кН	Nansys, кН	%
1	290	19,5	0,0064	0,25	487,1	428,9	12,0
2	560	19,5	0,046	0,5	1797,1	1901,2	-5,8
3	290	27,5	0,0064	0,25	595,6	564,1	5,3
4	290	37	0,0163	2	454,9	499,9	-9,9
5	330	37	0,0163	1	662,9	719,9	-8,6
6	650	37	0,0163	1,75	659,3	748,9	-13,6
7	330	37	0,046	0,5	1388,8	1502,3	-8,2
8	650	44	0,0064	0,75	780,3	832,9	-6,7
9	420	44	0,0262	0,5	1296,3	1333,8	-2,9
10	420	44	0,0262	1	968,9	996,8	-2,9

Сопоставление результатов расчета обратным методом с результатами расчета по НДМ на прочность для трубобетонных элементов круглого сечения при загрузении сжимающей силой с одноосным эксцентриситетом показывает удовлетворительную сходимость в пределах -13,6...12,0%.

На рис. 2.16 и 2.17 показаны напряжения в бетонной и стальной части в среднем сечении элемента №4 из табл. 2.5. В момент достижения предельных допускаемых деформаций напряжения в бетонной части достигают значения - 37,08 МПа в наиболее напряженном волокне, в стальной -291,0 МПа. Это хорошо согласуется с расчетными данными по предлагаемому методу, в котором по формуле (2.16) и (2.19) значения прочности бетона и стали составляют $R_{bp} = 37,0$ МПа и $R_{pc} = 290,0$ МПа.

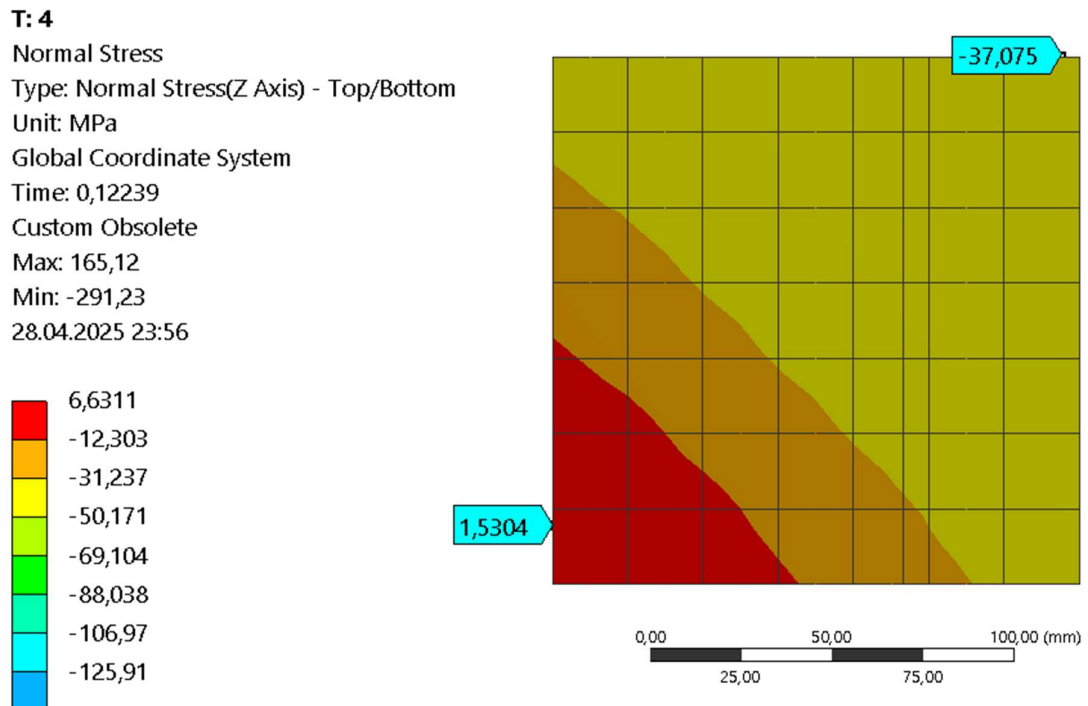


Рисунок 2.16 – Напряжения в бетонной части трубобетонного элемента №4 (среднее сечение)

T: 4
 Normal Stress
 Type: Normal Stress(Z Axis) - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 0,12239
 Custom
 Max: 165,12
 Min: -291,23
 28.04.2025 23:57

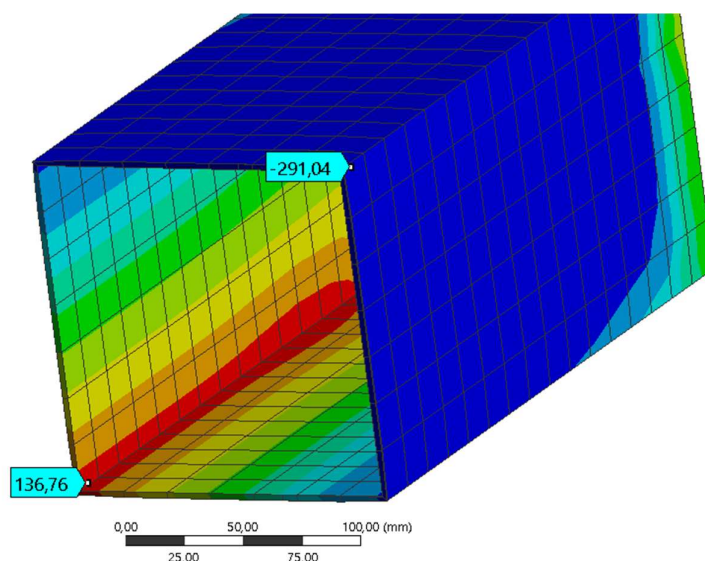
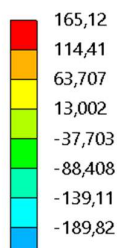


Рисунок 2.17 – Напряжения в стальной части трубобетонного элемента №3 (среднее сечение)

Таблица 2.4 – Сопоставление результатов расчетов обратным методом с результатами расчета в ANSYS (прямоугольные сечения)

№	Ry, МПа	Rb, МПа	t/Dp	mx0	H/B	Нобр, кН	Nansys, кН	%
1	290	19,5	0,046	0,25	1,5	2333,2	2217,9	-5,0
2	290	27,5	0,0064	0,25	1	689,8	702,9	2,3
3	330	37	0,046	0,5	1,75	3313,8	3250,6	1,8
4	330	44	0,0064	0,75	2	1805,7	1901	5,4
5	420	44	0,0262	0,5	1	1465,3	1517,2	3,7
6	420	37	0,046	1,75	1,25	1527,2	1593,7	4,4
7	560	37	0,0064	0,25	1	993,9	953,4	3,8
8	560	44	0,0361	0,75	1,5	2959,9	3113	5,1
9	560	44	0,0361	1,0	1,75	3302,7	3441,5	4,3
10	650	44	0,0262	0,75	1,5	2688,3	2869,3	6,6

Сопоставление результатов расчета обратным методом с результатами расчета по НДМ на прочность для трубобетонных элементов круглого сечения при загрузении сжимающей силой с одноосным эксцентриситетом показывает хорошую сходимость в пределах от -5,0% до 6,6%.

Таблица 2.5 – Сопоставление результатов расчетов обратным методом с результатами расчета в ANSYS (квадратные сечения)

№	Ry, МПа	Rb, МПа	t/Dp	mx0	my0	Нобр, кН	Nansys, кН	%
1	290	19,5	0,0064	0,25	0,25	515,2	523,6	-1,6
2	650	19,5	0,046	0,5	0,5	1724,0	1629,8	5,5
3	560	27,5	0,0064	0,25	0,25	764,4	807,5	-5,6
4	290	37	0,0163	0,5	0,5	857,7	918,5	-7,1
5	330	37	0,0163	1	1	655,8	615	6,2
6	330	37	0,0163	1,5	1,5	486,3	475,9	2,1
7	560	37	0,046	0,5	0,5	1857,1	1905,5	-2,6
8	650	44	0,0064	0,75	0,75	792	700,1	11,6
9	420	44	0,0262	0,5	0,5	1332,8	1388,4	-4,2
10	420	44	0,0262	1	1	957,8	1068,2	-11,5

Сопоставление результатов расчета обратным методом с результатами расчета по НДМ на прочность для трубобетонных элементов круглого сечения при загрузении сжимающей силой с одноосным эксцентриситетом показывает хорошую сходимость в пределах от -11,5% до 11,6%.

Как следует из данных табл. 2.3 – 2.5, между результатами расчета обратным методом и МКЭ на прочность наблюдается удовлетворительная сходимость (0...14%). КЭ модель достаточно точно соответствует численному обратному методу.

2.8 Сопоставление результатов расчета обратным методом с расчетом по нормативной методике

Для сопоставления результатов расчета обратным численным методом с результатами расчета по нормативным методикам назначены те же характеристики, что и в п. 2.5 и табл. 2.2. Таким образом, сопоставляются результаты расчета обратным методом не только с результатами МКЭ, но и с расчетом по нормативной методике СП 266, а именно расчетом по нелинейной деформационной модели (НДМ). Все результаты расчета сведены в таблицы: 2.6 – для элементов круглого сечения, 2.7 – для элементов прямоугольного сечения с загрузением продольной сжимающей силой и изгибающим моментом в одной плоскости, 2.8 – для элементов квадратного сечения с загрузением продольной сжимающей силой и изгибающими моментами в двух плоскостях.

Таблица 2.6 – Сопоставление результатов расчетов обратным методом с результатами расчета по СП 266.1325800.2016 (круглые сечения)

№	Ry, МПа	Rb, МПа	t/Dp	mх0	№обр, кН	№норм, кН	%
1	290	19,5	0,0064	0,25	487,1	522,9	-6,8
2	560	19,5	0,046	0,5	1797,1	1753,2	2,5
3	290	27,5	0,0064	0,25	595,6	648,9	-8,2
4	290	37	0,0163	2	454,9	469,1	-3,0
5	330	37	0,0163	1	662,9	688,9	-3,8
6	650	37	0,0163	1,75	659,3	654,9	0,7
7	330	37	0,046	0,5	1388,8	1447,4	-4,0
8	650	44	0,0064	0,75	780,3	806,5	-3,2
9	420	44	0,0262	0,5	1296,3	1343,7	-3,5
10	420	44	0,0262	1	968,9	960,4	0,9

Сопоставление результатов расчета обратным методом с результатами расчета по НДМ на прочность для трубобетонных элементов круглого сечения при загрузении сжимающей силой с одноосным эксцентриситетом показывает хорошую сходимость в пределах от -8,2% до 2,5%.

Таблица 2.7 – Сопоставление результатов расчетов обратным методом с результатами расчета по СП 266.1325800.2016 (прямоугольные сечения)

№	Ry, МПа	Rb, МПа	t/Dp	mx0	H/B	Нобр, кН	Ннорм, кН	%
1	290	19,5	0,046	0,25	1,5	2333,2	2291,1	-1,8
2	290	27,5	0,0064	0,25	1	689,8	711,4	3,0
3	330	37	0,046	0,5	1,75	3313,8	3330,0	0,5
4	330	44	0,0064	0,75	2	1805,7	1845,0	2,1
5	420	44	0,0262	0,5	1	1465,3	1465,0	0,0
6	420	37	0,046	1,75	1,25	1527,2	1500,0	-1,8
7	560	37	0,0064	0,25	1	993,9	1010,0	1,6
8	560	44	0,0361	0,75	1,5	2959,9	2908,4	-1,8
9	560	44	0,0361	1,0	1,75	3302,7	3210,0	-2,9
10	650	44	0,0262	0,75	1,5	2688,3	2590,0	-3,8

Сопоставление результатов расчета обратным методом с результатами расчета по НДМ на прочность для трубобетонных элементов прямоугольного сечения при загрузении сжимающей силой с одноосным эксцентриситетом показывает хорошую сходимость в пределах от -3,8% до 3,0%.

Таблица 2.8 – Сопоставление результатов расчетов обратным методом с результатами расчета по СП 266.1325800.2016 (квадратные сечения)

№	Ry, МПа	Rb, МПа	t/Dp	mx0	my0	Нобр, кН	Ннорм, кН	%
1	290	19,5	0,0064	0,25	1	515,2	521,0	1,1
2	290	19,5	0,046	0,25	1,5	1724,0	1714,0	-0,6
3	290	27,5	0,0064	0,25	1	764,4	773,0	1,1
4	290	37	0,0163	2	2	857,7	925,0	7,3
5	330	37	0,0163	1	1,25	660,5	710,0	7,0
6	330	37	0,0163	1,75	1,25	495,6	535,0	7,4
7	330	37	0,046	0,5	1,75	1857,1	1845,0	-0,7
8	330	44	0,0064	0,75	2	792	828,0	4,3
9	420	44	0,0262	0,5	1	1332,8	1333,0	0,0
10	420	44	0,0262	1	1	957,8	980,0	2,3

Сопоставление результатов расчета обратным методом и по НДМ для трубобетонных элементов квадратного сечения при загрузении сжимающей силой с двухосным эксцентриситетом дает хорошую сходимость в пределах от -0,7% до 7,3%.

Опираясь на данные табл. 2.6 – 2.8 и хорошую сходимость полученных результатов, можно утверждать о достоверности обратного метода расчета.

Следует отметить, что обратный метод имеет высокую точность расчета и скорость по сравнению с НДМ, так как напряженно-деформирование состояние задается сразу, а не определяется в процессе расчета.

2.9 Остаточная несущая способность трубобетонных элементов по прочности

Преимуществом обратного численного метода является возможность рассмотреть НДС трубобетонного элемента на любой стадии загрузки. Исследование предельных состояний позволяет оценить живучесть несущих конструкций при защите зданий и сооружений от прогрессирующего разрушения.

По данным СП 385.1325800.2018⁶ допускаемые предельные деформации бетона аналогично СП 63.13330.2018 составляют не более $\epsilon_{b2} = 0,0035$. При этом для арматурных сталей допускаются деформации $\epsilon_s = 0,025$ и $\epsilon_s = 0,01$ с физическим и условным пределом текучести соответственно. Для стали трубы при расчете принимается диаграмма ее деформирования по СП 16.13330.2017, прил. В.

При достижении в крайних и последующих к центру тяжести волокон бетонной части сечения деформации ϵ_{b2} (см. рис. 2.4) происходит выключение из работы бетона. Однако, сколько бы волокон не вышло за пределы ϵ_{b2} , ставшая часть сечения трубобетонного элемента может сохранять работоспособность за счет стальной части и зоны работы бетона, не достигшей предельных деформаций.

На примере задачи для трубобетонных элементов с характеристиками, указанными в табл. 2.9, рассмотрим предельные состояния по прочности ТБЭ. Приводятся результаты расчеты для круглого и прямоугольного сечений,

⁶ СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М. Минстрой России. 2018

загруженных продольной сжимающей силой с одно- и двухосным эксцентриситетом соответственно. Расчет остаточной несущей способности производится в диапазоне до предельных деформаций стали, указанных выше (0,025 и 0,01). Деформации бетона для стержней круглого сечений рассчитываются с учетом п. 2.3 п.п. 3.

Таблица 2.9 – Параметры для исследования запредельной работы трубобетонных элементов.

Относительный эксцентриситет, m_x^0	0,25; 0,5; 1,0; 1,5
Предел текучести стали, R_y	290; 330; 420
Предел прочности бетона, R_b	27,5; 44
Отношение толщины трубы к диаметру (высоте сечения H), t/D_p	0,0064; 0,0361
Соотношение высоты сечения к ширине H/B (для прямоугольных сечений при равных двuosных эксцентриситетах $m_x0 = m_y0$)	1,0
Соотношение высоты сечения к ширине H/B (для прямоугольных сечений при загрузении с одноосным эксцентриситетом)	1,0; 2,0

На рис. 2.18 – 2.27 показаны графики относительной остаточной несущей способности k в зависимости от относительной деформации $\bar{\varepsilon} = \varepsilon * E_y/R_y$, полученные «обратным» численным методом.

Коэффициент относительной прочности k соответствует значению остаточной прочности сечения относительно максимальной полученной.

$$k = \bar{N}_{\varepsilon,i} / \bar{N}_{\varepsilon,max}; \quad (2.32)$$

где $\bar{N}_{\varepsilon,max}$ соответствует несущей способности сечения при расчете на прочность.

Трубобетонные элементы с круглым сечением

На рис. 2.18 – 2.19 показаны графики зависимости остаточной несущей способности сжато-изогнутых трубобетонных элементов круглого сечения от величины относительной деформации $\bar{\varepsilon}$. Расчет произведен для бетона с

пределом прочности $R_b = 27,5$ и 44 МПа, и для стали трубы с пределом текучести $R_y = 420$ МПа $\bar{\varepsilon}_{\text{пред}} = 12,26$, с $R_y = 290$ МПа – 17,76.

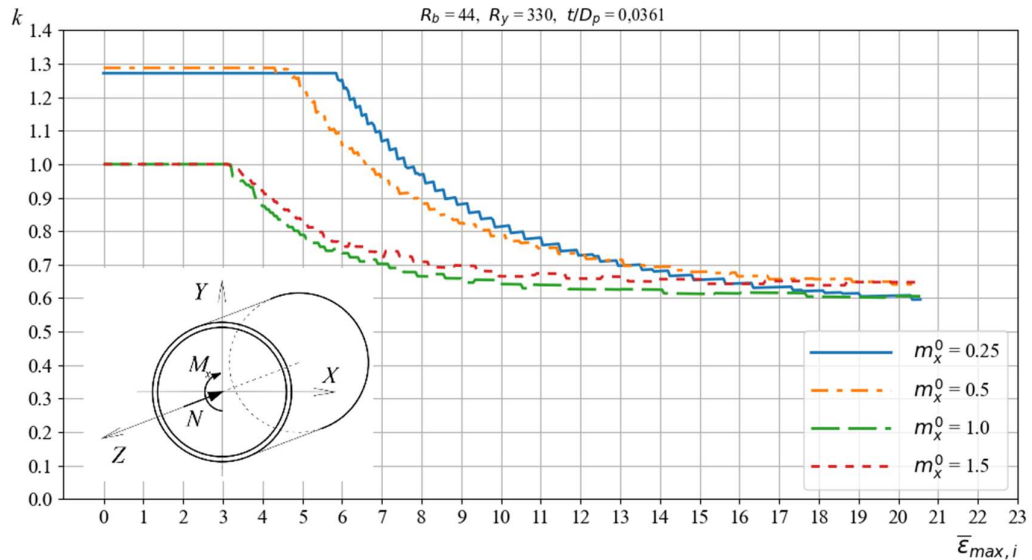


Рисунок 2.18 – График зависимости остаточной прочности от величины максимальной остаточной деформации (относительно не обжатого бетона) при $R_b = 44$ МПа, $R_y = 330$ МПа, $t/D_p = 0,0361$

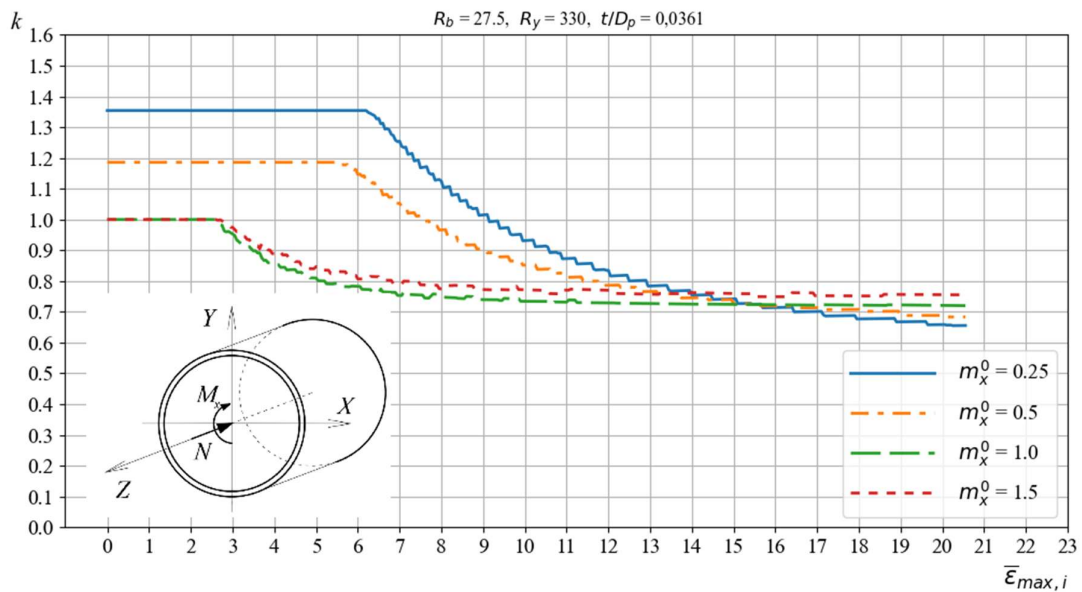


Рисунок 2.19 – График зависимости остаточной прочности от величины максимальной остаточной деформации (относительно не обжатого бетона) при $R_b = 27,5$ МПа, $R_y = 330$ МПа, $t/D_p = 0,0361$.

При $m_x^0 = 0,25$ относительная прочность составила $0,6...0,65$, а при $m_x^0 = 1,5$ – $0,65...0,79$. Меньшие значения соответствует сочетанию более прочного бетона с менее прочной сталью ($R_b = 44$ МПа, $R_y = 330$ МПа). В элементах, в которых наблюдалось упрочнение бетона остаточная несущая способность падает стремительнее, чем в трубах с неупрочненным бетоном.

Трубобетонные элементы прямоугольного сечения

На рис. 2.20-2.21 показаны графики зависимости остаточной несущей способности от относительных деформаций для случая загрузки продольной силой с одноосным эксцентриситетом с отношением сторон трубы $H/B = 2,0$. При сочетании следующих расчетных сопротивлений стали и бетона, $R_y = 290$ МПа и 420 МПа, $R_b = 44$ МПа относительная остаточная прочность составила при $m_x^0 = 0,25$ – $0,22...0,31$, а при $m_x^0 = 1,5$ – $0,29...0,38$. Меньшее значение остаточной несущей способности соответствует сочетанию бетона с менее прочной стали ($R_b = 44$ МПа, $R_y = 290$ МПа).

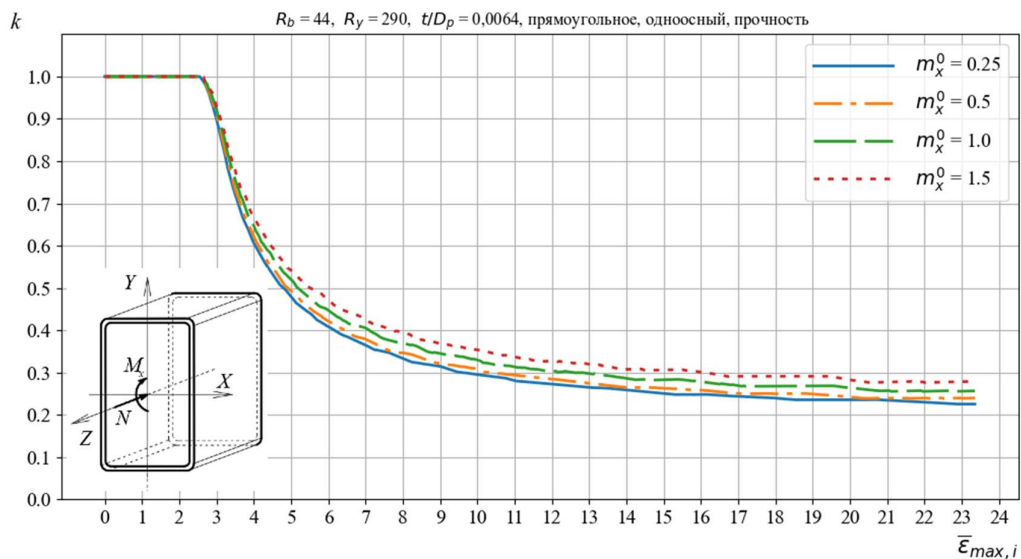


Рисунок 2.20 – График зависимости остаточной прочности от величины максимальной остаточной деформации при $R_b = 44$ МПа, $R_y = 290$ МПа, $t/H = 0,0064$.

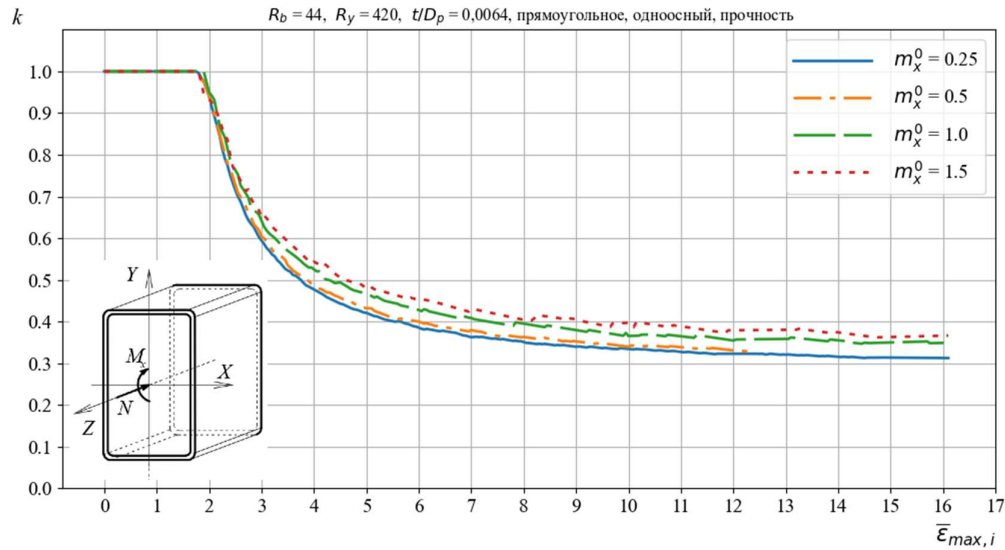


Рисунок 2.21 – График зависимости остаточной прочности от величины максимальной остаточной деформации при $R_b = 44$ МПа, $R_y = 420$ МПа, $t/H = 0,0064$.

На рис. 2.22-2.23 изображены графики остаточной прочности k трубобетонного элемента квадратного сечения при загрузении продольной силой с двухосным эксцентриситетом $m_x^0 = m_y^0$ при $R_b = 44$ МПа, $R_y = 290$ МПа и $R_y = 420$ МПа. Относительная остаточная несущая способность при $m_x^0 = m_y^0 = 0,25$ составила 0,55...0,65. При $m_x^0 = m_y^0 = 1,5$ – 0,68...0,78. Меньшие значения соответствуют сочетанию бетона с менее прочной стали ($R_b = 44$ МПа, $R_y = 290$ МПа).

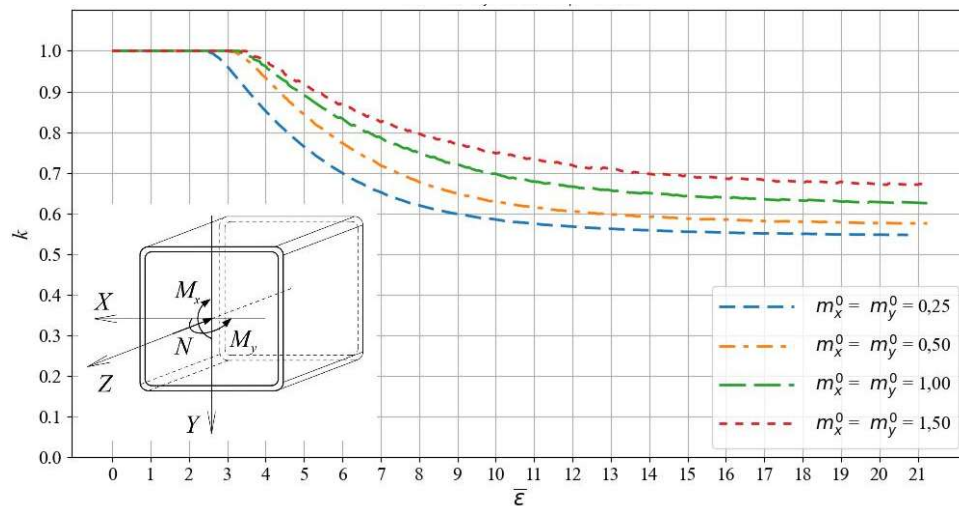


Рисунок 2.22 – График зависимости остаточной прочности от величины максимальной остаточной деформации при $R_b = 44$ МПа, $R_y = 290$ МПа, $t/H = 0,0361$.

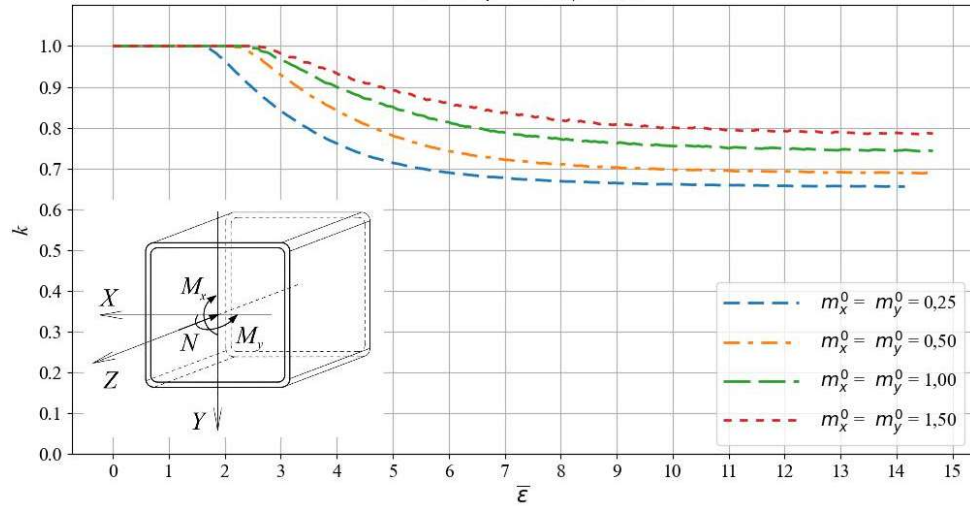


Рисунок 2.23 – График зависимости остаточной прочности от величины максимальной остаточной деформации при $R_b = 44$ МПа, $R_y = 420$ МПа, $t/H = 0,0361$.

При этом вклад бетона в остаточную несущую способность ТБЭ при достижении значений деформаций стали $\varepsilon = 0,025$ составил: при малом относительном эксцентриситете 0,25 от 2,6 до 3,5 %, а при 1,5 – от 10,9 до 13,15% (см. рис. 2.24). Остальную часть остаточной несущей способности берет на себя материал трубы.

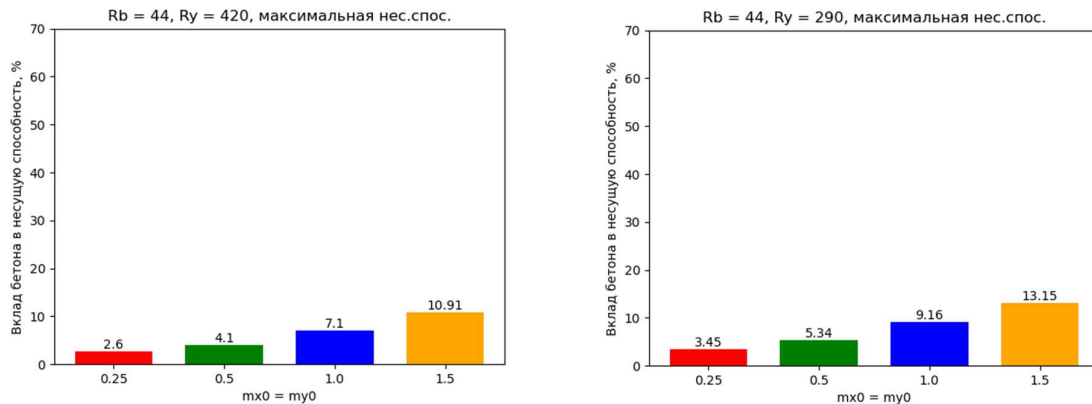


Рисунок 2.24 – Доля вклада бетонной части в несущую способность в запредельном состоянии, %.

Проводя сравнение с предельным состоянием по прочности, доля вклада снизилась в 5...18 раз (рис. 2.25).

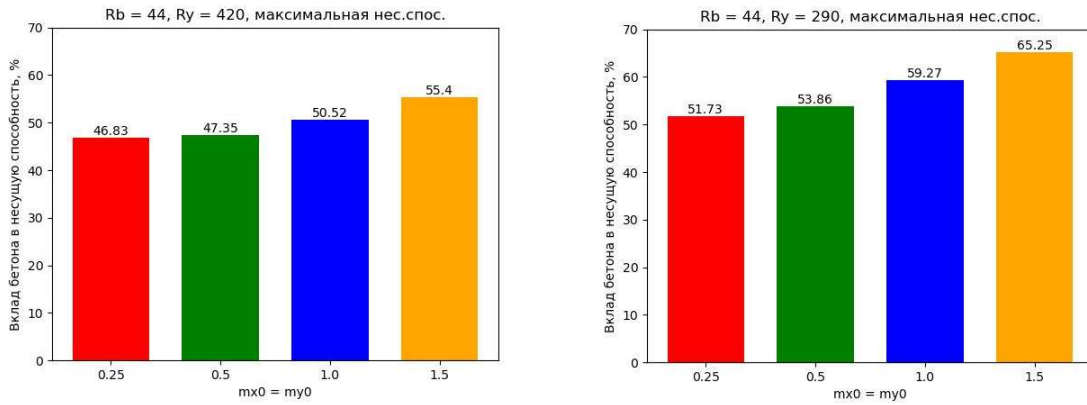


Рисунок 2.25 – Доля вклада бетонной части в несущую способность при обычном расчете на прочность, %

Учет длительного действия нагрузки по диаграмме, приведенной на рис. 2.5, показан на рис. 2.26 и 2.27. Были сопоставлены графики зависимости приведенного к равной площади коэффициента \bar{N} от относительных деформаций. Для расчета были приняты данные при относительной влажности более 75%, соответствующей г. Санкт-Петербургу, и при относительной влажности менее 40% для сравнения. В результате остаточная несущая способность оказалась незначительно подверженной влиянию ползучести, однако, безразмерный параметр \bar{N} , соответствующий прочности ТБЭ, уменьшился на 5-7%, а значение деформации, при котором происходит потеря прочности, увеличилось.

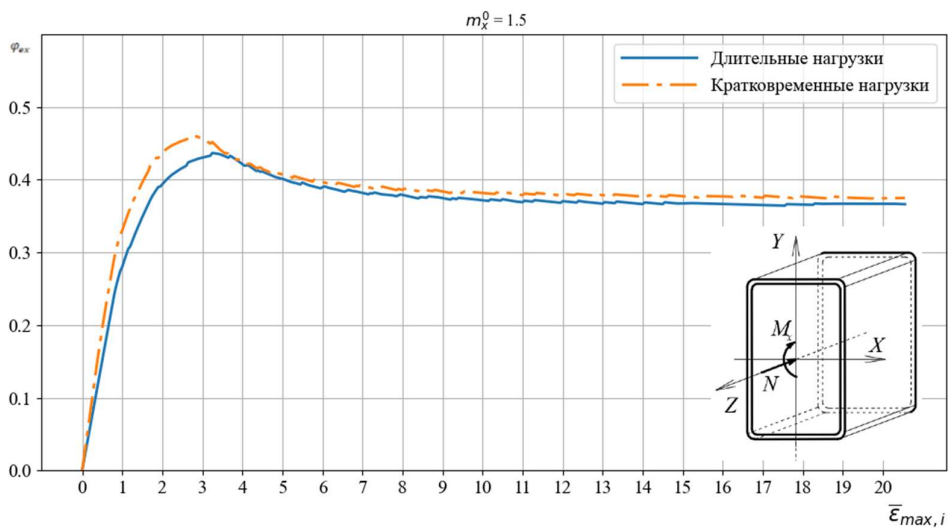


Рисунок 2.26а – Сопоставление графиков остаточной несущей способности в зависимости от относительной деформации при кратковременном и длительном действии нагрузки ($R_y = 290$ МПа, $R_b = 27,5$ МПа, $H/B = 2,0$, относительная влажность >75%)

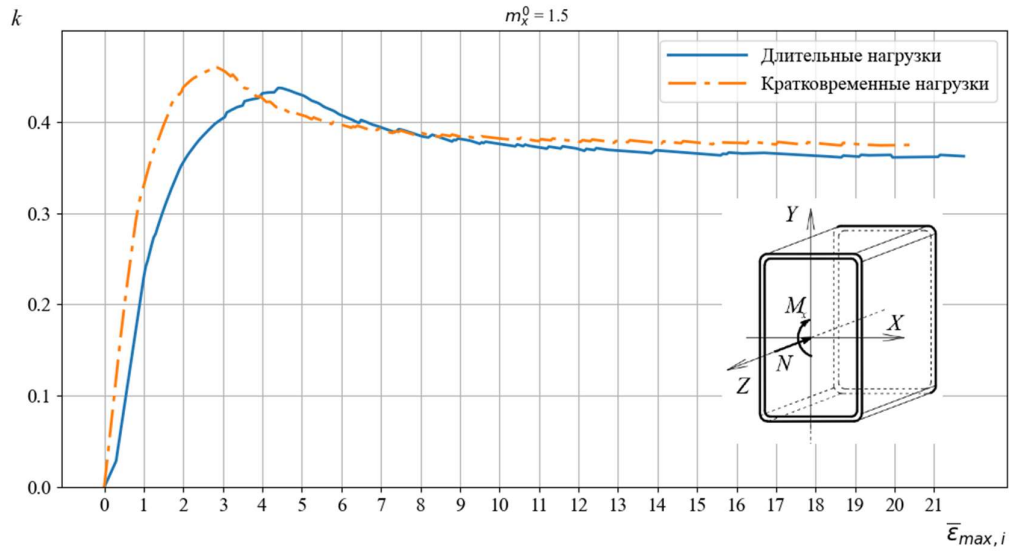


Рисунок 2.26б – Сопоставление графиков остаточной несущей способности в зависимости от относительной деформации при кратковременном и длительном действии нагрузки ($R_y = 290$ МПа, $R_b = 27,5$ МПа, $H/B = 2,0$, относительная влажность $<40\%$)

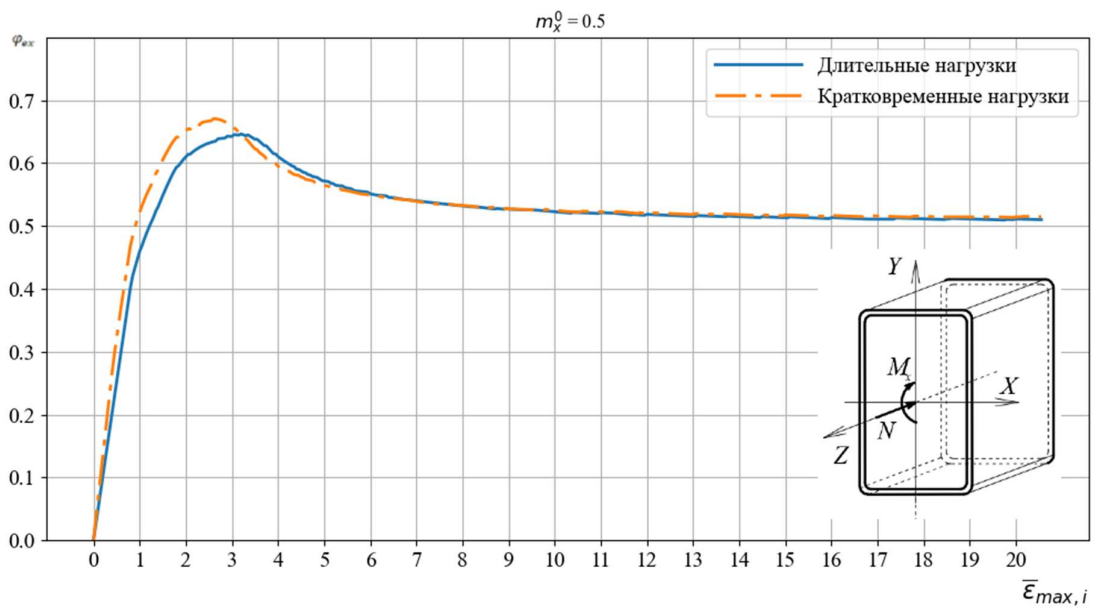


Рисунок 2.27а – Сопоставление графиков остаточной несущей способности в зависимости от относительной деформации при кратковременном и длительном действии нагрузки ($R_y = 330$ МПа, $R_b = 27,5$ МПа, $H/B = 2,0$, относительная влажность $>75\%$)

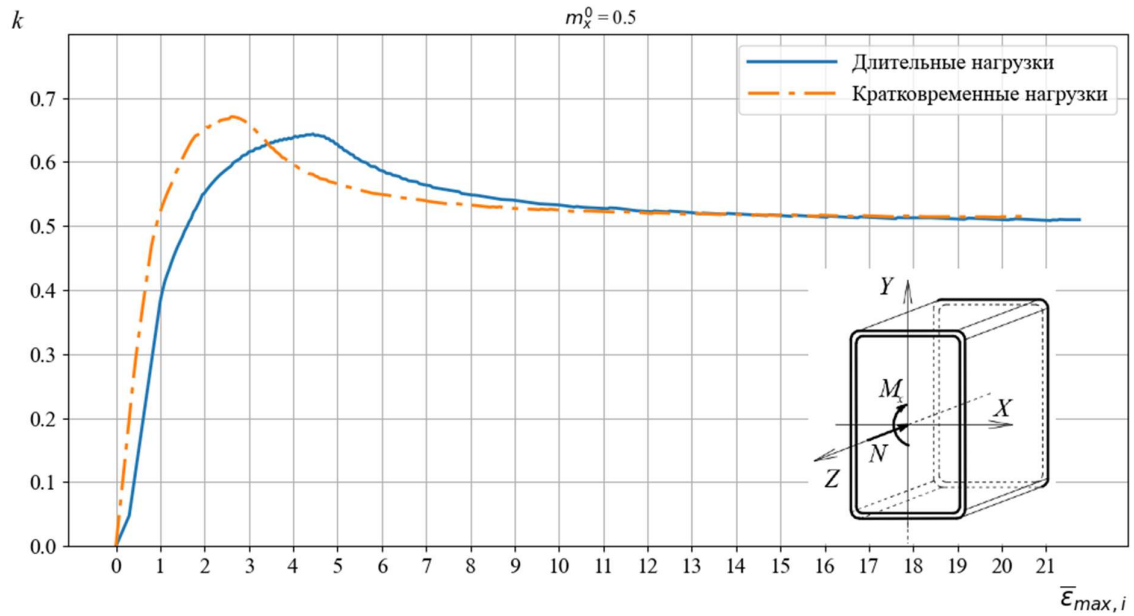


Рисунок 2.276 – Сопоставление графиков остаточной несущей способности в зависимости от относительной деформации при кратковременном и длительном действии нагрузки ($R_y = 330$ МПа, $R_b = 27,5$ МПа, $H/B = 2,0$, относительная влажность $<40\%$)

Таким образом, 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 0,79. Чем большее значение принимает соотношение расчетного сопротивления стали к расчетному сопротивлению бетона R_y/R_b , тем выше значение относительной остаточной несущей способности. Доля вклада в остаточную несущую способность бетона значительно уменьшается в запредельных режимах работы: с 46,83...65,25% до 2,6...13,15%, основную долю усилий воспринимает стальная труба. При учете длительного действия нагрузки максимальное значение предельной нагрузки понижается по сравнению с аналогичным ТБЭ при действии кратковременной нагрузки, но при запредельной работе графики сближаются, так как бетон почти полностью выключается из работы.

2.10 Выводы по главе

1. Обобщение обратного метода расчета по прочности стальных элементов на трубобетонные с приведением характеристик неоднородного сечения к стали трубы позволило сократить количество итерационных процессов и время расчета на несколько порядков по сравнению с другими методами и получить новые данные об остаточной несущей способности ТБЭ.

2. Сравнение с МКЭ результатов расчета по разработанному методу показало хорошую сходимость в пределах от -5,0% до 7,4%, что свидетельствует о достоверности разработанного метода.

3. Получены новые данные о характеристиках остаточной несущей способности после потери прочности ТБЭ с часто используемыми характеристиками при допускаемых СП 385.325800.2018 максимальных относительных деформациях, которая составляет от 22 до 79% от прочности и зависит от геометрических и физических параметров бетона и стали.

4. Влияние ползучести бетона незначительно, снижает остаточную несущую способность в пределах 2-3%.

5. На основании полученного массива данных в главе 5 реализован практический метод расчета трубобетонных конструкций по прочности.

ГЛАВА 3. ПРЕДЕЛЬНЫЕ И ЗАПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО УСТОЙЧИВОСТИ¹

Рассматриваются предельные и запредельные состояния трубобетонных элементов круглого и прямоугольного сечений по устойчивости при сжатии продольной силой с двухосным концевым эксцентриситетом. Решение задачи выполняется обратным численно-аналитическим методом по фактической жесткости, определяемой в наиболее напряженном сечении. С целью проверки достоверности предложенного метода производится сопоставление результатов расчета с МКЭ.

3.1 Постановка задачи, гипотезы и допущения

Решение строится при соблюдении гипотез и допущений, принятых при рассмотрении задачи прочности (см. гл. 2).

Расчет по предельным состояниям по устойчивости трубобетонных элементов конструкций относится к задаче устойчивости второго рода. При этом трубобетонный элемент может терять устойчивость за пределами упругой работы материала в момент нарушения равновесного деформированного состояния. Расчет запредельных состояний требует рассмотрения развитых пластических деформаций в сечениях трубобетонного элемента, регламентируемых СП 385.1325800.2018.

Обратный численно-аналитический метод упрощает расчет при учете физической, как это было сделано в решении задачи прочности (численно), и геометрической нелинейности (аналитически), приводя его к быстроедействию.

3.2 Деформационный расчет сжато-изогнутых трубобетонных элементов, работающих в предельном (устойчивость) и запредельном состояниях

Проводится обобщение обратного численно-аналитического метода [10, 11] на решение деформационных задач ТБЭ. В отличии от СП 266.1325800.2016, где

¹ Результаты данной работы были опубликованы автором в исследовании: 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.

расчет по устойчивости сводится к расчету прочности по деформированной схеме, в настоящем исследовании устойчивость определяется по нарушению равновесия деформированного состояния элемента. При этом в отличие от традиционного решения задачи устойчивости, которое приводится по приращениям нагрузки, в данной работе расчет ведется по приращениям деформированных состояний в наиболее напряженном сечении, что позволяет также вести расчет запредельных состояний [15].

3.2.1 Аналитический метод деформационного расчета трубобетонных элементов при неограниченной упругости

Рассмотрим выделенный из конструкции с помощью расчетной длины (в зависимости от решаемой задачи устойчивости) $l_{ef,x}$ или $l_{ef,y}$ трубобетонный элемент. На рис. 3.1а $l_{ef,x}$ и $l_{ef,y}$ показаны в совмещенном виде общей длиной l . Трубобетонный элемент, принимается, согласно нормам проектирования, шарнирно закрепленным по концам в двух главных плоскостях и нагруженным продольной силой с равными двухосными (при $l_{ef,x} \approx l_{ef,y}$) концевыми эксцентриситетами $e_x^0 = M_y^0/N$, $e_y^0 = M_x^0/N$, вытекающими из соответствующих расчетных комбинаций усилий.

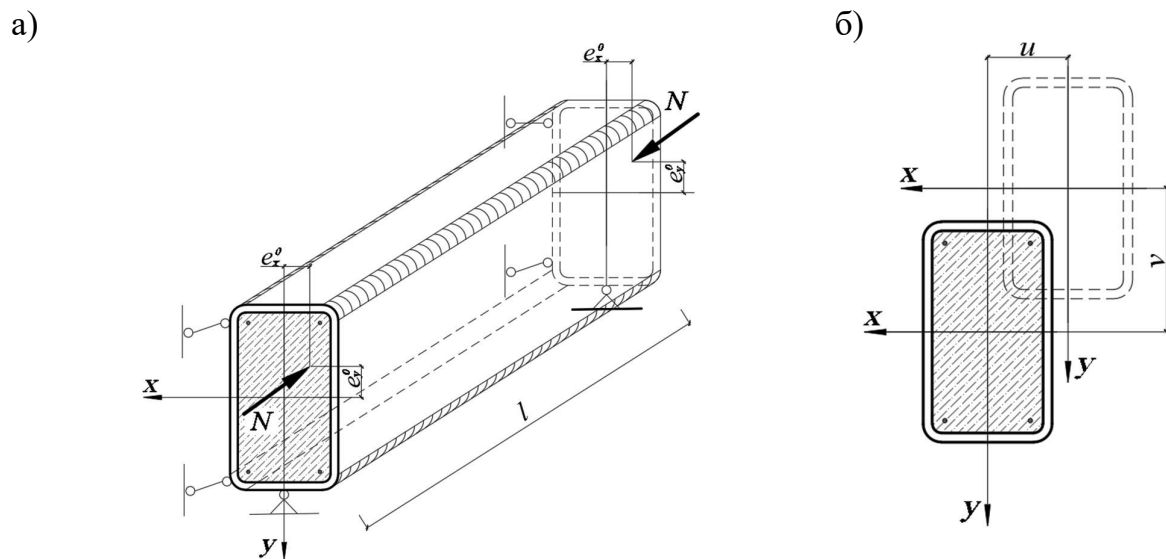


Рис. 3.1 – Расчетная модель стержневого элемента: а – схема нагружения; б – схема деформирования

Тогда деформированное состояние элемента, согласно принятым допущениям, можно определить решением следующих известных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} EI_{x,red}v'' + Nv &= -Ne_y^0 \\ EI_{y,red}u'' + Nu &= -Ne_x^0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.1)$$

где u и v — перемещения сечения в направлении осей x и y соответственно (рис. 3.1 б).

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

$$v(z) = v_0(z) \left(1 - \frac{N}{N_{cr,x}}\right)^{-1}; \quad u(z) = u_0(z) \left(1 - \frac{N}{N_{cr,y}}\right)^{-1}, \quad (3.2)$$

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.

Эти решения для принятых «нормативных» схем закружения стержней, как известно, обладают высокой точностью. Воспользуемся ими и представим деформационные усилия в наиболее напряженном сечении стержня [8]:

$$M_x = Ne_y^0 K_{d,x}; \quad M_y = Ne_x^0 K_{d,y}, \quad (3.3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} K_{d,x} &= 1 + \frac{\Phi_{ex} \bar{\lambda}_x^2}{8} \left(1 - \frac{\Phi_{ex} \bar{\lambda}_x^2}{\pi^2}\right)^{-1} \\ K_{d,y} &= 1 + \frac{\Phi_{ey} \bar{\lambda}_y^2}{8} \left(1 - \frac{\Phi_{ey} \bar{\lambda}_y^2}{\pi^2}\right)^{-1} \end{aligned} \right\}; \quad (3.4)$$

$K_{d,x}$, $K_{d,y}$ — деформационные коэффициенты, учитывающие влияние перемещений на соответствующие моменты M_x и M_y ; $\varphi = N/R_s A_{red}$;

$$\bar{\lambda}_x = \frac{l_{ef,x}}{i_x} \sqrt{\frac{R_s}{E_s}}; \quad \bar{\lambda}_y = \frac{l_{ef,y}}{i_y} \sqrt{\frac{R_s}{E_s}} \quad \text{— условные гибкости стержня.}$$

Имея (3.3), 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 :

$$\bar{\sigma}_{\max}(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi_{exy} (1 + m_x^0 \bar{y} K_{d,y} + m_y^0 \bar{x} K_{d,x}), \quad (3.5)$$

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 [15].

3.2.2 Обратный деформационный расчет трубобетонных элементов при заданных деформациях наиболее напряженного волокна

Расчет будем вести, как это уже упоминалось в [15], по приращению деформированных состояний в наиболее нагруженном сечении по максимальной деформации наиболее напряженного волокна с $\bar{\varepsilon}_{\max,i} = \varepsilon_{\max,i} E_s / R_s$ ($R_{\text{пц}} / R_s \leq \bar{\varepsilon}_{\max,i} \leq 0,025 E_s / R_s$) с координатами x_* и y_* .

Следуя расчету на прочность (см. п. 2.4), 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:

$$\bar{\sigma}_i^*(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{\varepsilon}_i^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi_{exy,i}^* (1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x}), \quad (3.8)$$

$$\text{где } \varphi_{exy,i}^* = \bar{\varepsilon}_{max,i} (1 + m_x^* + m_y^*)^{-1}, \quad (3.9)$$

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

Используя (3.8), с помощью алгоритма «Сечение» (см. (2.28)–(2.29) 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:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{exy,i} &= \varphi_{exy,i}^* \left(\bar{A}_{ef} - m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_x - m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_y \right) \\ m_{x,i} &= \frac{\varphi_{exy,i}^*}{\varphi_{exy,i}} \left(-\bar{S}_x + m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{J}_{x,ef} - m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{J}_{xy,ef} \right) \\ m_{y,i} &= \frac{\varphi_{exy,i}^*}{\varphi_{exy,i}} \left(-\bar{S}_y - m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{J}_{xy,ef} + m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{J}_{y,ef} \right) \end{aligned} \right\}; \quad (3.10)$$

где \bar{A}_{ef} , \bar{S}_x , \bar{S}_y , $\bar{J}_{x,ef}$, $\bar{J}_{y,ef}$, $\bar{J}_{xy,ef}$ определяются по (2.26) при заданных значениях $\bar{\varepsilon}_{max,i}$.

При этом параметры фиктивных усилий устанавливаются:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{exy,\phi,i} &= \varphi_{exy,i}^* \left(1 - \bar{A}_{ef} + m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_x + m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_y \right) \\ m_{x,\phi,i} &= \frac{\varphi_{exy,i}^*}{\varphi_{exy,i}} \left(\bar{S}_x + m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{J}_{x,\phi} + m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{J}_{xy,ef} \right) \\ m_{y,\phi,i} &= \frac{\varphi_{exy,i}^*}{\varphi_{exy,i}} \left(\bar{S}_y + m_{x,i}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{J}_{xy,ef} + m_{y,i}^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{J}_{y,\phi} \right) \end{aligned} \right\}; \quad (3.11)$$

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

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. Следуя методу [10], 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 $\varphi_{exy,i}$ и $\varphi_{exy,\phi,i}$:

$$\bar{\sigma}(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi_{exy,i} \left(1 + m_{x,i}^0 \bar{y} \cdot K_{d,x,i}^{pp} + m_{y,i}^0 \bar{x} \cdot K_{d,y,i}^{pp} \right) + \varphi_{exy,\phi,i} \left(1 + m_{x,\phi,i}^0 \bar{y} \cdot K_{d,x,i}^{pp} + m_{y,\phi,i}^0 \bar{x} \cdot K_{d,y,i}^{pp} \right), \quad (3.12)$$

где по (3.4)

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

В (3.12) неизвестными являются концевые относительные эксцентриситеты $m_{x,i}^0$ и $m_{y,i}^0$, которые можно получить при сопоставлении (3.12) и (3.8):

— при $\bar{x} = 0$; $\bar{y} = 1$.

$$\varphi_{exy,i} \left(1 + m_{x,i}^0 K_{d,x,i}^{pp} \right) + \varphi_{exy,\phi,i} \left(1 + m_{x,\phi,i}^0 K_{d,x,i}^{pp} \right) = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i} (1 + m_x^*)}{1 + m_x^* + m_y^*} \quad (3.13)$$

— при $\bar{x} = 1$; $\bar{y} = 0$:

$$\varphi_{exy,i}(1 + m_{y,i}^0 K_{d,y,i}^{np}) + \varphi_{exy,\phi,i}(1 + m_{y,\phi,i}^0 K_{d,y,i}^{np}) = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i}(1 + m_y^*)}{1 + m_x^* + m_y^*} \quad (3.14)$$

тогда:

$$m_{x,i}^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i}(1+m_x^*)}{(1+m_x^*+m_y^*)\varphi_{exy,i}K_{d,x,i}^{np}} - \left[\frac{\varphi_{exy,\phi,i}}{\varphi_{exy,i}} \left(\frac{1}{K_{d,x,i}^{np}} + m_{x,\phi,i}^0 \right) + \frac{1}{K_{d,x,i}^{np}} \right]; \quad (3.15)$$

$$m_{y,i}^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i}(1+m_y^*)}{(1+m_x^*+m_y^*)\varphi_{exy,i}K_{d,y,i}^{np}} - \left[\frac{\varphi_{exy,\phi,i}}{\varphi_{exy,i}} \left(\frac{1}{K_{d,y,i}^{np}} + m_{y,\phi,i}^0 \right) + \frac{1}{K_{d,y,i}^{np}} \right]; \quad (3.16)$$

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

$$m_{x,i}^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i}}{\varphi_{ex,i}K_{d,x,i}} - \left[\frac{\varphi_{ex,\phi,i}}{\varphi_{ex,i}} \left(\frac{1}{K_{d,x,i}} + m_{x,\phi,i}^0 \right) + \frac{1}{K_{d,x,i}} \right], \quad (3.17)$$

$$\text{где } \varphi_{ex,i} = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i}}{1+m_x^*} (\bar{A}_{ef,i} - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_{x,i}); \quad \varphi_{ex,\phi,i} = \frac{\bar{\varepsilon}_{max,i}}{1+m_x^*} \varphi_{ex,i};$$

$$m_{x,\phi,i} = \frac{\bar{S}_x + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{J}_{x,\phi,i}^2}{1 - \bar{A}_{ef,i} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_{x,i}}.$$

Таким образом, по i -му упругому деформированному состоянию $\bar{\varepsilon}_{max,i} = \bar{\varepsilon}_{nu} + \Delta \bar{\varepsilon} \cdot i$ ($i=1, \dots, n$, где $n = (0,025E_s/R_s - \bar{\varepsilon}_{nu})/\Delta \bar{\varepsilon}$), определяемому по заданным деформационным относительным двухосным эксцентриситетам m_x^* , m_y^* , обратным численно-аналитическим методом расчета [10, 11] можно определить относительные параметры фактического нагружения трубобетонного элемента на его опорах: $\varphi_{exy,i}$, $m_{x,i}^0$, $m_{y,i}^0$ [15].

Зависимость общего параметра нагружения φ_{exy} от всего диапазона допредельных, предельных и запредельных состояний, характеризующихся по мере роста $\bar{\varepsilon}_{max,i}$, показано на рис. 3.2. Вершина графика соответствует

нарушению равновесного деформированного состояния (потеря устойчивости), за которой следует нисходящая кривая, свидетельствующая об остаточной несущей способности в зависимости от $\bar{\varepsilon}_{max,i}$. Рассматривая ряд предельных состояний ($\bar{\varepsilon}_{max,i}$, $i = 1, 2, \dots, n$), при пространственной форме деформирования с удержанием относительных эксцентриситетов $m_{x,i}^0, m_{y,i}^0$ постоянными, определяем наибольший параметр общего нагружения $\varphi_{ex,max}$, который соответствует коэффициенту потери устойчивости (см. вершину графика на рис. 3.2). Для ускорения расчета деформационные относительные эксцентриситеты m_x^*, m_y^* задаются диапазоном, а поиск по нему осуществляется методом деления отрезка пополам.

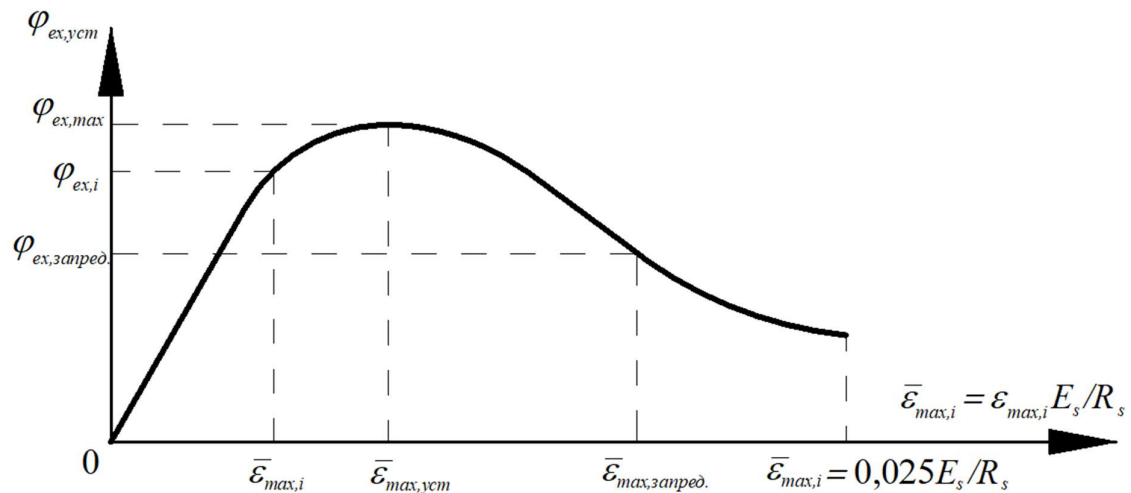


Рисунок 3.2 – Зависимость коэффициента продольной силы от максимальной относительной деформации

3.3 Алгоритм решения обратной задачи устойчивости

Ход решения задачи устойчивости трубобетонного элемента заключается в поиске значений концевых относительных эксцентриситетов $m_{x,i}^0$ и $m_{y,i}^0$ продольной силы с параметром $\varphi_{exy,i}$, по заданному деформированному состоянию.

1. Определяются геометрические характеристики сечения элемента и физические характеристики материалов.

2. Вычисляются приведенные к стали характеристики сечения трубобетонного стержня.

3. Бетонная и стальная части трубы разбиваются на малые площадки, вычисляются их координаты, начальные напряжения и деформации (при необходимости), начальные модули деформации.

4. Характеристики малых площадок приводятся к безразмерным параметрам.

4. Задается диапазон возможных деформационных относительных эксцентриситетов m_x^* ; m_y^* , таким образом, чтобы настоящее значение относительного деформационного эксцентриситета попало в данный диапазон. При этом заметим, что зависимость $m_x^0(m_x^*)$ и $m_y^0(m_y^*)$ являются непрерывно возрастающими функциями. Это позволяет использовать метод дихотомии для подбора таких m_x^* и m_y^* , которым соответствуют искомые m_x^0 и m_y^0 и значение $\varphi_{exy,i}$.

5. Значения относительных деформаций $\bar{\varepsilon}_{max,i} = \bar{\varepsilon}_{nc} + \Delta\bar{\varepsilon} \cdot i$ ($i=1, \dots, n$, где $n = (0,025/R_s - \bar{\varepsilon}_{nc})/\Delta\bar{\varepsilon}$) в зависимости от гибкости элемента задаются последовательно от меньшего к большему значению, при каждом из которых удерживаются значения относительных концевых эксцентриситетов $m_{x,i}^0, m_{y,i}^0$ и вычисляется $\varphi_{exy,i}$.

6. При заданных значениях m_x^* и m_y^* , а также $\bar{\varepsilon}_{max,i}$, получим концевые эксцентриситеты $m_{x,i}^0$ и $m_{y,i}^0$, которые сравниваются с m_x^0 и m_y^0 . При их равенстве решение $\varphi_{exy,i}$ для данного значения $\bar{\varepsilon}_{max,i}$ считается найденным. В этом случае полученное значение $\varphi_{exy,i}$ фиксируется.

7. При рассмотрении значений диапазона $\bar{\varepsilon}_{max,i}$, $\varphi_{exy,i}$ возрастает, а затем начинает уменьшаться. Максимальный $\varphi_{exy,i}$ соответствует решению задачи устойчивости.

На рис. 3.3 показана блок-схема алгоритма решения п.п.1-7.

Для автоматизации расчетов была разработана программа на языке *Python* (код программы представлен в прил. 1), которая была зарегистрирована в Роспатенте 18.07.2022 за №2022663635 (см. прил. 2).

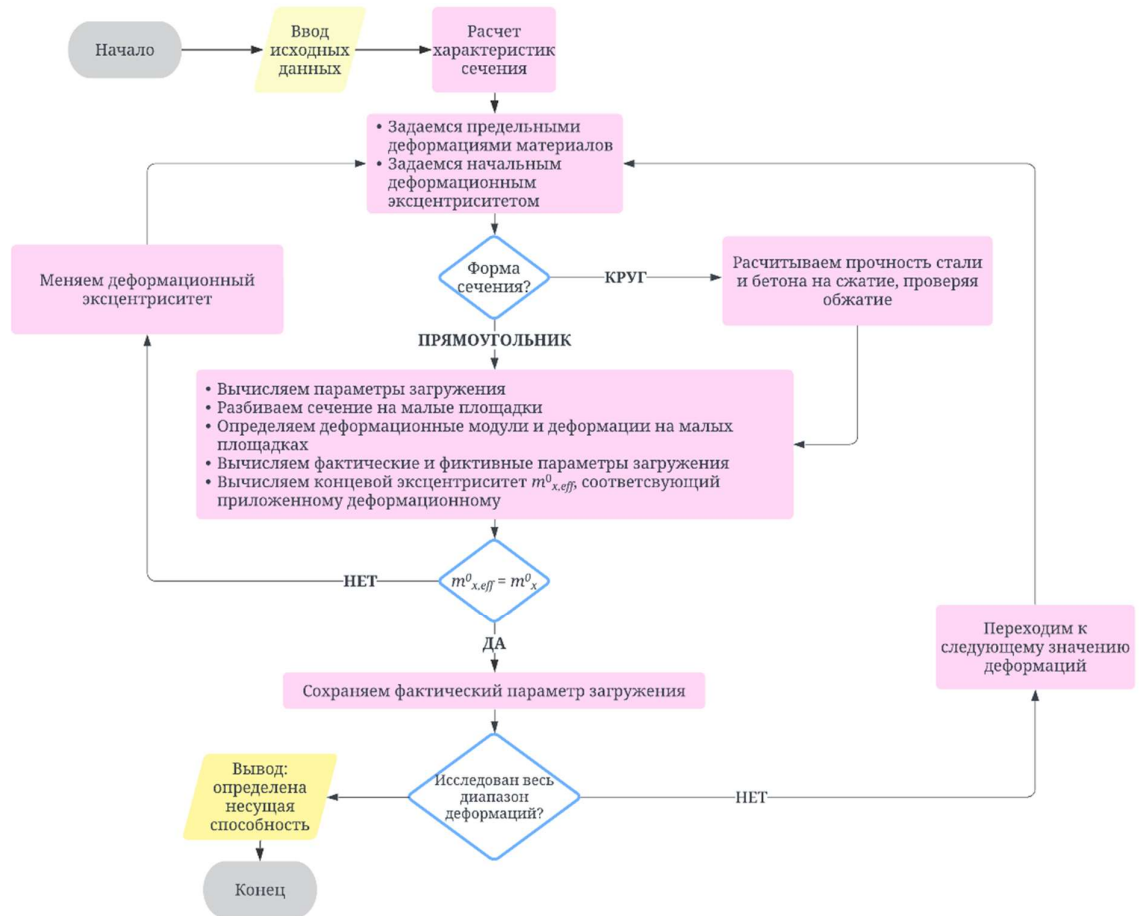


Рисунок 3.3 – Алгоритм расчета несущей способности трубобетонного стержня при сжатии с концевым эксцентриситетом m_x^0

3.4 Влияние начальных напряжений и упрочнения в стальной части трубобетонного элемента на устойчивость

В гл. 2.6 рассмотрено влияние начальных напряжений и упрочнения зонгиба в сечениях гнуто-сварных труб трубобетонных элементов. Аналогично рассматривается влияние данных эффектов на устойчивость ТБЭ.

Значение относительной толщины трубы приняты согласно СП 266 в диапазоне от 0,0064 до 0,046, из которого выбрано 5 характерных значений с

равными промежутками между ними (0,0064; 0,0163; 0,0262; 0,0361; 0,046). Рассмотрена устойчивость при различных сочетаниях стали и бетона по прочности, при соотношении $H/B = 1,0$.

На рис. 3.4 приводится зависимость процента понижения фактического параметра загрузки в зависимости от различной относительной толщины трубы. С ростом толщины стенки влияние начальных напряжений и деформаций становится значительнее: при $t/H = 0,0064$ несущая способность понижается на 0,86-1,06%, а при $t/H = 0,046$ – на 5,42...12,79%. Были рассмотрены стержни разных гибкостей, например, при гибкости $\bar{\lambda} = 3,0$ и $t/H = 0,0361$ несущая способность снижается на 4,87%, а при гибкости $\bar{\lambda} = 4,5$ и $t/H = 0,0361$ на 7,29%.

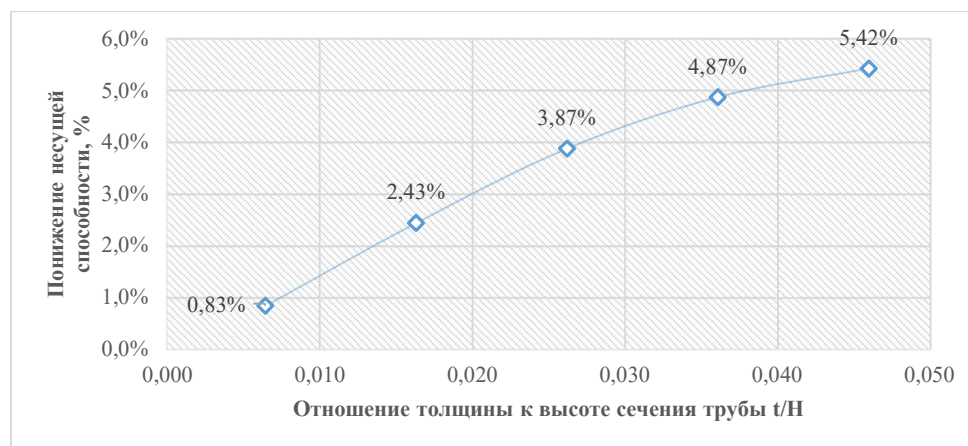


Рисунок 3.4 – Зависимость % понижения фактического параметра загрузки при различной относительной толщине трубы в зависимости при гибкости трубобетонного стержня $\bar{\lambda} = 3,0$

Таким образом, при большей толщине стенки и большей гибкости влияние начальных напряжений и упрочнения зон гибов может оказать влияние на понижение несущей способности. Следует учитывать этот эффект при расчете на устойчивость гибких стержней с толстой стенкой.

3.5 Сопоставление результатов метода конечных элементов и обратного метода при расчете на устойчивость

Численное моделирование задачи устойчивости проводится на основании данных, приведенных в гл. 2, п. 2.6 и табл. 2.16. На рис. 3.3, 3.4 приведены КЭ модели трубобетонных элементов прямоугольного и круглого сечений.

Данные, полученные в результате сопоставления приведены в табл. 3.1 – 3.3. Сопоставление приводится для

а) трубобетонных элементов круглого сечения при загрузении сжимающей силой с равными концевыми одноосными эксцентриситетами (табл. 3.1);

б) трубобетонных элементов прямоугольного сечения при загрузении сжимающей силой с равными концевыми одноосными эксцентриситетами (табл. 3.2);

в) трубобетонных элементов прямоугольного сечения при загрузении сжимающей силой с равными концевыми двухосными эксцентриситетами (табл. 3.6);

На рис. 3.5, 3.6а и 3.6б показаны результаты расчета трубобетонного элемента №1 из табл. 3.1. Прочность бетона на сжатие $R_b = 25,2$ МПа, сопротивление стали $R_y = 236,9$ МПа с учетом п. 4 гл. 2. В КЭ модели значения напряжений достигли в наиболее напряженном сечении $-23,0$ МПа и $-239,0$ МПа соответственно. Расхождение между теоретическими значениями и расчетными составило $8,7\%$ и $-0,8\%$ соответственно.

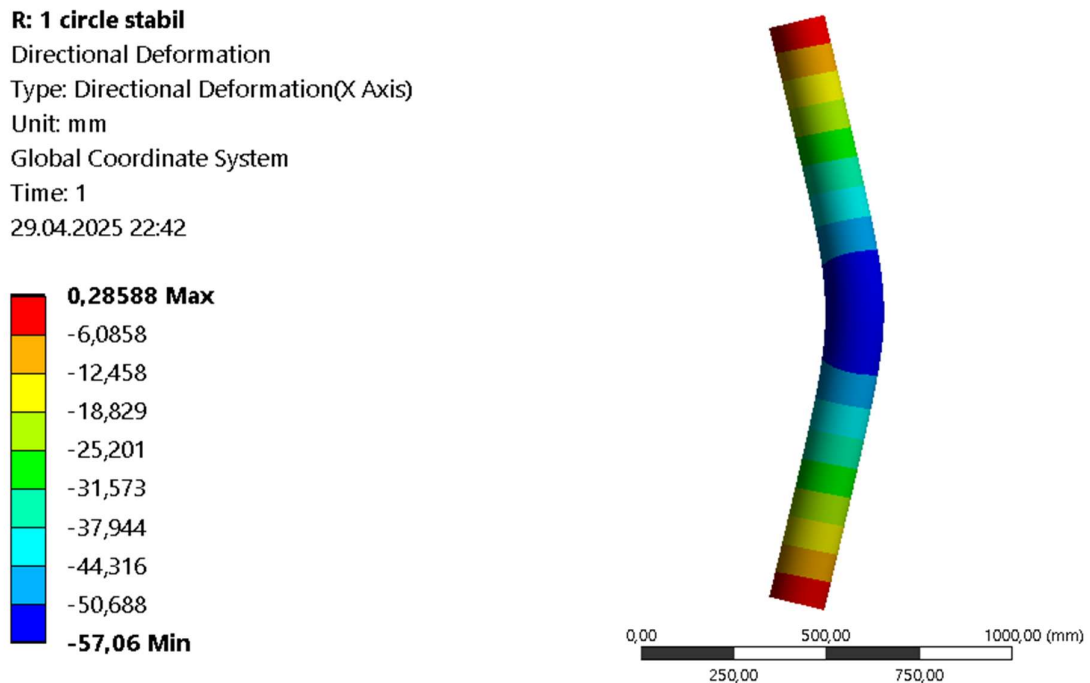


Рисунок 3.5 – Деформированная схема элемента №1 из табл. 3.1

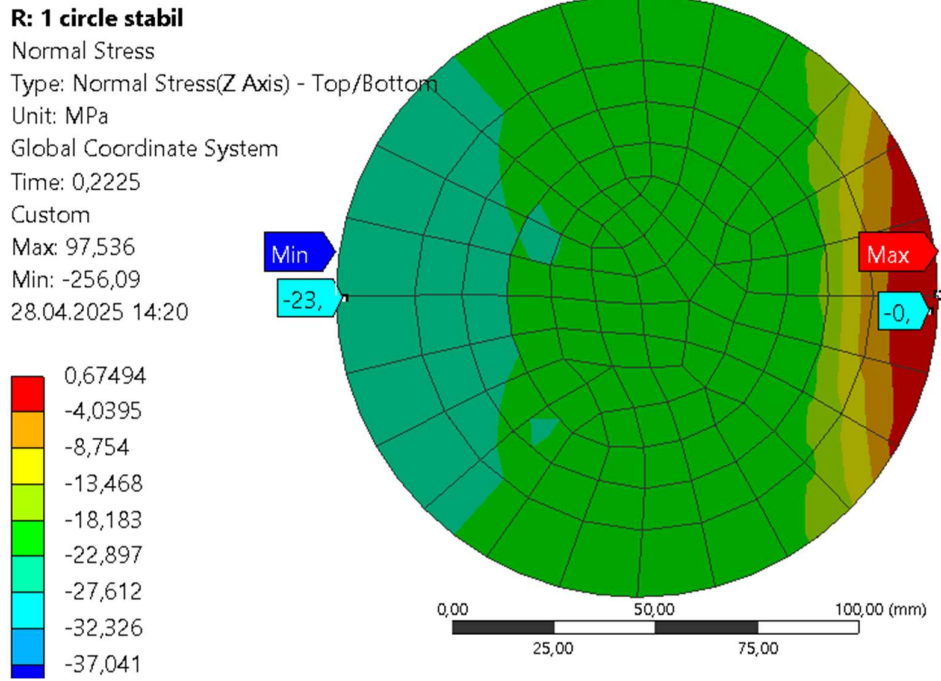


Рисунок 3.6а – Распределение напряжений в бетонной части стержня №1 из табл. 3.1 (среднее сечение)

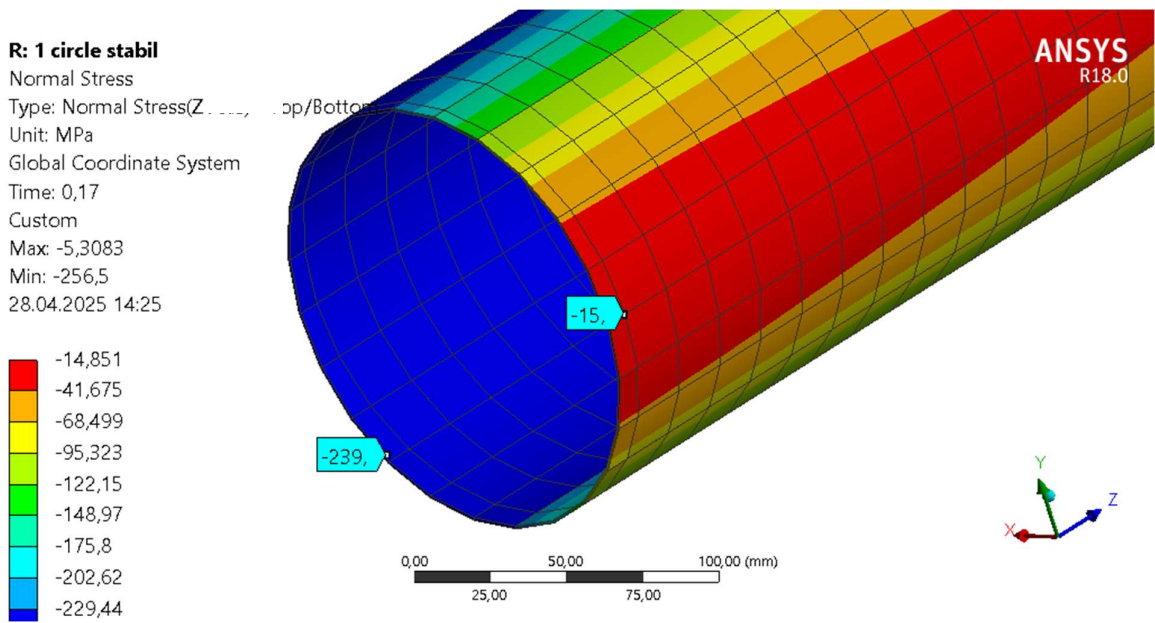


Рисунок 3.6б – Распределение напряжений в стальной части стержня №1 из табл. 3.1 (среднее сечение)

Таблица 3.1 – Сопоставление результатов расчетов обратным методом с результатами расчета в ANSYS (круглые сечения)

№	R_y , МПа	R_b , МПа	t/D_p	m_{x0}	$\bar{\lambda}$	$N_{обр}$, кН	N_{ansys} , кН	%
1	290	19,5	0,0064	0,25	1,5	399,6	419,3	4,69%
2	560	19,5	0,046	0,5	3	1058,0	1192,52	11,28%
3	290	27,5	0,0064	0,25	4,5	226,5	250	9,39%
4	290	37	0,0163	2	1,5	378,5	347,9	-8,80%
5	330	37	0,0163	1	3	398,3	395,5	-0,70%
6	650	37	0,0163	1,75	4,5	350,1	375,6	6,80%
7	330	37	0,046	0,5	1,5	1126,1	1152,2	2,27%
8	650	44	0,0064	0,75	3	554,8	621	10,66%
9	420	44	0,0262	0,5	4,5	523,9	537,2	2,47%
10	420	44	0,0262	1	1,5	830,2	890,2	6,74%

Сопоставление результатов расчета обратным методом с результатами расчета по НДМ на прочность для трубобетонных элементов круглого сечения при загрузении сжимающей силой с одноосным эксцентриситетом показывает хорошую сходимость в пределах от -8,8 до 11,28 %.

На рис. 3.7-3.9 показаны результаты расчета трубобетонного элемента №9 из табл. 3.3. Прочность бетона на сжатие $R_b = 44$ МПа, сопротивление стали $R_y = 420$ МПа согласно п. 4 гл. 2. В КЭ модели значения напряжений достигли в наиболее напряженном сечении 46,1 МПа и 413 МПа соответственно. Расхождение между теоретическими значениями и расчетными составило -4,7% и 1,7 % соответственно.

O: 9 stabil 3d

Directional Deformation

Type: Directional Deformation(X Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 1

Max: 0,16582

Min: -73,808

29.04.2025 2:28

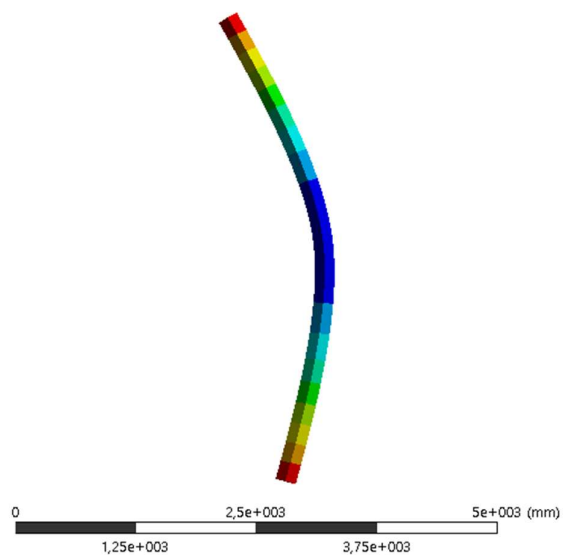
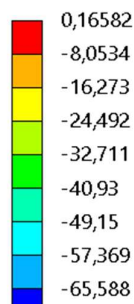


Рисунок 3.7 – Деформированная схема элемента №9 из табл. 3.3

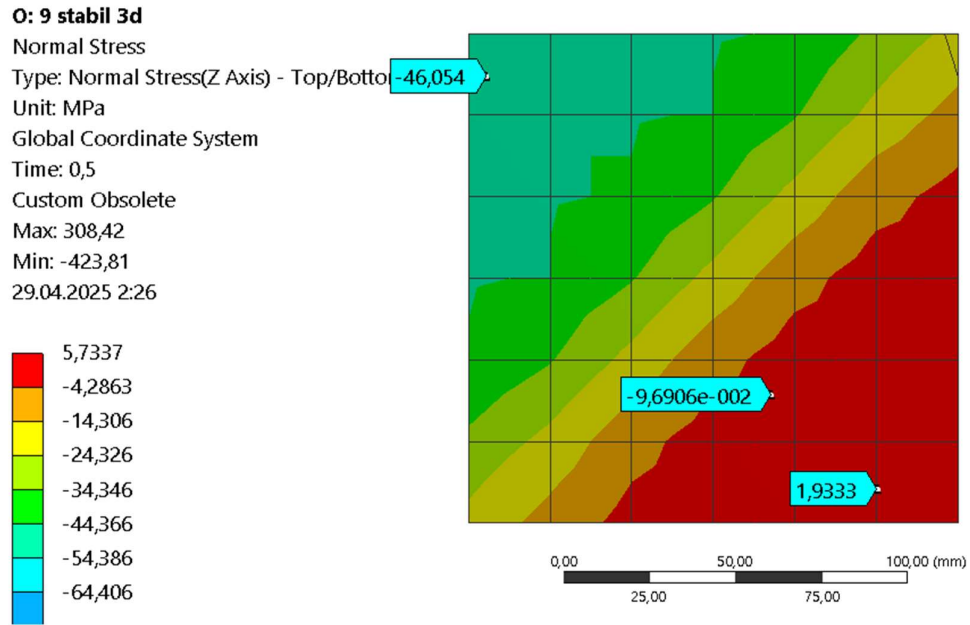


Рисунок 3.8 – Распределение напряжений в бетонной части стержня №9 из табл. 3.3 (среднее сечение)

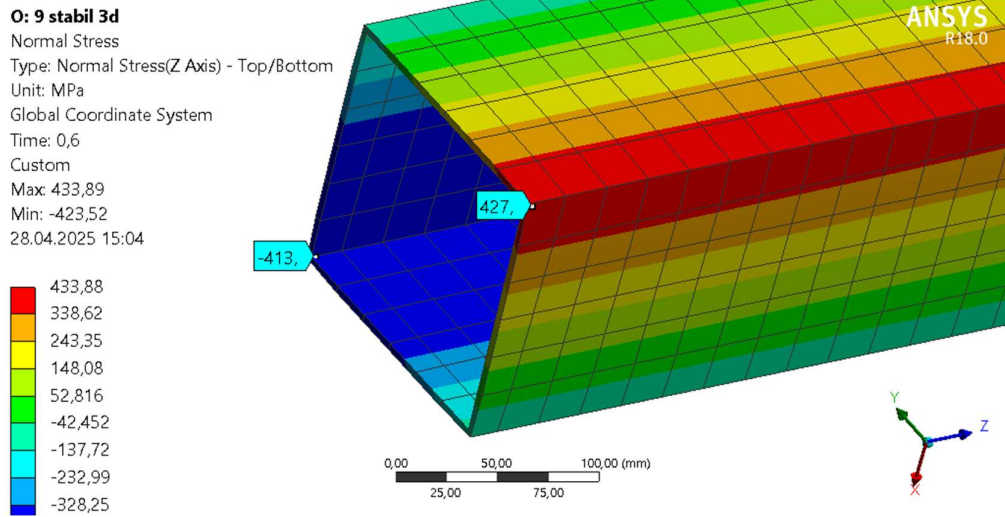


Рисунок 3.9 – Распределение напряжений в бетонной части стержня №9 из табл. 3.3 (среднее сечение)

Таблица 3.2 – Сопоставление результатов расчетов обратным методом с результатами расчета в ANSYS (прямоугольные сечения)

№	R_y , МПа	R_b , МПа	t/D_p	m_{x0}	H/B	$\bar{\lambda}$	$N_{обр}$, кН	N_{ansys} , кН	%
1	290	19,5	0,046	0,25	1,5	1,5	2030,2	2105,00	3,6%
2	290	27,5	0,0064	0,25	1	3	422,2	413,20	-2,2%
3	330	37	0,046	0,5	1,75	4,5	1373,6	1243,50	-10,5%
4	330	44	0,0064	0,75	2	1,5	1547,5	1523,40	-1,6%
5	420	44	0,0262	0,5	1	3	976,1	955,60	-2,1%
6	420	37	0,046	1,75	1,25	4,5	718,5	753,00	4,6%
7	560	37	0,0064	0,25	1	1,5	928,0	1007,00	7,8%
8	560	19,5	0,0361	0,75	1,5	3	1873,8	2112,10	11,3%
9	560	44	0,0361	1	1,75	4,5	1601,1	1662,60	3,7%
10	650	44	0,0262	0,75	1,5	1,5	2592,1	2587,10	-0,2%

Сопоставление результатов расчета обратным методом с результатами расчета по НДМ на прочность для трубобетонных элементов круглого сечения при загрузении сжимающей силой с одноосным эксцентриситетом показывает хорошую сходимость в пределах от -10,5 % до 11,3%.

Таблица 3.3 – Сопоставление результатов расчетов обратным методом с результатами расчета в ANSYS (квадратные сечения, двухосный эксцентриситет)

№	R_y , МПа	R_b , МПа	t/D_p	m_{x0}	m_{y0}	$\bar{\lambda}$	$N_{обр}$, кН	N_{ansys} , кН	%
1	290	19,5	0,0064	0,25	1	1,5	449,4	483,4	-7,6%
2	290	19,5	0,046	0,25	1,5	3,0	1328,4	1407,1	-5,9%
3	290	27,5	0,0064	0,25	1	4,5	382,1	368,8	3,5%
4	290	37,5	0,0163	2	2	1,5	741,4	786,2	-6,0%
5	330	37,5	0,0163	1	1,25	3,0	405,1	387,1	4,4%
6	330	37,5	0,0163	1,75	1,25	4,5	221,8	228	-2,8%
7	330	37,5	0,046	0,5	1,75	1,5	1725,3	1840,4	-6,7%
8	330	44	0,0064	0,75	2	3,0	573,1	612,9	-6,9%
9	420	44	0,0262	0,5	1	4,5	604,2	637,7	-5,5%
10	420	44	0,0262	1	1	1,5	869,9	923,9	-6,2%

Сопоставление результатов расчета обратным методом с результатами расчета по НДМ на прочность для трубобетонных элементов круглого сечения при загрузении сжимающей силой с двухосным эксцентриситетом показывает хорошую сходимость в пределах -7,6% до 3,5 %.

Как следует из данных табл. 3.1-3.3, между результатами расчета обратным методом и МКЭ на прочность наблюдается удовлетворительная сходимость (-10,5...11,3%). КЭ модель достаточно точно соответствует численно-аналитическому обратному методу.

3.6 Запредельная работа гибких трубобетонных элементов

На рис. 3.3 – 3.8 показана запредельная работа гибких трубобетонных элементов, рассчитанных на устойчивость при сжатии с двухосным и одноосным эксцентриситетом. Относительные концевые эксцентриситеты приняты равными. Значения $m_{x0} = m_{y0} = 0,25; 0,5; 1,0; 1,5$. Принятые гибкости равны 1,5; 3,0 и 4,5. Прочность бетона $R_b = 27,5$ МПа и 44 МПа, предел текучести стали 290 МПа и 420 МПа. Соотношение сторон прямоугольной трубы $H/B = 1$. Относительная толщина стенки трубы $t/D_p = 0,0361$. Рассматриваются прямоугольное и круглое сечение труб. Данные собраны в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры для исследования запредельной работы трубобетонных элементов.

Относительный эксцентриситет, m_x^0	0,25; 0,5; 1,0; 1,5
Предел текучести стали, R_y	290; 420
Предел прочности бетона, R_b	27,5; 44
Отношение толщины трубы к диаметру (высоте сечения H), t/D_p	0,0361
Соотношение высоты сечения к ширине H/B (для прямоугольных сечений при равных двухосных эксцентриситетах $m_x^0 = m_y^0$)	1,0
Соотношение высоты сечения к ширине H/B (для прямоугольных сечений при загрузении с одноосным эксцентриситетом)	2,0
Относительная гибкость	1,5; 3,0; 4,5

Круглое сечение

На рис. 3.10 – 3.12 показаны графики остаточной несущей способности для трубобетонных элементов круглого сечения при загрузении продольной сжимающей силой с одноосным эксцентриситетом.

При $m_x^0 = 0,25$ относительная прочность составила 0,18...0,5, при $m_x^0 = 1,5$ относительная прочность составила 0,29...0,53. Меньшее значение остаточной несущей способности соответствует большей гибкости.

Заметим, что при малых эксцентриситетах на рис. 3.4 график падает в начале менее стремительно. Предполагается, что это связано с объемной работой бетона, и, соответственно, изменением диаграммы деформирования бетона в расчете.

При большой гибкости (4,5) решение в запредельном состоянии может начать расходиться, так как компенсирующий относительный эксцентриситет становится значительным.

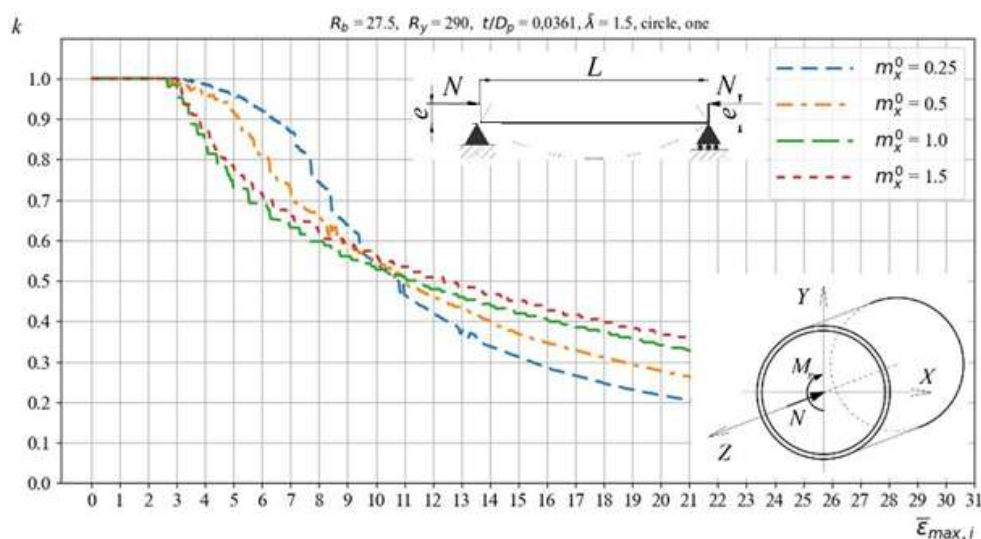


Рисунок 3.10 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с двухосным эксцентриситетом при

$R_b = 27,5$ МПа, $R_y = 290$ МПа, гибкость 1,5.

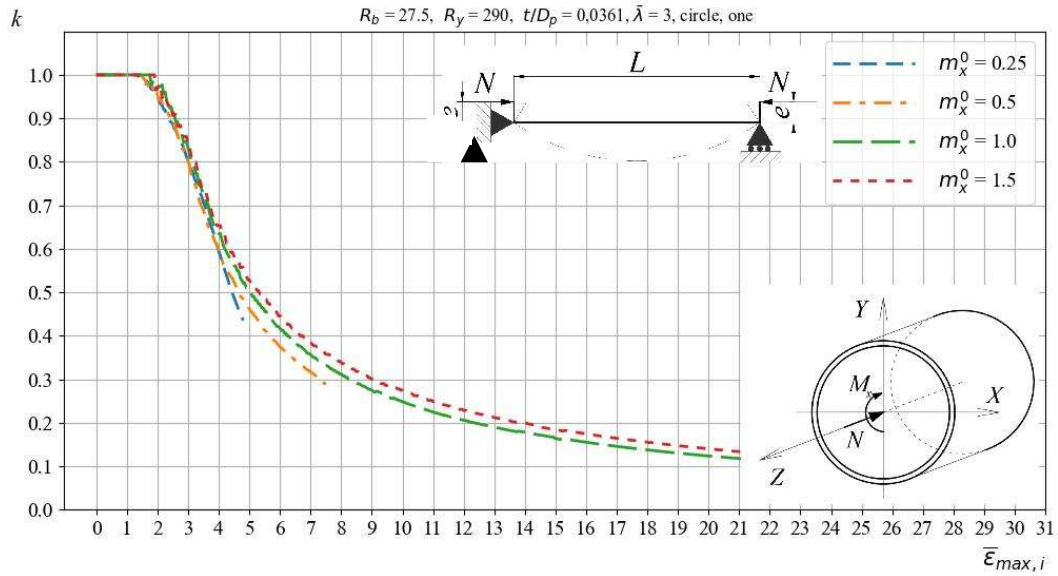


Рисунок 3.11 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с двухосным эксцентриситетом при $R_b = 27,5$ МПа, $R_y = 290$ МПа, гибкость 3,0.

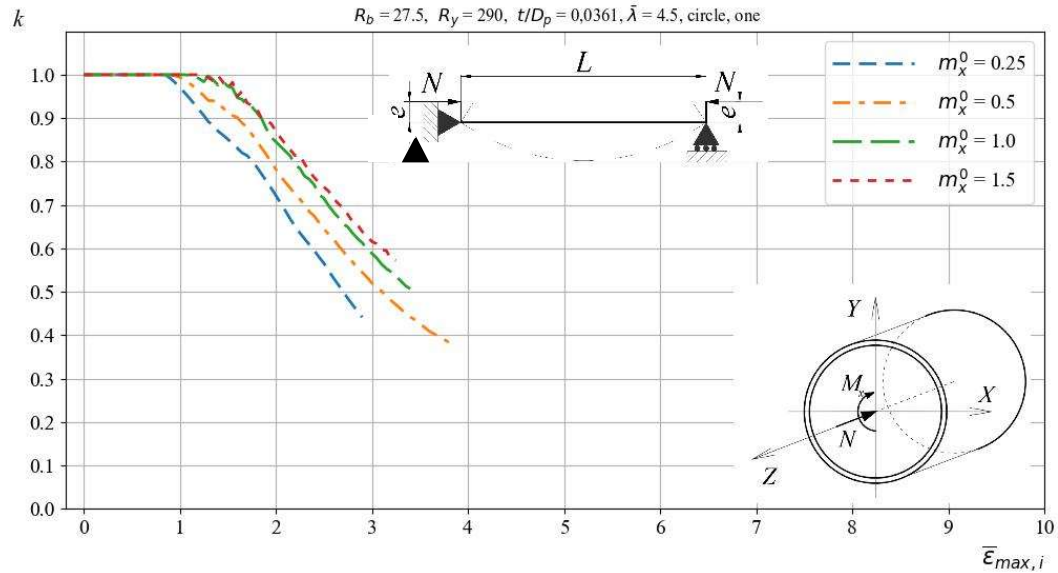


Рисунок 3.12 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с двухосным эксцентриситетом при $R_b = 27,5$ МПа, $R_y = 290$ МПа, гибкость 4,5.

Прямоугольное сечение

На рис. 3.13 – 3.18 показаны графики остаточной несущей способности для трубобетонных элементов прямоугольного сечения с $H/V = 2,0$ при загрузении продольной сжимающей силой с *одноосным* эксцентриситетом. Графики

построены для нескольких сочетаний по прочности бетона и стали ($R_b = 27,5$ МПа, $R_y = 290$ МПа, 420 МПа).

При $m_x^0 = 0,25$ относительная прочность составила 0,05...0,43, при $m_x^0 = 1,5$ относительная прочность составила 0,10...0,52.

Меньшее значение остаточной несущей способности k соответствует меньшей прочности стали.

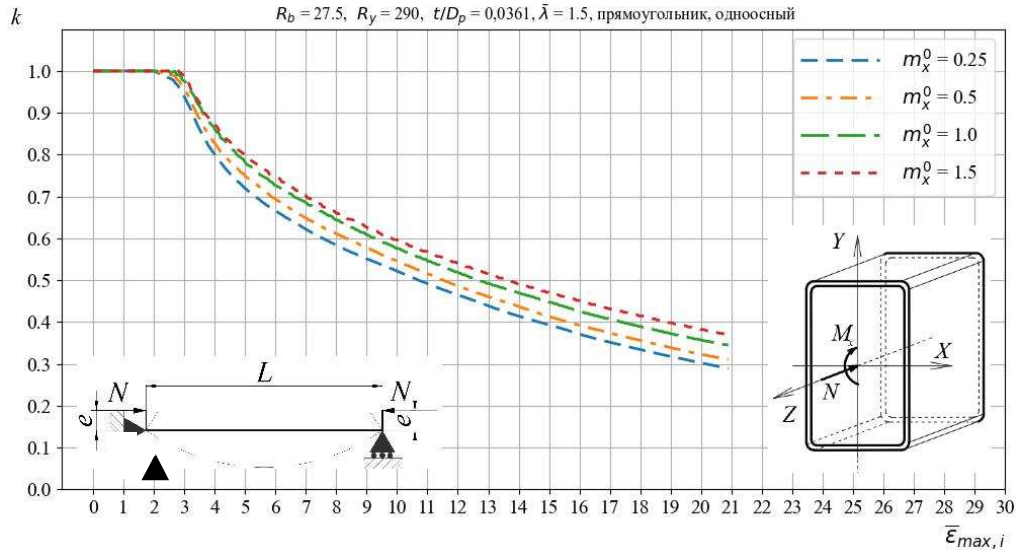


Рисунок 3.13 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с одноосным эксцентриситетом при $R_b = 27,5$ МПа, $R_y = 290$ МПа, $\bar{\lambda} = 1,5$.

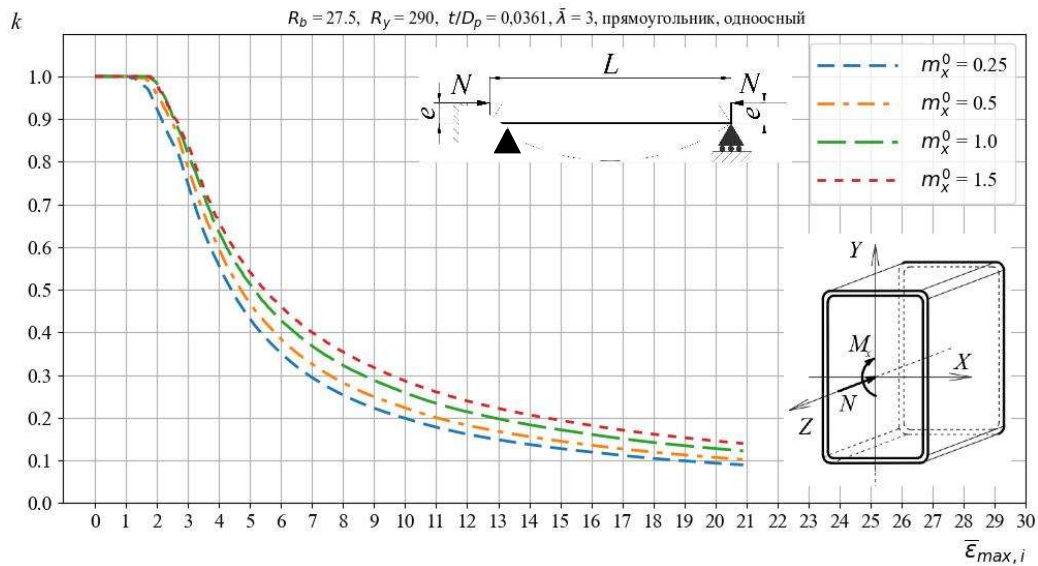


Рисунок 3.14 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с одноосным эксцентриситетом при $R_b = 27,5$ МПа, $R_y = 290$ МПа, $\bar{\lambda} = 3,0$.

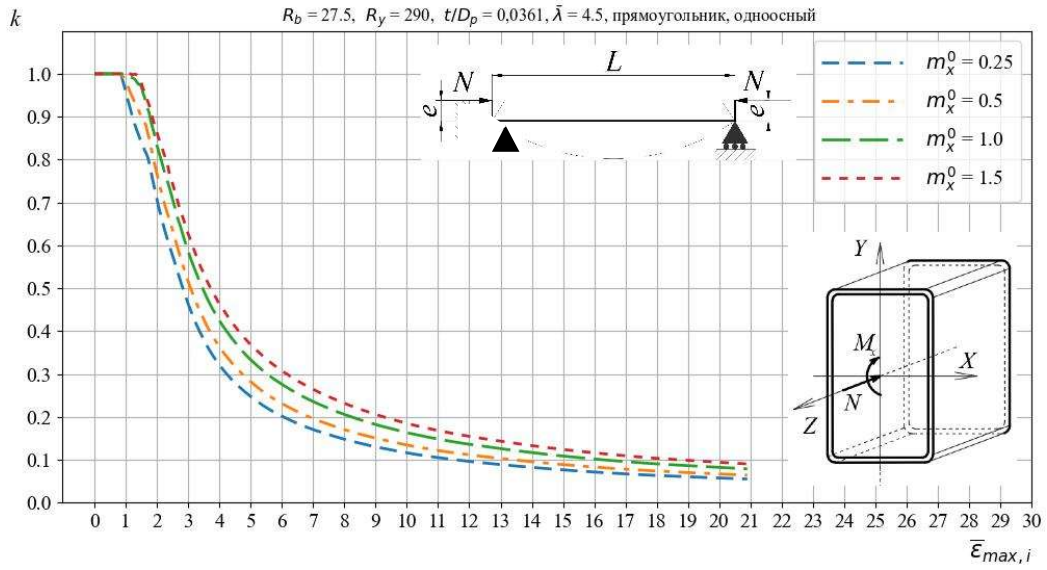


Рисунок 3.15 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с *одноосным* эксцентриситетом при

$$R_b = 27,5 \text{ МПа}, R_y = 290 \text{ МПа}, \bar{\lambda} = 4,5.$$

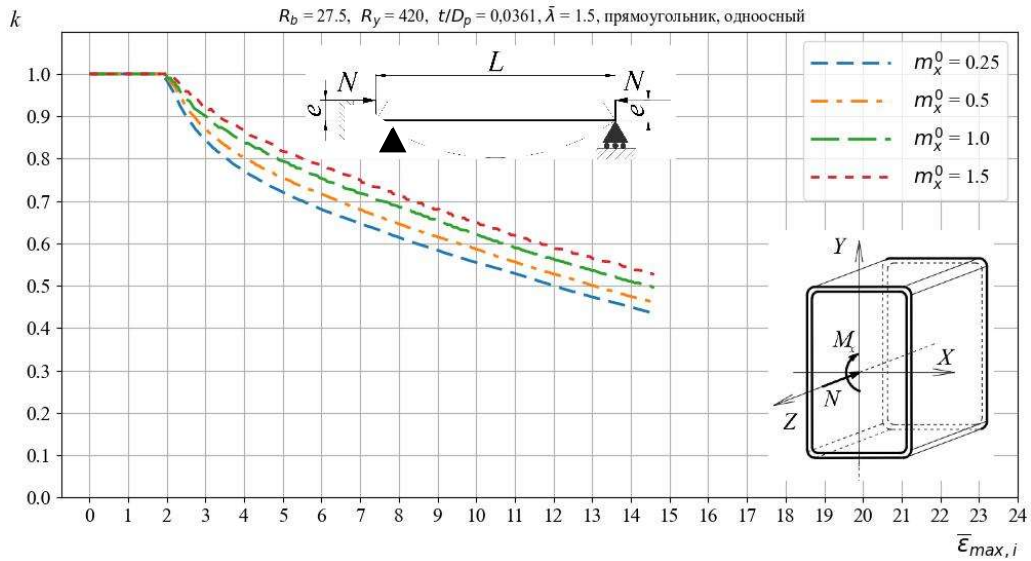


Рисунок 3.16 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с *одноосным* эксцентриситетом при

$$R_b = 27,5 \text{ МПа}, R_y = 420 \text{ МПа}, \bar{\lambda} = 1,5.$$

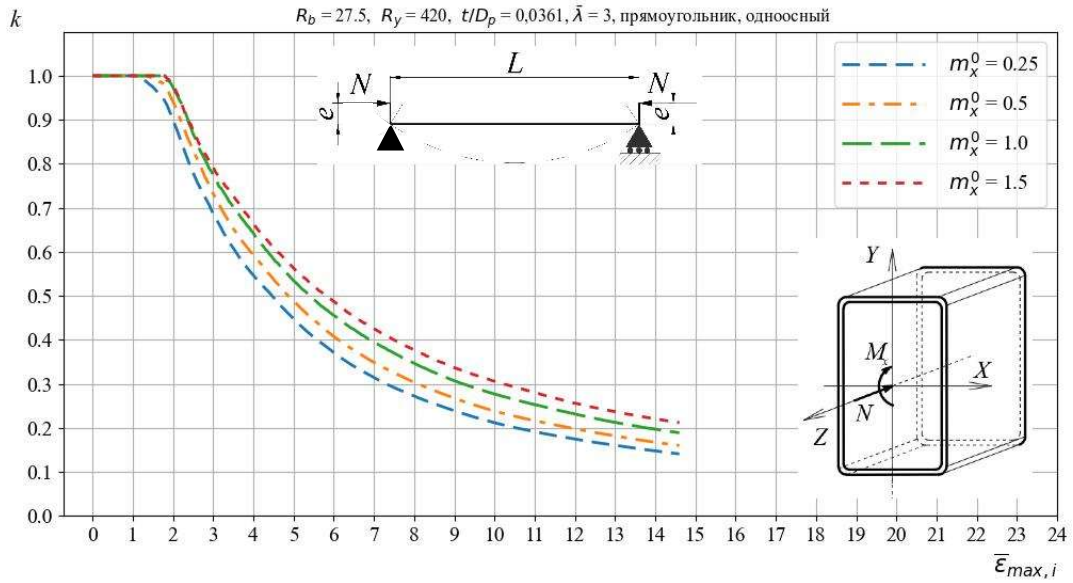


Рисунок 3.17 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с *одноосным* эксцентриситетом при

$$R_b = 27,5 \text{ МПа}, R_y = 420 \text{ МПа}, \bar{\lambda} = 3,0.$$

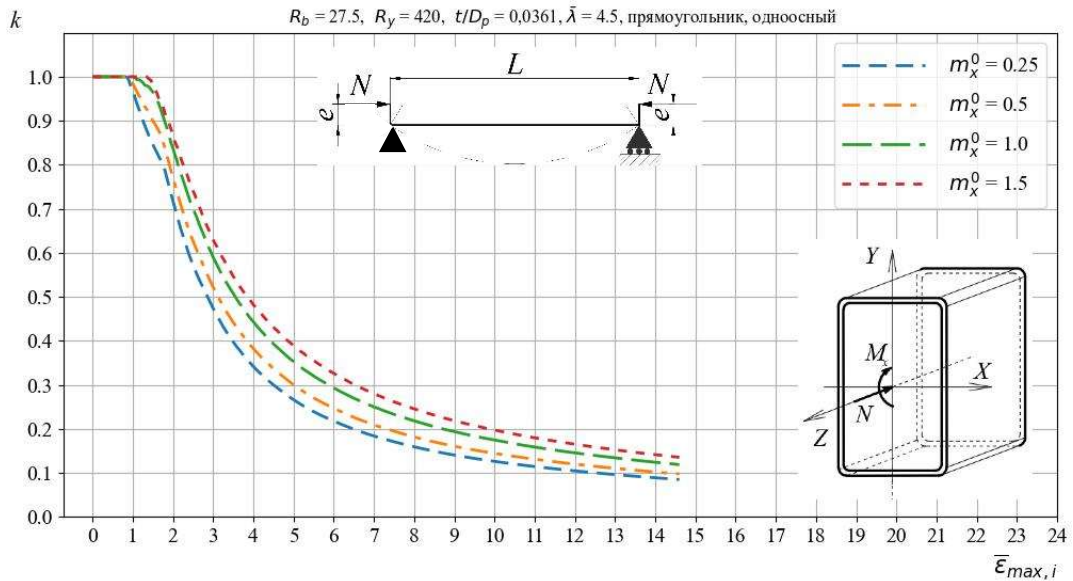


Рисунок 3.18 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с *одноосным* эксцентриситетом при

$$R_b = 27,5 \text{ МПа}, R_y = 420 \text{ МПа}, \bar{\lambda} = 4,5.$$

На рис. 3.19 – 3.24 показаны графики остаточной несущей способности для трубобетонных элементов прямоугольного сечения с $H/B = 1,0$ при загрузении продольной сжимающей силой с *двухосным* эксцентриситетом.

При $m_x^0 = 0,25$ относительная прочность составила 0,11...0,48, при $m_x^0 = 1,5$ относительная прочность составила 0,2...0,64.

Меньшее значение остаточной несущей способности k соответствует большей гибкости и большему по прочности бетону (44 МПа).

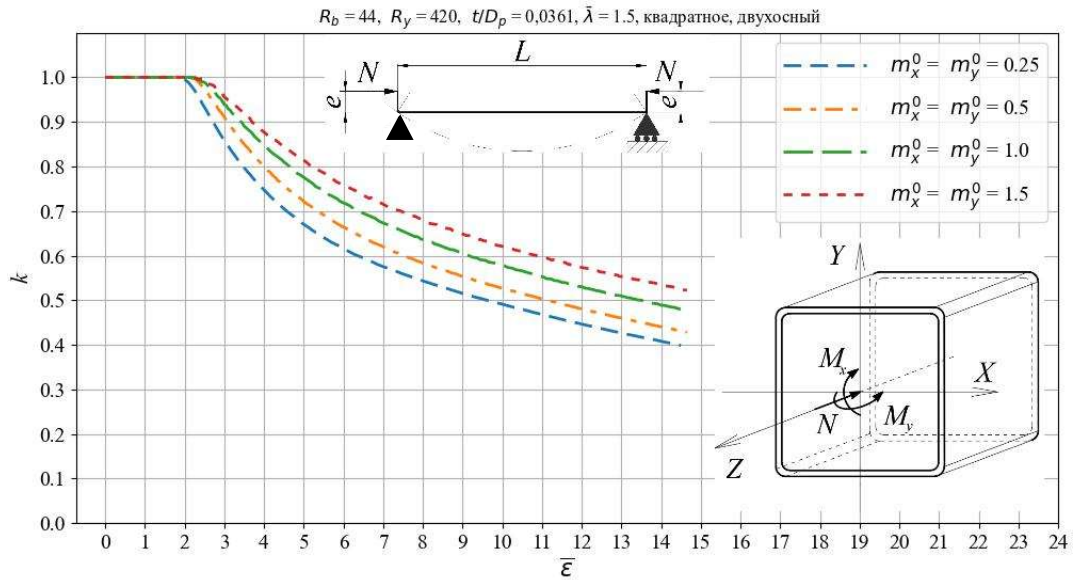


Рисунок 3.19 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с одноосным эксцентриситетом при

$$R_b = 44 \text{ МПа}, R_y = 420 \text{ МПа}, \bar{\lambda} = 1,5.$$

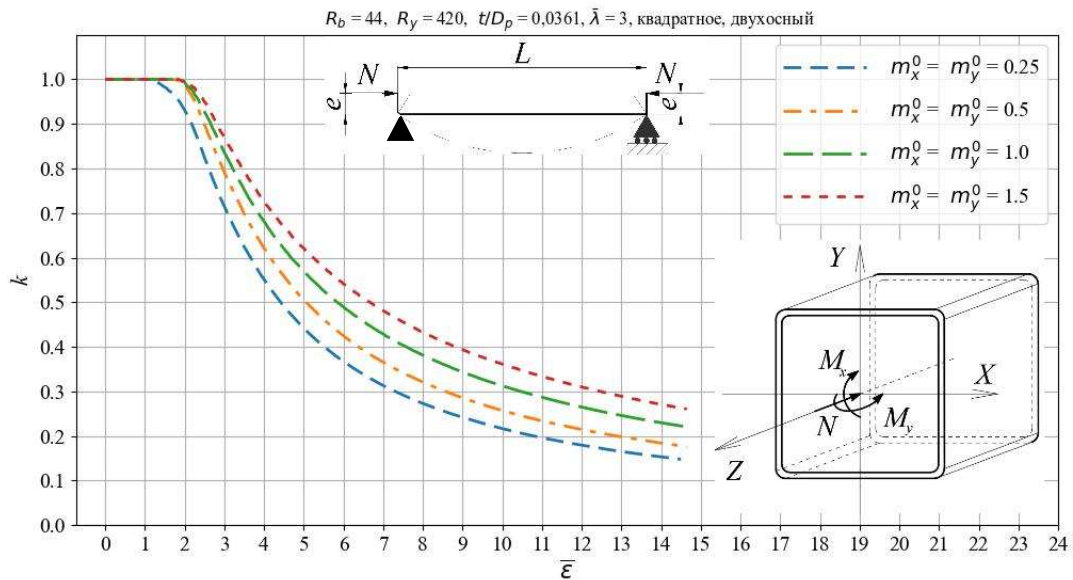


Рисунок 3.20 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с одноосным эксцентриситетом при

$$R_b = 44 \text{ МПа}, R_y = 420 \text{ МПа}, \bar{\lambda} = 3,0.$$

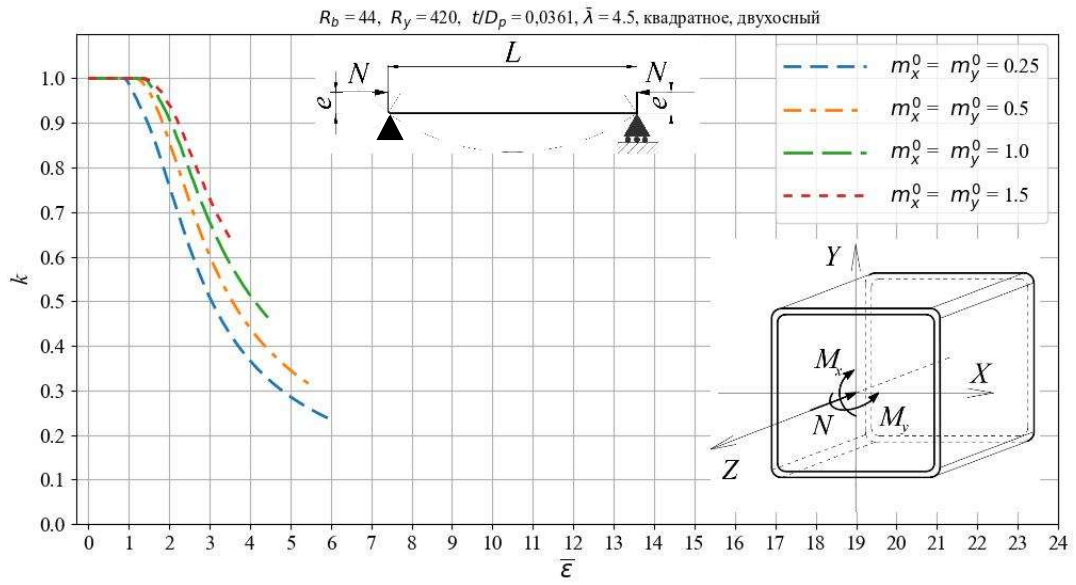


Рисунок 3.21 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с *одноосным* эксцентриситетом при

$$R_b = 44 \text{ МПа}, R_y = 420 \text{ МПа}, \bar{\lambda} = 4,5.$$

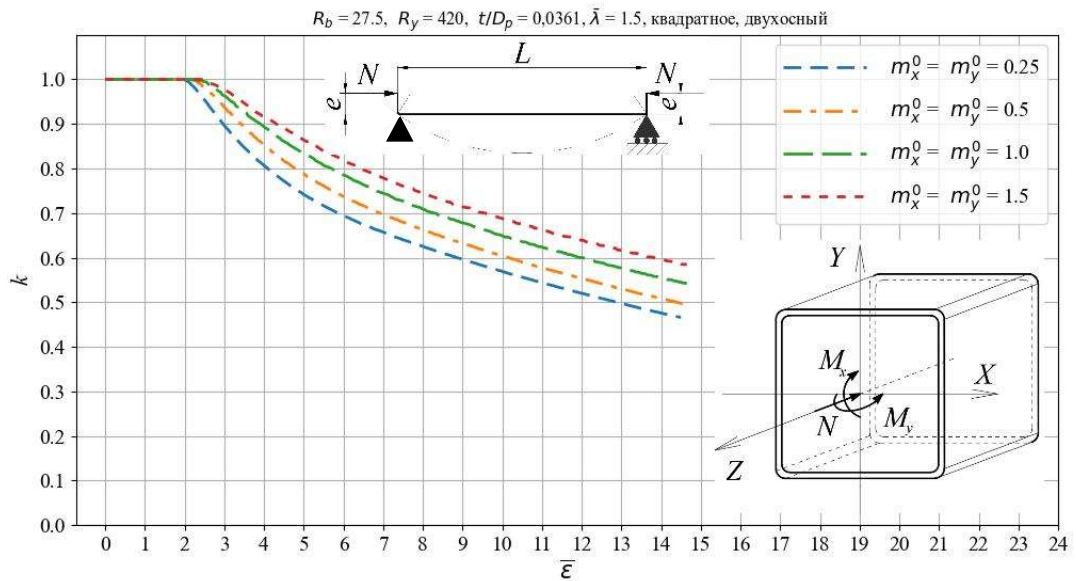


Рисунок 3.22 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с *одноосным* эксцентриситетом при

$$R_b = 27,5 \text{ МПа}, R_y = 420 \text{ МПа}, \bar{\lambda} = 1,5.$$

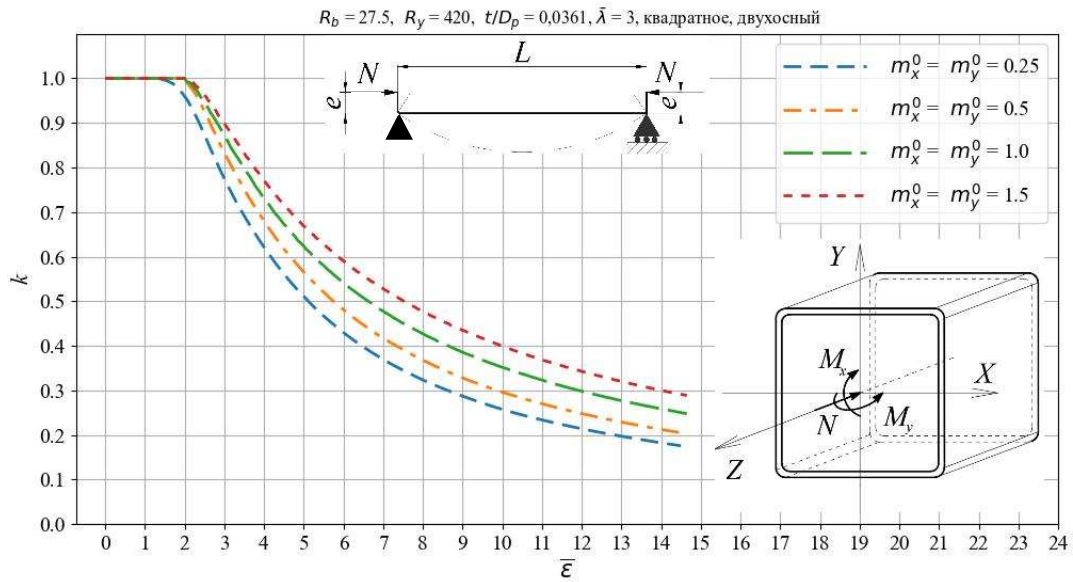


Рисунок 3.23 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с *одноосным* эксцентриситетом при

$$R_b = 27,5 \text{ МПа}, R_y = 420 \text{ МПа}, \bar{\lambda} = 3,0.$$

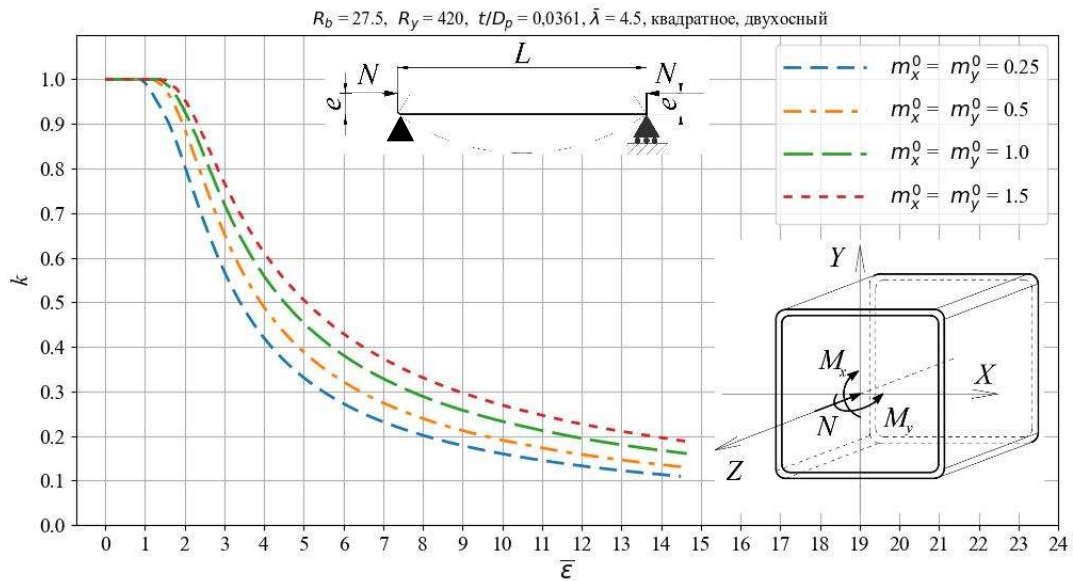


Рисунок 3.24 – Запредельная работа ТБЭ при сжатии с *одноосным* эксцентриситетом при

$$R_b = 27,5 \text{ МПа}, R_y = 420 \text{ МПа}, \bar{\lambda} = 4,5.$$

Учет длительного действия нагрузки по диаграмме рис. 2.5 показан на рис. 3.25 и 2.26. Были сопоставлены графики зависимости приведенного к равной площади коэффициента φ_{ex} от относительных деформаций. Для расчета были приняты данные при относительной влажности не более 40%: бетон класса В50,

сталь с $R_y = 420$ МПа, $H/B = 2,0$, приведенная гибкость $\bar{\lambda} = 1,5$ и 4,5, относительный эксцентриситет $m_x^0 = 0,5$. С учетом ползучести несущая способность при действии постоянных и длительных нагрузок оказывается ниже на 10-20% при приведенных расчетных параметрах, что хорошо согласуется с данными других исследователей [29].

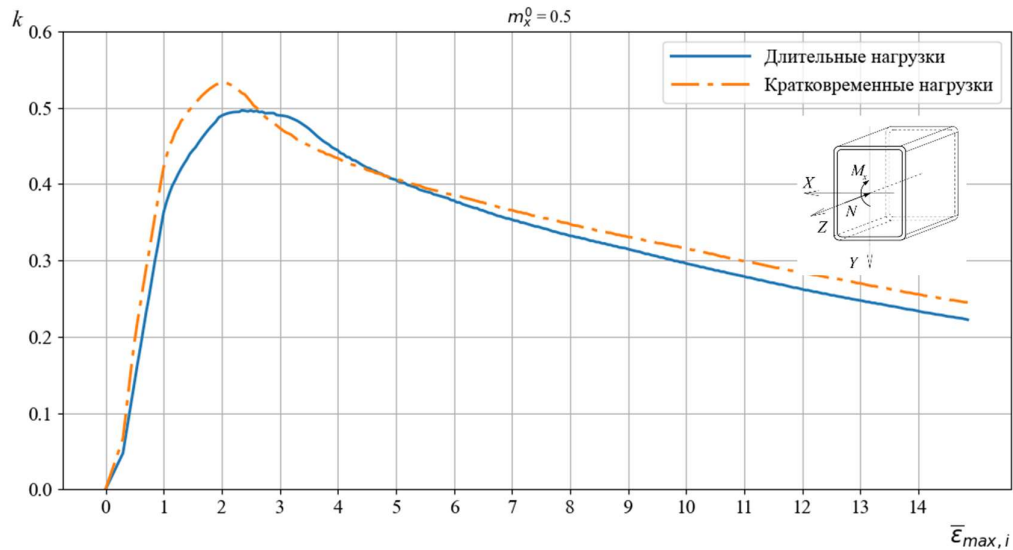


Рисунок 3.25 – Сопоставление графиков остаточной несущей способности в зависимости от относительной деформации при кратковременном и длительном действии нагрузки ($R_y = 420$ МПа, $R_b = 27,5$ МПа, $H/B = 2,0$, $\bar{\lambda} = 1,5$).

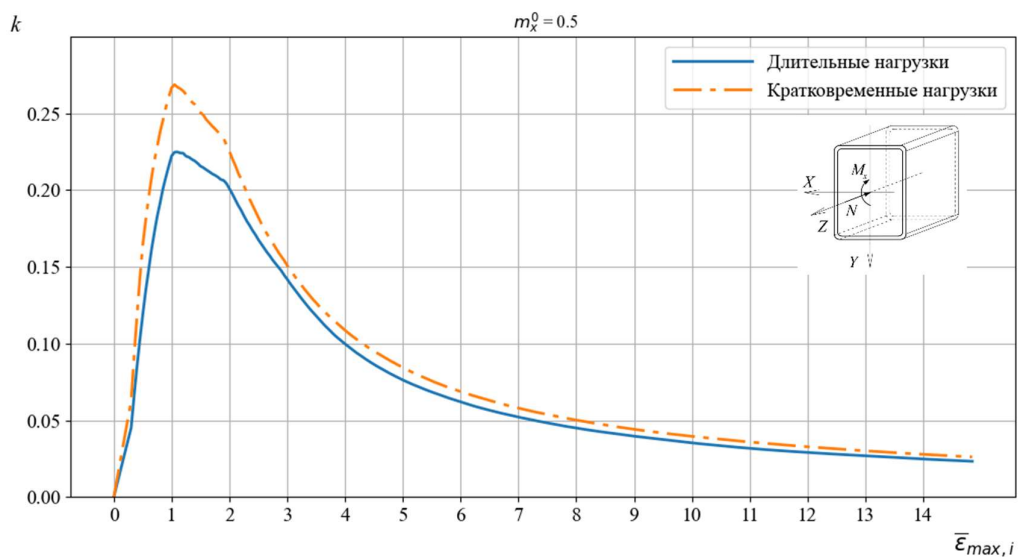


Рисунок 3.26 – Сопоставление графиков остаточной несущей способности в зависимости от относительной деформации при кратковременном и длительном действии нагрузки ($R_y = 420$ МПа, $R_b = 27,5$ МПа, $H/B = 2,0$, $\bar{\lambda} = 4,5$).

Таким образом, расчет трубобетонных элементов круглого и прямоугольного сечений на устойчивость в предельных режимах сопротивления проведен с учетом нескольких сочетаний бетона и стали по прочности. В большинстве случаев расчет удалось провести до $\varepsilon = 0,025$. При гибкости $\bar{\lambda} = 4,5$ и $R_y = 290$ МПа расчет не идет дальше $\bar{\varepsilon} = 2,4 \dots 4$ вследствие резкого набегания деформаций, когда фиктивный параметр загрузки m^* стремится к бесконечности. Учет ползучести бетона в ТБЭ показал понижение несущей способности по устойчивости, при этом остаточная несущая способность практически не изменяется при учете ползучести.

3.7 Выводы по главе 3

1. Обобщен обратный метод расчета стальных элементов на устойчивость для предельных и предельных режимов сопротивления трубобетонных элементов с приведением характеристик неоднородного сечения к стали трубы.

2. Упрочнение металла прямоугольной трубы в зонахгиба и начальные напряжения приводят к снижению устойчивости на 5-7% в зависимости от соотношений параметров сечения.

3. Учет фактической жесткости элемента, определяемой при нарушении равновесия деформированного состояния, позволяет получить некоторые резервы устойчивости в пределах 5-12%.

4. Результаты расчётов устойчивости, выполненные с помощью метода конечных элементов в программе *Ansys*, демонстрируют хорошее соответствие результата расчета по предложенному методу, что свидетельствует о достоверности разработанного метода.

5. Влияние ползучести бетона незначительно влияет на остаточную несущую способность.

6. Получены новые данные об остаточной несущей способности трубобетонных элементов после потери устойчивости: при максимальных относительных деформациях, допускаемых СП 385.1325800.2018, она составляет от 11% до 50% от изначальной и зависит от геометрических и механических

параметров бетона и стали, гибкости трубобетонных элементов. Большие в процентном соотношении значения остаточной несущей способности характерны для трубобетонных элементов с меньшей гибкостью, большей относительной толщиной трубы и меньшей прочностью бетона по отношению к прочности стали.

7. На основании полученных результатов в гл. 5 предложена инженерная методика расчета на устойчивость в том числе и для запредельной стадии работы.

ГЛАВА 4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ ЗАРУБЕЖНЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ АВТОРОВ

4.1 Сопоставление результатов исследования по прочности трубобетонных элементов

Для подтверждения достоверности предлагаемого численного решения приведем сравнение результатов расчета с данными экспериментальных исследований российских и зарубежных авторов.

С этой целью были выбраны исследования (см. табл. 4.1), в которых испытывались образцы коротких трубобетонных элементов круглого и прямоугольного сечений. Загружение проводилось продольной силой с равными концевыми эксцентриситетами через опорные плиты, что обеспечивало соблюдение гипотезы плоских сечений. Результаты теоретических исследований $N_{обр}$ были получены по характеристикам материалов и сечений, приведенным авторами исследований. Параметры образцов и результаты испытаний $N_{эксп}$ приводятся в таблицах 4.2 – 4.4.

Таблица 4.1 – Проведенные исследования

Авторы	Страна	Год проведения исследований
<i>D. Liu</i>	Китай	2005
<i>T. Fujimoto</i> и др	Япония	2004
В.В. Пинский	СССР	1988
И.С. Яровой	СССР	1971
Л.И. Стороженко	СССР	1988

4.1.1 Сопоставление с экспериментами, выполненными *D. Liu* в Китае

В 2005 году в университете Шеньжень *D. Liu* были испытаны 16 образцов коротких прямоугольных трубобетонных стоек [89]. Предел текучести, временное сопротивление и модуль упругости стальной трубы составили соответственно $R_y = 495$ МПа, $R_u = 581$ МПа и $E_s = 206000$ МПа. Призмная прочность бетона составила $R_b = 60$ МПа, модуль упругости $E_b = 39000$ МПа. Нагрузка передавалась с заданными равными концевыми эксцентриситетами в плоскости большей жесткости через стальные пластины (см. рис. 4.1). Размеры сечений труб

составляли 130x130x4 мм, 120x120x4, 180x90x4, 150x100x4 мм. Результаты испытаний приведены в табл. 4.2.



Рис. 4.1 – Испытания коротких трубобетонных стержней *D. Liu*

Таблица 4.2 – Сопоставление с экспериментами *D. Liu* (прямоугольные сечения)

<i>Dalin Liu, Китай, 2006</i>											
Наименование образца	H , м	B , м	t , м	R_y , МПа	$R_{y,ult}$, МПа	R_b , МПа	E_b , МПа	e , мм	$N_{эксп}$, кН	$N_{обр}$, кН	%
<i>S1</i>	0,12	0,12	0,004	495	581	60	39000	15	1294	1239,8	-4,19%
<i>S2</i>	0,12	0,12	0,004	495	581	60	39000	25	1125	1045,0	-7,11%
<i>S3</i>	0,12	0,12	0,004	495	581	60	39000	30	949	963,4	1,51%
<i>S4</i>	0,12	0,12	0,004	495	581	60	39000	45	810	781,2	-3,56%
<i>S5</i>	0,15	0,1	0,004	495	581	60	39000	15	1422	1346,7	-5,30%
<i>S6</i>	0,15	0,1	0,004	495	581	60	39000	30	1190	1089,1	-8,48%
<i>S7</i>	0,15	0,1	0,004	495	581	60	39000	45	964	899,2	-6,72%
<i>S8</i>	0,15	0,1	0,004	495	581	60	39000	60	763	757,4	-0,74%
<i>S9</i>	0,18	0,09	0,004	495	581	60	39000	20	1491	1408,5	-5,53%
<i>S10</i>	0,18	0,09	0,004	495	581	60	39000	30	1319	1245,7	-5,56%
<i>S11</i>	0,18	0,09	0,004	495	581	60	39000	40	1208	1111,2	-8,01%
<i>S12</i>	0,18	0,09	0,004	495	581	60	39000	50	1051	993,2	-5,50%
<i>S13</i>	0,13	0,13	0,004	495	581	60	39000	15	1472	1430,9	-2,79%
<i>S14</i>	0,13	0,13	0,004	495	581	60	39000	25	1305	1217,9	-6,67%
<i>S15</i>	0,13	0,13	0,004	495	581	60	39000	40	1022	985,8	-3,54%
<i>S16</i>	0,13	0,13	0,004	495	581	60	39000	55	789	815,9	3,41%

Сопоставляя экспериментальные и расчетные значения прочности, можно сделать вывод об их хорошей сходимости.

4.1.2 Сопоставление с экспериментами *T. Fujimoto*, выполненными в Японии

В 2004 году *Ando Corp.*, *Building Research Institute* и *Graduate School of Human Environmental Studies* провели исследования под руководством *T. Fujimoto* [73]. Испытано 8 образцов квадратного сечения с эксцентриситетом в 45 и 60 мм. Прочность бетона R_b по результатам испытания составила 25,2; 40,5 и 77 МПа. Для двух марок стали предел текучести R_y составлял 262 и 618 МПа, а временное сопротивление R_u – 411 и 673 МПа соответственно. Схема испытания показана на рис. 4.2. В табл. 4.3 приведены результаты сравнения экспериментов.

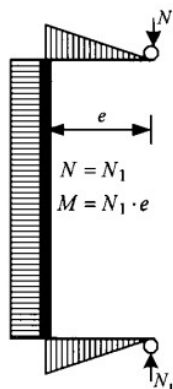


Рис. 4.2 – Испытания коротких трубобетонных стержней *T. Fujimoto* и др.

Таблица 4.3 – Сопоставление с экспериментами *T. Fujimoto* (прямоугольные сечения)

<i>Toshiaki Fujimoto, Akiyoshi Mukai, Isao Nishiyama, Kenji Sakino, Япония, 2004</i>											
наименование образца	H , мм	B , мм	t , мм	R_y , МПа	R_{yult} , МПа	R_b , МПа	E_b , МПа	e , мм	$N_{эксп}$, кН	$N_{обр}$, кН	%
ER4-A-4-57	148	148	4,38	262	411	40,5	29300	45	823	810	1,6
ER4-C-2-56	214	214	4,38	262	411	25,4	25100	60	1141	1188	-4,1
ER4-C-4-51	215	215	4,38	262	411	40,5	29300	60	1369	1493	-9,1
ER4-C-8-46	215	215	4,38	262	411	77,0	35900	60	2014	2113	-4,9
ER6-A-4-61	144	144	6,36	618	673	40,5	29300	45	1701	1819	-6,9
ER6-C-2-58	210	210	6,36	618	673	25,4	25100	60	2393	2212	7,6
ER6-C-4-57	209	209	6,36	618	673	40,5	29300	60	2694	2524	6,3
ER6-C-8-54	210	210	6,36	618	673	77,0	35900	60	3396	3078	9,4

Сопоставляя экспериментальные и расчетные значения прочности, можно сделать вывод об их удовлетворительной сходимости для стали и бетона обычной и повышенной прочности.

4.1.3 Сопоставление с экспериментами В.В. Пинского, И.С. Ярового и Л.И. Стороженко

В 1988 г. в НИИСК (УСССР) были проведены испытания трубобетонных коротких стержней В.В. Пинским [45]. Всего было испытано 4 серии образцов круглого сечения размером 102x4,5 мм, длиной 600 мм. Эксцентриситеты приложения нагрузки составили 50, 100, 150 мм. Загружение производилось через цилиндрические шарниры к опорным пластинам (см. рис. 4.3).

Для получения характеристик стали и бетона были испытаны бетонные призмы и кубы ($R_b = 16,3$ МПа, $E_{b0} = 23600$ МПа) и полосы стали ($R_y = 315$ МПа). В табл. 4.4 приведены результаты испытаний и сравнение их с результатами расчетов.

По работе В.В. Пинского также приводятся результаты экспериментов Л.И. Стороженко (см. табл. 4.4).



Рис. 4.3 - Испытания коротких трубобетонных стержней В.В. Пинским []

В период с 1967 по 1971 г. на базе Криворожского горнорудного института И.С. Яровой [64] провел серию испытаний коротких стержней круглого сечения 112x4 мм и длиной 600 мм. Исследовано три серии с эксцентриситетами приложения нагрузки 10, 20, 30 мм, в каждой серии по три образца. Для получения характеристик стали и бетона были испытаны бетонные призмы и кубы ($R_b = 25,0$ МПа, $E_{b0} = 25000$ МПа) и полосы стали ($R_y = 300$ МПа).

Таблица 4.4 – Сопоставление с экспериментами ученых СССР (круглые сечения)

Пинский В.В., Киев, 1988									
наименование образца	D , м	t , м	R_y , МПа	R_b , МПа	E_b , МПа	e , мм	$N_{\text{эсп}}$, кН	$N_{\text{обр}}$, кН	%
ВТБ-50	0,102	0,0045	315	16,3	23600	51	229	215	-6,11%
ВТБ-100	0,102	0,0045	315	16,3	23600	102	130	126,5	-2,69%
ВТБ-150	0,102	0,0045	315	16,3	23600	156	85	88,2	3,76%
Яровой И.С., Днепропетровск, 1974									
ВТБ-10-600	0,112	0,004	300	25	25000	10	498	491	-1,41%
ВТБ-20-600	0,112	0,004	300	25	25000	20	380	402	5,79%
ВТБ-30-600	0,112	0,004	300	25	25000	30	314	337	7,32%
Стороженко Л.И.									
ВТБ-VI-I-10	0,114	0,004	300	17,5	23500	10	464	455	-1,94%
ВТБ-VI-I-20	0,112	0,004	300	17,5	23500	20	370	376,3	1,70%
ВТБ-VI-I-30	0,112	0,004	300	17,5	23500	30	286	318,2	11,26%

Сопоставляя экспериментальные и расчетные значения прочности, можно сделать вывод об их удовлетворительной сходимости: от -6,11% до +11,26% для ТБЭ круглого сечения из стали и бетона обычной прочности.

Многочисленные сравнения с экспериментальными исследованиями показывают удовлетворительную сходимость для круглых и прямоугольных трубобетонных элементов из бетона средней прочности и высокопрочных, обычной стали и стали повышенной прочности. Достоверность разработанной методики подтверждается также тем, что сравнения проводились с экспериментами, проведенными в различных странах и в разное время.

4.2 Сопоставление результатов исследования устойчивости трубобетонных элементов

Сопоставлением результатов расчета на устойчивость, полученного обратным численно-аналитическим методом для трубобетонных стержней, и экспериментальных данных подтверждается достоверность разработанного метода. Отобранные для этого экспериментальные данные по устойчивости приведены в табл. 4.5.

В табл. 4.6–4.12 приведены результаты расчета и экспериментальных исследований *K. Cederwall et al.* [68], *H. Shakir-Khalil, J. Zegnische* [104], *P. H.Schiller, J. F. Hajjar* [75, 100], *H. Shakir-Khalil, M. Mouli* [103] трубобетонных стержней квадратного и прямоугольного сечений, нагруженных продольной силой с одно- и двухосным эксцентриситетами. В табл. 4.11 и 4.12 приводятся

результаты расчетов и экспериментальных исследований И.С. Яровой [68] и *J. Zegnische* [111] для труб круглого сечения. Модули деформации бетона, размеры сечений и расчетные длины приводятся в примечаниях к таблицам. Отобранные экспериментальные отвечали задаче исследования: стержни имели значимую гибкость, нагружение стержней проводилось одновременно на стальную и бетонную часть трубы, схема нагружения была такова, что момент нагружения вырастал пропорционально силе.

Таблица 4.5 – Проведенные исследования

Авторы	Страна	Год проведения исследований
<i>K. Cederwall</i> и др.	Швеция	1990
<i>H. Shakir-Khalil, J. Zegnische, M. Mouli</i>	Великобритания	1989, 1990
<i>P. H. Schiller, J. F. Hajjar</i>	США	1996
И.С. Яровой	СССР	1974
<i>J. Zegnische</i>	Алжир	2005

4.2.1 Сопоставление с экспериментами **K. Cederwall, B. Engstrom, M.**

Grauers, выполненные в Швеции

В работе [68], проведенной в Техническом университете Чалмерса в г. Гётеборг (Швеция), было испытано 18 трубобетонных стержней (отобрано из них 9). Целью исследования было выявление преимуществ применения высокопрочного бетона и влияние эффекта обжатия. Для получения результатов варьировались прочности бетона и стали, толщина трубы, эксцентриситет. Использовались трубы длиной 3 м, сечением 120x120 мм (квадратное) и толщиной 5 и 8 мм, высокопрочный и бетон средней прочности, и сталь двух марок. Нагрузка прикладывалась по концам стержней с эксцентриситетом 0, 10 и 20 мм, стержни считались шарнирно опертыми. Предел текучести стали R_y находился для разных труб в диапазоне от 304 до 404 МПа. Прочность бетона на сжатие была получена при испытании стандартных цилиндров, $R_b = 39...103$ МПа.

В результате испытаний были получены значения разрушающих нагрузок, кривые зависимости прогиба и продольных относительных деформаций от нагрузки в среднем сечении стержней.

Для сравнения с методикой расчета были выбраны стержни, у которых эксцентриситет приложения нагрузки был 20 мм. На колонны, приведенные в

таблице 4.9, нагрузка прикладывалась на стальную и бетонную часть одновременно.

Таблица 4.6 – Результаты сопоставления с экспериментами *K. Cederwall* (элементы прямоугольного сечения) [68]

№ стержня	A_{red} , см ²	$\bar{\lambda}_x$	m_x^0	R_s , МПа	R_b , МПа	ε_{max}	φ_{eff}	$N_{обр}$, кН	$N_{эксп}$, кН [101]	$\frac{N-N_3}{N_3} \cdot 100\%$
1	42,47	2,830	0,72	304	47	1,7	0,432	560,4	610	-8,1%
2	51,91	2,856	0,69	323	39	1,7	0,416	708,6	740	-4,2%
3	53,25	2,769	0,70	300	46	1,7	0,437	712,4	760	-6,3%
4	42,66	3,451	0,725	438	46	1,2	0,355	643,6	700	-8,1%
5	47,81	3,046	0,757	327	96	1,7	0,450	777,7	710	9,5%
6	47,81	3,530	0,757	439	96	1,2	0,374	844,6	830	1,8%
7	53,42	3,149	0,703	376	47	1	0,415	792,8	870	-8,9%
8	58,01	2,975	0,731	323	103	1,75	0,456	915,2	820	11,6%
9	58,01	3,222	0,731	379	103	1,5	0,418	982,5	1000	-1,7%

Примечание: стержень № 1, 4-6 — труба 120×120×5 мм; стержни № 2, № 3, 7-9 — труба 120×120×8 мм; модуль деформации бетона $E_b = 39\,000$ МПа; расчетная длина 300 см, эксцентриситет $e_y^0 = 20$ мм.

Сопоставляя экспериментальные и расчетные значения по устойчивости, можно сделать вывод об их удовлетворительной сходимости.

4.2.2 Сопоставление с экспериментами *H. Shakir-Khalil, J. Zegniche, M. Mouli*, выполненные в Великобритании

На базе Университета Манчестера (Великобритания) были проведены испытания трубобетонных стержней, нагруженных одноосными и двухосными эксцентриситетами [102, 103]. Целью экспериментов было испытать стойки, аналогичные по размеру применяемым в многоэтажных зданиях. Испытания проводились для стержней прямоугольного сечения 120×80 мм и 120×50 мм (табл. 4.7 и 4.8) длиной 2760 мм. Эксцентриситет приложения нагрузки составлял от 0 до 60 мм, которая прикладывалась через опорные пластины толщиной по 75 мм. С учетом размеров пластин расчетная длина составила 3210 мм и 2940 мм в плоскостях большей и меньшей жесткости соответственно.

Предел текучести стали R_y находился в диапазоне от 343,3 до 386,3 МПа. Кубиковая прочность бетона на сжатие составляла от 40 до 45 МПа. Переход от кубиковой прочности к призменной R_b был принят согласно нормам BS 5400,

рекомендуемым авторами, и составил 0,67. Модуль упругости бетона $E_b = 34000$ - 36000 МПа. Модуль упругости стали принимался $E_s = 205000$ МПа.

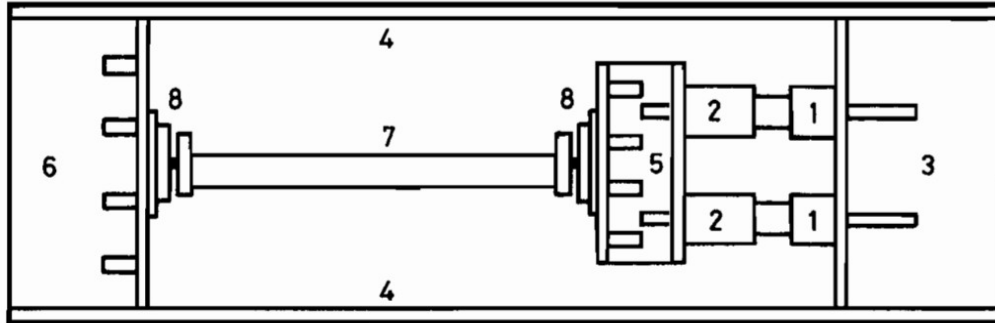


Рис. 4.4 Схема испытательной установки [102]. 1 – два гидравлических домкрата по 5000 кН каждый, 2 – узел передачи нагрузки, 3 – переборка, 4 – связи, 5 – крестовина, 6 – переборка, 7 – испытуемый образец, 8 – загрузочные пластины по 75 мм толщиной.

Таблица 4.7 – Результаты сопоставления с экспериментами [102]

№ стержня	A_{red} , см ²	$\bar{\lambda}_x$	m_x^0	R_s , МПа	R_b , МПа	ϵ_{max}	Φ_{eff}	$N_{обр}$, кН	$N_{эксп}$, кН	$\frac{N-N_3}{N_3} \cdot 100\%$
1	29,80	3,448	0,89	386,3	31,2	1,3	0,308	354,9	390	-9,0 %
2	29,80	3,440	2,21	384,7	31,2	1,5	0,214	245	232	5,6 %
3	29,80	4,461	0,79	384,7	34,32	0,9	0,259	296,4	260	14,0 %
4	30,12	4,226	1,98	343,3	33,54	1,4	0,194	200,2	208	-3,8 %
5	42,72	3,167	1,36	350,5	40,3	1,7	0,294	439,9	445	-1,1 %
6	42,72	3,925	2,27	350,5	38,2	1,3	0,187	280,7	290	-3,2 %
7	42,72	4,819	1,22	368	40,6	0,9	0,203	318,4	350	-9,0 %

Примечание: стержни № 1–4 — труба 120×80×5 мм с расчетной длиной $l_x = 321$ см, $l_y = 294$ см; $E_b = 34\ 000$ МПа; стержни № 5–7 — труба 150×100×5 мм; модуль деформации бетона $E_b = 36\ 000$ МПа; стержни № 3, 4 и 7 были испытаны при действии силы с эксцентриситетом в плоскости меньшей жесткости.

Таблица 4.8 – Результаты сопоставления с экспериментами [103]

№ стержня	A_{red} , см ²	$\bar{\lambda}_x$	m_x^0	m_y^0	R_s , МПа	R_b , МПа	ϵ_{max}	Φ_{eff}	$N_{обр}$, кН	$N_{эксп}$, кН	$\frac{N-N_3}{N_3} \cdot 100\%$
Z-6	30,44	3,26	0,60	0,80	343,3	33,2	1,6	0,248	259,2	268	-3,3 %
Z-7	30,44	3,33	1,49	1,99	357,5	35,2	1,8	0,156	170,1	160	6,3 %
M-2	30,12	3,25	0,30	0,40	341	33,23	1,1	0,314	322,2	348	-7,4 %
M-3	29,80	3,24	1,03	1,38	341	36,04	1,7	0,199	202,6	198,5	2,1 %
M-4	29,48	3,33	1,47	1,96	362,6	33,07	1,7	0,184	196,7	206,8	-4,9 %
M-5	29,48	3,33	0,59	0,78	362,6	31,82	1,9	0,195	208,6	209,8	-0,6 %
M-7	42,20	2,64	0,30	0,40	346,7	36,04	2,2	0,378	552,8	596,2	-7,3 %
M-8	42,20	2,61	0,85	1,14	340	36,35	1,9	0,247	354,5	329,2	7,7 %
M-9	42,20	2,61	1,43	1,91	340	36,82	2,2	0,182	260,8	254,6	2,4 %

Примечание: стержни Z-6, Z-7, M-2–M-5 — 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.

Сопоставляя экспериментальные и расчетные значения по устойчивости, можно сделать вывод об их хорошей сходимости.

4.2.3 Сопоставление с экспериментами, выполненными в США

В 1996 г. в университете Миннесоты (США) на кафедре гражданского строительства был подготовлен обзор всех проведенных к текущей дате экспериментов со стальными трубами, заполненными бетоном [75]. В этом обзоре сообщается о работах профессора Рассела Бриджа (Russel Q. Bridge), которые соответствуют теме исследования. В табл. 4.9 и 4.10 представлены данные его экспериментов. Загружение выполнялось продольной силой с одноосным (табл. 4.9) и двухосным (табл. 4.10) эксцентриситетом (см. рис. 4.5). Для испытаний применялись стальные трубы сечением 200х200х10 мм, 150х150х6,5 мм, длиной 213,9 и 305 см соответственно. Прочность бетона находилась в пределах от $R_b = 29,9 \dots 44,3$ МПа, предел текучести стали $R_y = 254 \dots 319$ МПа. Модули упругости составляли для стали $E_s = 200000$ МПа и бетона $E_b = 32500$ МПа.

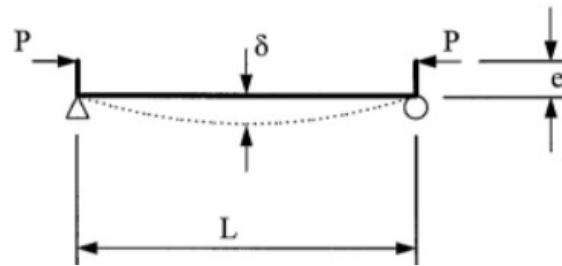


Рис. 4.5 Схема испытания стержней из трубобетона в работах Расселла Бриджа [75]

Таблица 4.9 – Результаты расчета и экспериментальных исследований [75]

№ стержня	A_{red} , см ²	$\bar{\lambda}_x$	m_x^0	ρ_x	R_s , МПа	R_b , МПа	ε_{max}	Φ_{eff}	$N_{обр}$, кН	$N_{эксп}$, кН	$\frac{N-N_3}{N_3} \cdot 100\%$
SHC-1	122,48	1,138	0,78	4,90	291	29,9	2,6	0,568	2022,8	1850	9,3 %
SHC-7	63,90	2,038	1,05	3,63	254	31,1	2	0,442	717	675	6,2 %
SHC-8	63,90	2,038	1,76	3,63	254	31,1	2,2	0,350	567,9	515	10,3 %

Примечание: стержень SHC-1 — труба 203,7×203,7×9,96 мм с расчетной длиной 213,9 см; стержни SHC-7, 8 — 152,5×152,3×6,48 мм с расчетной длиной 305 см; $E_b = 32\ 500$ МПа.

Таблица 4.10 – Испытание стержней с двухосным эксцентриситетом [75]

№ стержня	A_{red} , см ²	$\bar{\lambda}_x$	m_x^0	m_y^0	R_s , МПа	R_b , МПа	ε_{max}	Φ_{eff}	$N_{обр}$, кН	$N_{эксп}$, кН	$\frac{N-N_3}{N_3} \cdot 100\%$
SHC-3	123,5	1,203	0,396	0,679	313,0	37,2	2,208	0,578	2255	2200	2,5 %
SHC-4	123,5	1,210	0,553	0,553	317,0	39,2	2,208	0,577	2277,3	2230	2,1 %
SHC-5	123,5	1,729	0,394	0,761	319,0	44,3	2,208	0,528	2097,4	2050	2,3 %
SHC-6	123,5	1,729	0,934	0,934	317,0	36,1	2,208	0,430	1706,0	1600	6,6 %

Примечание: стержень SHC-3–4 — труба 203,7×203,7×9,96 мм с расчетной длиной 213,9 см; SHC-5–6 с расчетной длиной 305 см; $E_b = 32\ 500$ МПа.

Сопоставляя экспериментальные и расчетные значения по устойчивости, можно сделать вывод об их удовлетворительной сходимости.

4.2.4 Сопоставление с экспериментами J. Zegniche, K. Chaoui, выполненными в Алжире

На базе Университета Аннаба (Алжир) были проведены испытания трубобетонных стержней круглого сечения, нагруженных одноосными эксцентриситетами [104]. Целью экспериментов было испытать стойки, и показать зависимость несущей способности от гибкости и концевого эксцентриситета. Испытания проводились для стержней круглого сечения $\varnothing 160$ мм и толщиной 5 мм, имеющих длину 2000 и 4000 мм, заполненные высокопрочным бетоном. Эксцентриситет приложения нагрузки составлял от 8 до 32 мм. Нагрузка передавалась через пластины толщиной 15 мм.

Призменная прочность бетона составляла $R_b = 100 \dots 102$ МПа, а предел текучести стали $R_s = 271 \dots 281$ МПа. Модули упругости составляли для стали $E_s = 208000$ МПа и бетона $E_b = 45000$ МПа (табл. 4.11).

Таблица 4.11 – Испытание стержней с одноосным эксцентриситетом [104]

№ стержня	A_{red} , см ²	$\bar{\lambda}_x$	m_x^0	ρ_x	R_s , МПа	R_b , МПа	ε_{max}	φ_{eff}	$N_{обр}$, кН	$N_{эксп}$, кН	$\frac{N-N_3}{N_3} \cdot 100\%$
1	63,5	1,607	0,31	2,54	271	101	3	0,999	1653	1697	-2.6%
2	62,9	1,641	0,63	2,53	281	102	3,2	0,884	1419	1394	1.8%
3	62,9	1,640	0,95	2,53	280	101	3,35	0,77	1232	1212	1.7%
4	62,8	1,629	1,27	2,53	276	100	3,05	0,683	1077	1091	-1.3%
5	62,6	3,255	0,32	2,52	275	101	1,75	0,555	875,6	963	-9.1%
6	62,7	3,253	0,63	2,53	275	100	2	0,474	747,6	848	-11.8%
7	63,2	3,283	0,95	2,53	281	102	1,85	0,405	650,5	727	-10.5%
8	63,5	3,271	1,26	2,54	280	101	1,7	0,355	567,9	666	-14.7%

Примечание: стержни 1-8 – труба 160x5 мм с расчетной длиной 200 и 400 см; $E_b = 45000$ МПа.

Сопоставляя экспериментальные и расчетные значения по устойчивости, можно сделать вывод об их удовлетворительной сходимости.

4.2.5 Сопоставление с экспериментами И.С. Ярового

В период с 1967 по 1971 г. на базе Криворожского горнорудного института И.С. Яровой провел серию испытаний гибких стержней круглого сечения 108x4 мм длиной 2300 и 1200 мм. Было проведено четыре серии опытов с эксцентриситетами приложения нагрузки 10, 50, 100 мм для длины 2300 мм и 50 мм для длины 1200 мм.

Призменная прочность бетона составляла $R_b = 25,0$ МПа, а предел текучести стали $R_s = 300$ МПа. Модули упругости составляли для стали $E_s = 206000$ МПа и бетона $E_b = 25000$ МПа.

Результаты сопоставления сведены в таблицу 4.12.

Таблица 4.12 – Испытание стержней с одноосным эксцентриситетом [64]

№ стержня	A_{red} , см ²	$\bar{\lambda}_x$	m_x^0	ρ_x	R_s , МПа	R_b , МПа	ϵ_{max}	Φ_{eff}	$N_{обр}$, кН	$N_{эксп}$, кН	$\frac{N-N_3}{N_3} \cdot 100\%$
ВТБ -10/2300	27,5	2,465	0,56	1,80	304	25	1,3	0,499	384,7	397,3	-3,2%
ВТБ -50/2300	27,5	2,465	2,78	1,80	304	25	1,75	0,248	190,9	203,1	-6,0%
ВТБ -100/2300	27,5	2,465	5,56	1,80	304	25	1,7	0,151	116,2	115,8	0,3%
ВТБ -50/1200	27,5	2,465	2,78	1,80	304	25	2,5	0,326	250,7	298,2	-15,9%

Примечание: трубы $\varnothing 108 \times 4$ мм с расчетной длиной 230 и 120 см; $E_b = 25000$ МПа.

Сопоставляя экспериментальные и расчетные значения по устойчивости, можно сделать вывод об их удовлетворительной сходимости.

4.3 Сопоставление экспериментальных данных и численно-аналитического расчета запредельной работы трубобетонных элементов

Для сопоставления с экспериментальными данными были выбраны эксперименты *K. Cederwall* [68] и *G. Muciaccia* [93], так как в них лучше всего прослеживается работа трубобетонных стержней после потери устойчивости.

На рис. 4.6 – 4.9 представлены графики зависимости «прогиб-нагрузка» по результатам испытания 4-х стержней из табл. 4.5. На графиках стержни пронумерованы также, как в таблице. Непрерывной линией показаны данные расчета, а прерывистой – данные эксперимента.

На рис. 4.10 представлен график «прогиб – нагрузка» по результатам экспериментов *G. Muciaccia* в сопоставлении с расчетными данными.

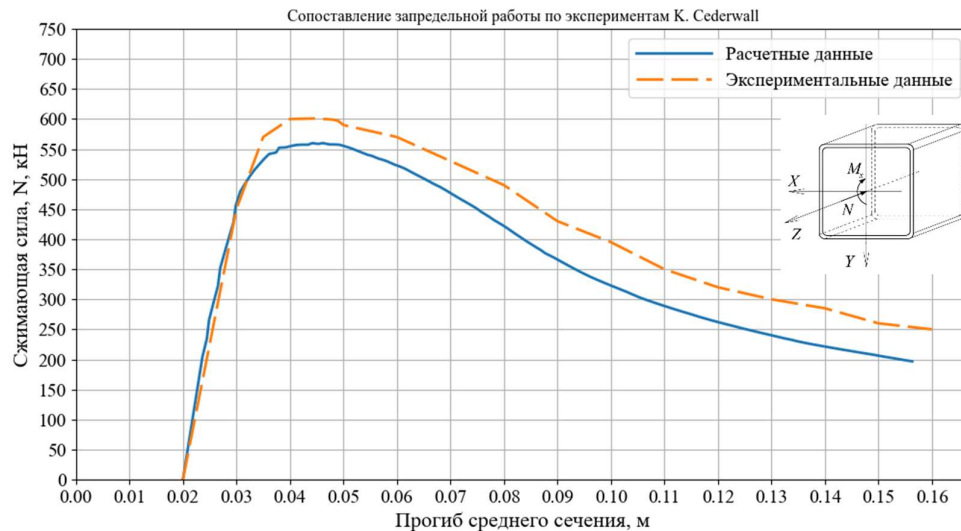


Рисунок 4.6 – График зависимости прогиб-нагрузка, мм, кН: стержень №1.

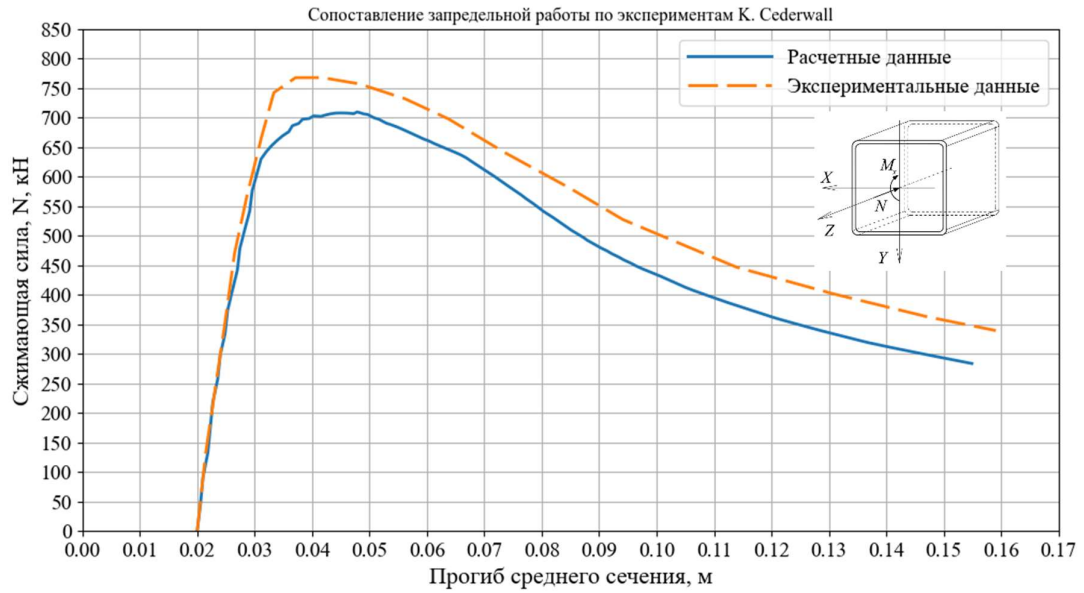


Рисунок 4.7 – График зависимости прогиб-нагрузка, мм, кН: стержень №3.

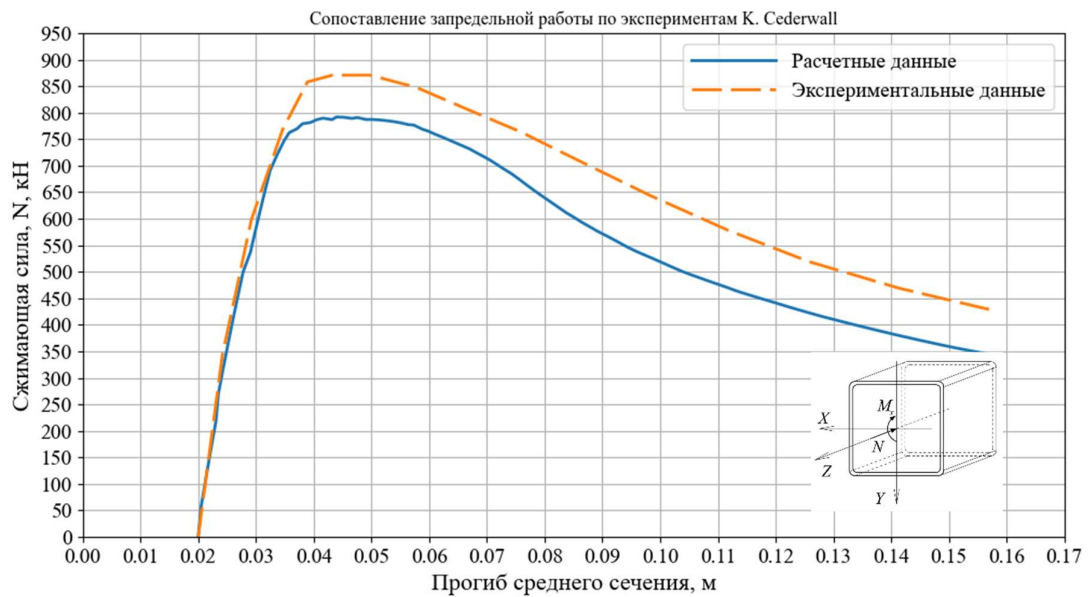


Рисунок 4.8 – График зависимости прогиб-нагрузка, мм, кН: стержень №7.

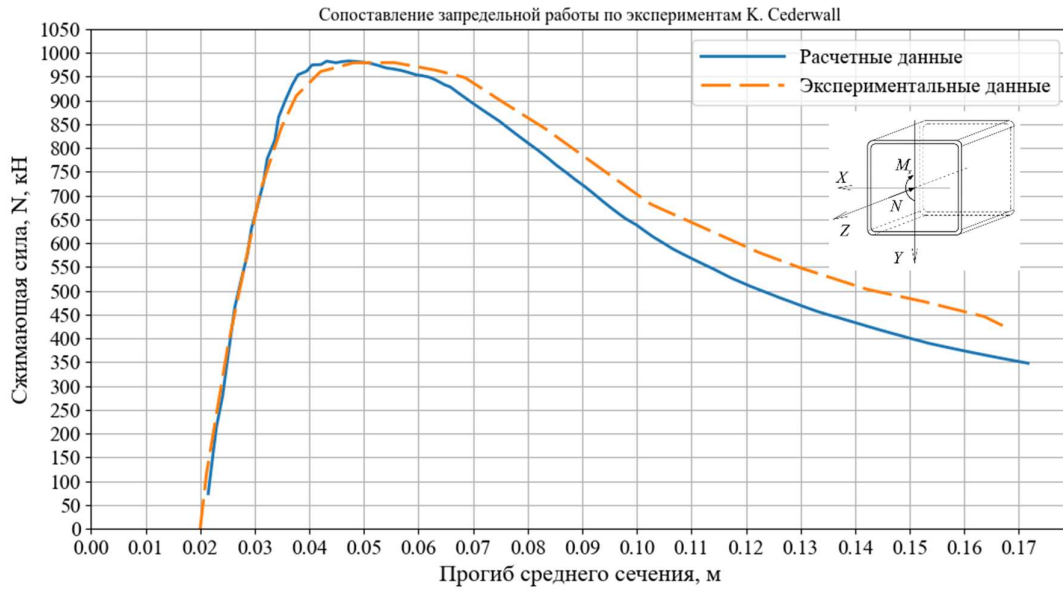


Рисунок 4.9 – График зависимости прогиб-нагрузка, мм, кН: стержень №9.

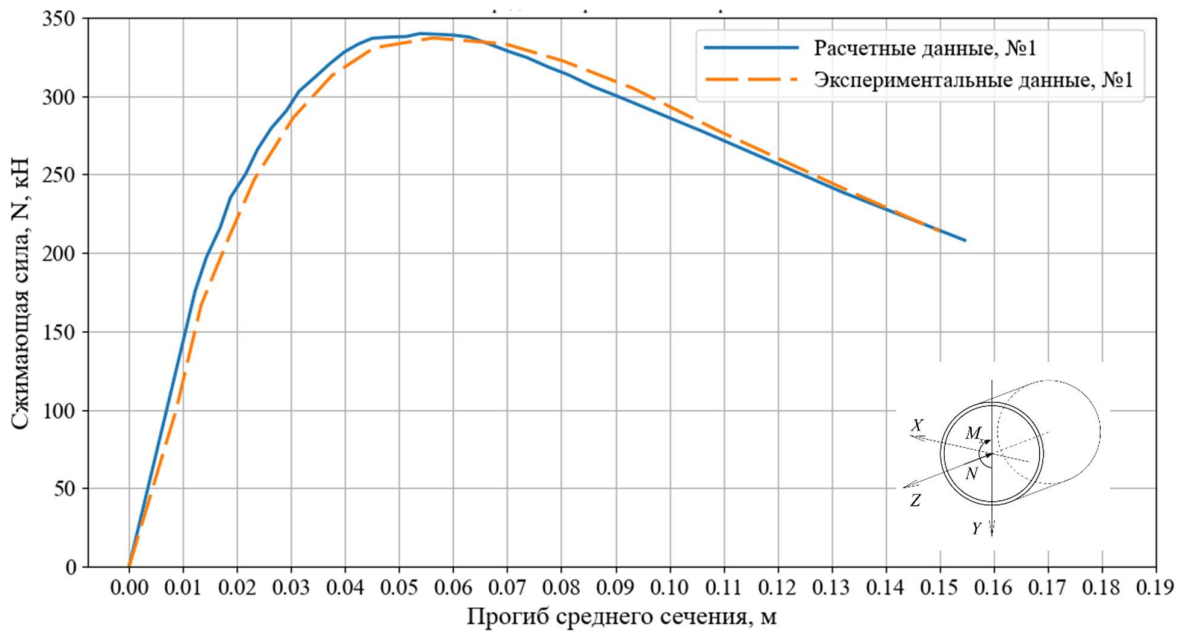


Рисунок 4.10 – График зависимости прогиб-нагрузка, мм, кН: сопоставление с расчетом.

Можно наблюдать, что характерные точки перегиба графика лежат на одних и тех же абсциссах, а характер изгиба графиков довольно сходный. Отсюда можно сделать вывод о том, что предлагаемый метод достоверно описывает поведение трубобетонных элементов в запредельном состоянии.

При этом также наблюдается, что расчетные графики лежат несколько ниже экспериментальных. Предположительно это связано с тем, что в методе расчета жесткость среднего сечения распространяется в запас на всю длину стержня. Также, в расчете использована общепринятая модель деформирования стержня по синусоиде. Однако, в гибких стержнях при наблюдается перераспределение напряжений за счет изломного типа потери устойчивости: среднее сечение стержня перемещается и деформируется сильнее, а участки, примыкающие к опорам, испытывают разгрузку [93] (см. рис. 4.11).

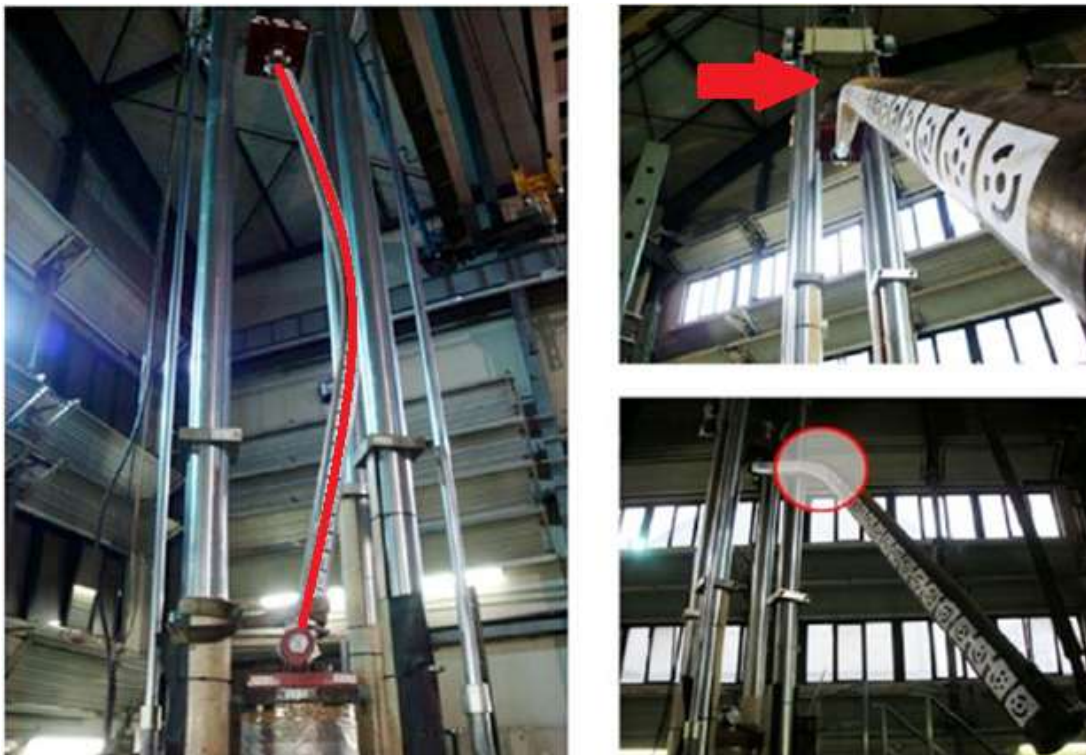


Рисунок 4.11 – Результаты испытания стержня NVC-440-1 [93].

4.4. Выводы по главе

1. Проведено сопоставление результатов расчетов по разработанному методу на прочность и устойчивость с многочисленными экспериментальными данными, полученными в разных странах и в разное время. Сопоставление их показало при расчете на прочность в подавляющем большинстве случаев (84%) удовлетворительную сходимость в пределах от -7,11% до 7,6%, при расчете на

устойчивость – в 70% случаев удовлетворительную сходимость в пределах от - 8,1% до 7,7%.

2. Сопоставление результатов расчетов по остаточной несущей способности после потери устойчивости с экспериментальными данными показало удовлетворительную сходимость нисходящей ветви графика зависимости несущей способности от роста деформаций. Расчет дает запас в пределах до 25%.

ГЛАВА 5. ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Предлагается инженерная методика расчета трубобетонных элементов при действии сжимающей силы с одноосным эксцентриситетом. Рассматриваются предельные и запредельные состояния по прочности и устойчивости.

5.1 Инженерная методика расчета на прочность трубобетонных элементов

В результате анализа данных, полученных из расчетов по разработанному методу, получен коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций и выключение из работы бетона в растянутой зоне

$$c_p = \bar{N}_{eff}(1 + m_x), \quad (5.1)$$

который используется в формуле (2.30):

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

Инженерную методику расчета построим в зависимости от следующих параметров:

- расчетных сопротивлений стали R_y и бетона R_b ;
- соотношения толщины трубы к ее внешнему диаметру t/D_p (для круглых сечений) или к высоте сечения t/H (для прямоугольных сечений);
- соотношения высоты сечения H к ширине B для прямоугольных труб;
- относительных эксцентриситетов m_x^0 .

Исследования трубобетонных элементов показали, что эффективными для ТБЭ являются бетоны класса В35 и выше [31, 37]. Следуя этим рекомендациям приняты классы бетона средней прочности в диапазоне В35-В100, а высокопрочные – В110-В150¹.

¹ СП 311.1325800.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции из высокопрочных бетонов. Правила проектирования». Минстрой России. URL: minstroyrf.gov.ru/docs/16231/ (дата обращения: 01.11.2023)

Отношение параметра t/D_p по нормам СП 266 лежит в диапазоне от 0,0064 до 0,046. Здесь под D_p понимается внешний диаметр трубы для круглых труб и высота сечения для прямоугольных ($D_p = H$).

Соотношение высоты сечения к ширине H/B принимается от 1 до 2 с шагом 0,25.

Относительные эксцентриситеты принимаются от 0,25 до 2,0 с шагом 0,25.

Перечисленные данные сведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры для аналитической функции C_p

Относительный эксцентриситет, m_x^0	0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0
Расчётное сопротивление стали, R_y	290; 330; 420; 560; 650
Расчётное сопротивление бетона, R_b	19,5; 27,5; 37; 44; 50; 54; 57
Отношение толщины трубы к диаметру (высоте сечения H), t/D_p (при $D_p = 0,15$ м)	0,0064; 0,0163; 0,0262; 0,0361; 0,046
Соотношение высоты сечения к ширине H/B (для прямоугольных сечений)	1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0

Аналитическая зависимость c_p применяется для соразмерных друг другу по прочности сталей и бетонов. Их сочетания приводятся в табл. 5.2 серым цветом.

Таблица 5.2 – Таблица применяемых сочетаний сталей и бетонов

		R_b , МПа						
		19,5	27,5	37	44	50	54	57
R_y , МПа	290	+	+	-	-	-	-	-
	330	+	+	+	-	-	-	-
	420	+	+	+	+	+	+	+
	560	-	+	+	+	+	+	+
	650	-	+	+	+	+	+	+

Трубобетонные элементы прямоугольного сечения

Зависимость коэффициента c_p от указанных параметров при действии продольной силы с изгибающими моментами в одной плоскости аппроксимируется функцией, приведенной в таблице 5.3. Формулу приведем для двух групп бетонов – от 19,5 МПа до 44 МПа и от 44 МПа до 57 МПа. Среднеквадратичное отклонение для данной функции составляет $R = 0,983$, что является приемлемым результатом.

Таблица 5.3 – Коэффициенты для вычисления c_p для прямоугольных сечений при действии силы с эксцентриситетом в одной плоскости

R_b	Формула (2.31)	
От 19,5 до 44 МПа	$c_p = 1,459 + 0,0767 \cdot \ln(m_x) + 0,0113 \cdot \bar{R}_b - 0,000063 \cdot \bar{R}_b^2 - 0,00097 \cdot \bar{R}_y + 0,136 \cdot \ln\left(\frac{t}{H}\right) + 0,0555 \cdot \frac{H}{B}$	(5.3)
От 44 до 57 МПа	$c_p = 0,558 + 0,609 \cdot \ln(m_x) + 0,0543 \cdot \bar{R}_b - 0,00053 \cdot \bar{R}_b^2 - 0,00125 \cdot \bar{R}_y + 0,115 \cdot \ln\left(\frac{t}{H}\right) + 0,0387 \cdot \frac{H}{B}$	(5.4)

Трубобетонные элементы круглого сечения

Зависимость коэффициента c_p от указанных параметров при действии продольной силы с изгибающими моментами в одной плоскости для бетонов с прочностью от 19,5 МПа до 44 МПа аппроксимируется функцией, приведенной в таблице 5.4. При этом среднеквадратичное отклонение для данной функции составляет $R = 0,975$, что является приемлемым результатом.

Таблица 5.4 – Коэффициенты для вычисления c_p для круглых сечений при действии силы с эксцентриситетом в одной плоскости

R_b	Формула (2.31)	
От 19,5 до 44 МПа	$c_p = 0,988 + 0,059 \cdot \ln(m_x) + 0,0067 \cdot \bar{R}_b - 0,0011 \cdot \bar{R}_y + 6,157 \cdot \left(\frac{t}{D_p}\right)$	(5.5)

Таким образом, получены аналитические зависимости для коэффициента c_p , предназначенные для практического решения задачи прочности трубобетонного элемента по формуле (2.31). Практическое решение реализовано для труб прямоугольного и круглого сечения, выполненных из стали различных марок, заполненных бетоном различного класса по прочности. При расчете учитывается действие продольной силы с изгибающим моментом в одной плоскости.

5.2 Инженерная методика расчета на устойчивость трубобетонных элементов

Инженерный расчет на устойчивость в привычном для инженера-проектировщика виде это определение фактического параметра загрузки по формуле

$$\frac{N_{eff}}{\varphi_{eff} \cdot A_{red} \cdot R_y} \leq 1. \quad (5.6)$$

Трубобетонные элементы – составные конструкции, поэтому выстроим зависимость φ_{eff} от (см. табл. 5.5)

- расчетного сопротивления стали R_y ;
- расчетного сопротивления бетона R_b ;
- соотношения t/D_p (t/H);
- относительного эксцентриситета m_x^0 ;
- приведенной гибкости $\bar{\lambda}_x$.

Таблица 5.5 – Рассмотренные типы стержней

Приведенная гибкость λ	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0
Относительный эксцентриситет, m_x^0	0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0
Предел текучести стали, R_y	290; 330; 420; 560; 650
Предел прочности бетона, R_b	19,5; 27,5; 37; 44; 50; 54; 57
Отношение толщины трубы к диаметру, t/D (при $D_p = 0,15$ м)	0,0064; 0,0163; 0,0262; 0,0361; 0,046

Гибкость трубобетонного элемента рассчитывается по формуле:

$$\bar{\lambda} = L_0 \sqrt{\frac{A_{red} R_y}{J_{red} E_y}}. \quad (5.7)$$

A_{red} – площадь сечения, приведенная к стали, J_{red} – момент инерции сечения, E_y – модуль упругости стали, L_0 – расчетная длина. Учитывается полная жесткость элемента, без понижающих коэффициентов.

Трубобетонные элементы прямоугольного сечения

Уравнение для фактического параметра загрузки приведем для труб квадратного сечения с $H/B = 1,0$.

Примем функцию для вычисления коэффициента φ_{eff} , приведенную в табл. 5.6. Среднеквадратичное отклонение для данной функции составляет $R=0,94$, что является приемлемым результатом.

Таблица 5.6 – Фактический параметр загрузки φ_{eff} для прямоугольных сечений

Фактический параметр загрузки		
R_b $\bar{\lambda}_x$	От 19,5 до 44 МПа	От 44 до 57 МПа
От 0,5 до 2,0	$\varphi_{eff} = 0,724 - 0,148 \cdot \ln(m_x) - 0,120 \cdot \ln(\bar{R}_y) +$ $+ 0,090 \cdot \ln(\bar{R}_b) + 6,946 \cdot \frac{t}{H} - 66,147 \left(\frac{t}{H}\right)^2$ $+ 0,027 \cdot \frac{H}{B} - 0,053 \cdot \bar{\lambda}_x$	$\varphi_{eff} = 0,596 - 0,157 \cdot \ln(m_x) - 0,00044 \cdot \bar{R}_y +$ $- 0,00045 \cdot \bar{R}_b + 5,494 \cdot \frac{t}{H} - 44,494 \left(\frac{t}{H}\right)^2 + 0,0215 \cdot \frac{H}{B}$ $- 0,040 \cdot \bar{\lambda}_x$
От 2,5 до 4,0	$\varphi_{eff} = 0,399 - 0,106 \cdot \ln(m_x) - 0,00008 \cdot \bar{R}_y +$ $+ 0,0019 \cdot \bar{R}_b + 5,812 \cdot \frac{t}{H} - 60,305 \left(\frac{t}{H}\right)^2 + 0,015$ $\cdot \frac{H}{B} - 0,227 \cdot \ln(\bar{\lambda}_x)$	$\varphi_{eff} = 1,240 - 0,122 \cdot \ln(m_x) - 0,122 \cdot \ln(\bar{R}_y) +$ $- 0,0096 \cdot \ln(\bar{R}_b) + 4,656 \cdot \frac{t}{H} - 43,823 \left(\frac{t}{H}\right)^2 + 0,111$ $\cdot \frac{H}{B} - 0,072 \cdot \bar{\lambda}_x$

Трубобетонные элементы круглого сечения

Примем функцию для вычисления коэффициента φ_{eff} , приведенную в табл. 5.7 для $R_b = 19,5 \dots 44$ МПа. Среднеквадратичное отклонение для данной функции составляет $R=0,94$, что является приемлемым результатом.

Таблица 5.7 – Фактический параметр загрузки φ_{eff} для круглых сечений

Приведенная гибкость $\bar{\lambda}$	Фактический параметр загрузки	
0,5-2,0	$\varphi_{eff} = 0,813 - 0,172 \cdot \ln(m_x) +$ $0,0033 \cdot R_b - 0,00037 \cdot R_y + 0,0683 \cdot \ln\left(\frac{t_p}{D_p}\right) - 0,0692 \cdot \bar{\lambda}_x$	(5.8)
2,5-4,0	$\varphi_{eff} = 0,687 - 0,094 \cdot \ln(m_x) +$ $0,00148 \cdot R_b - 0,000155 \cdot R_y + 0,0478 \cdot \ln\left(\frac{t_p}{D_p}\right) - 0,0663 \cdot \bar{\lambda}_x$	(5.9)

5.3 Инженерная методика расчета остаточной несущей способности в запредельном состоянии

ТБЭ прямоугольного поперечного сечения после потери прочности

Получим аналитические функции остаточной несущей способности \bar{N}_{eff} при расчете на прочность от $m_x^0, R_b, R_y, t/H$.

Среднеквадратичное отклонение для данной функции составляет $R=0,97$, что является приемлемым результатом. Аналитическая функция приводится в табл. 5.8.

Таблица 5.8 – Фактический параметр загрузки $\bar{N}_{eff,ост.}$

Прочность бетона на сжатие	Фактический параметр загрузки	
$R_b = 19,5 - 57 \text{ МПа}$	$\bar{N}_{eff,ост.} = 1,858 + 0,047Ln(m_x) - 0,183Ln(R_b) + 0,0007R_y + 0,238Ln\left(\frac{t}{H}\right)$	(5.10)

ТБЭ круглого поперечного сечения после потери прочности

Получим аналитические функции остаточной несущей способности $\bar{N}_{eff,ост.}$ при расчете на прочность от $m_x^0, R_b, R_y, t/D_p$.

. Среднеквадратичное отклонение для данной функции составляет $R=0,95$, что является приемлемым результатом. Аналитическая функция приводится в табл. 5.9.

Таблица 5.9 – Фактический параметр загрузки $\bar{N}_{eff,ост.}$

Относительный эксцентриситет	Фактический параметр загрузки	
$m_x = 0,25 \dots 0,75$	$\bar{N}_{eff,ост.} = 1,597 + 0,217m_x - 0,179Ln(R_b) + 0,0004R_y + 0,194Ln\left(\frac{t}{D_p}\right)$	(5.11)
$m_x = 0,75 \dots 2,0$	$\bar{N}_{eff,ост.} = 1,903 + 0,053m_x - 0,208Ln(R_b) + 0,0007R_y + 0,238Ln\left(\frac{t}{D_p}\right)$	(5.12)

ТБЭ прямоугольного поперечного сечения после потери устойчивости

Получим аналитические функции фактического параметра загрузки для остаточной несущей способности $\varphi_{eff,ост.}$ при расчете устойчивости от $\bar{\lambda}_x, m_x^0, R_b, R_y, t/H$. Среднеквадратичное отклонение для данной функции составляет $R=0,91$, что является приемлемым результатом. Аналитическая функция приводится в табл. 5.10.

Таблица 5.10 – Фактический параметр нагружения $\varphi_{eff,ост}$.

Прочность бетона на сжатие	Фактический параметр нагружения	
$R_b = 19,5 \dots 44$ МПа $R_s = 290 \dots 420$ МПа	$\varphi_{eff,ост} = -0,408 + 0,046Ln(m_x^0) - 0,083Ln(R_b) + 0,253Ln(R_y) + 0,088Ln\left(\frac{t}{H}\right) - 0,257Ln(\bar{\lambda}_x)$	(5.13)

ТБЭ круглого поперечного сечения после потери устойчивости

Получим аналитические функции фактического параметра нагружения для остаточной несущей способности φ_{eff} при расчете устойчивости от $\bar{\lambda}_x$, m_x^0 , R_b , R_y , t/D_p . Среднеквадратичное отклонение для данной функции составляет $R=0,85$, что является приемлемым результатом. Аналитическая функция приводится в табл. 5.11.

Таблица 5.11 – Фактический параметр нагружения $\varphi_{eff,ост}$.

Прочность бетона на сжатие	Фактический параметр нагружения	
$R_b = 19,5 \dots 44$ МПа $R_s = 290 \dots 420$ МПа	$\varphi_{eff,ост} = -0,259 + 0,045Ln(m_x^0) - 0,065Ln(R_b) + 0,240Ln(R_y) + 0,122Ln\left(\frac{t}{D_p}\right) - 0,265Ln(\bar{\lambda}_x)$	(5.14)

Зависимость фактического параметра нагружения от деформаций находится по формуле:

$$\varphi_{ост} = A + B * \frac{1}{\bar{\varepsilon}}. \quad (5.15)$$

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

- при расчете прочности:

$$\left. \begin{aligned} A + B * \frac{1}{\bar{\varepsilon}_{b2}} &= c_p / (1 + m_{x0}) \\ A + B * \frac{1}{\bar{\varepsilon}_{max}} &= \bar{N}_{eff,ост}. \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

- при расчете устойчивости:

$$\left. \begin{aligned} A + B * \frac{1}{\bar{\varepsilon}_{lim}} &= \varphi_{eff} \\ A + B * \frac{1}{\bar{\varepsilon}_{max}} &= \varphi_{eff,ост}. \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

$$\text{где } \bar{\varepsilon}_{lim} = 2,05 - 0,0011 * R_y - 0,197 * \bar{\lambda}.$$

Графически зависимость фактического параметра остаточной несущей способности от относительных деформаций представлена на рис. 5.1а, б.

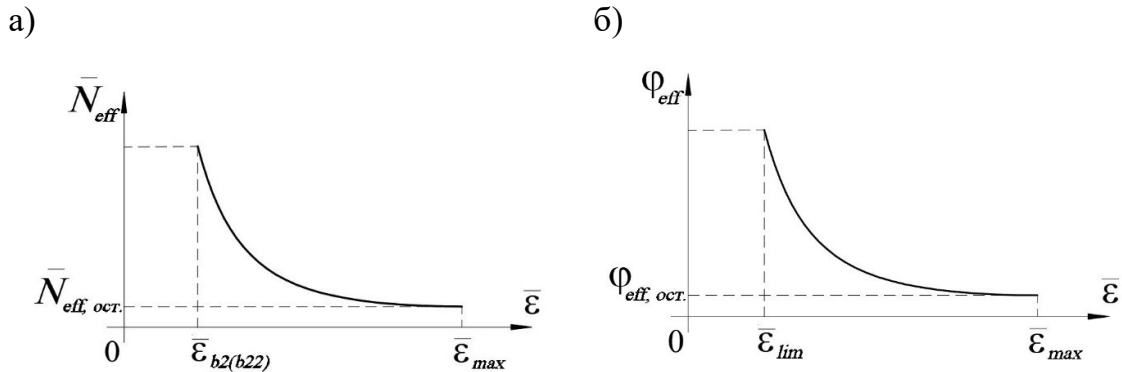


Рисунок 5.1 – Зависимость фактического параметра остаточной несущей способности от относительных деформаций

5.4 Выводы по главе 5

1. На основании анализа полученных результатов исследования разработана методика практического расчета на прочность и устойчивость трубобетонных элементов, учитывающая геометрические и механические соотношения параметров стальной трубы и бетона (прочности материалов, относительной толщины стенки трубы, гибкости элементов), а также величину относительного эксцентриситета продольной силы.

2. Приведена зависимость остаточной несущей способности в запредельных состояниях по прочности и устойчивости от механических и геометрических характеристик ТБЭ. Приводятся практические рекомендации по определению остаточной несущей способности после потери прочности и устойчивости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обратный метод расчета стальных элементов обобщен на трубобетонные, что позволило избавиться от излишних многочисленных итерационных процессов, сократить время расчета и получить новые данные характеристиках НДС ТБЭ в запредельных стадиях сопротивления. Расчет выполняется по фактической жесткости трубобетонных элементов с приведением характеристик сечения к стали трубы с 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 при нарушении равновесия деформированного состояния, позволяет получать некоторые резервы устойчивости в пределах 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 от 13 до 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 от 11% до 50% от изначальной и зависит от геометрических и механических параметров бетона и стали.

6. На основании анализа полученных результатов исследования разработаны практические рекомендации по расчету на прочность, устойчивость и остаточную несущую способность в зависимости от характеристик материалов и сечения, гибкости ТБЭ и относительного эксцентриситета приложения нагрузки.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акаев А.И., Магомедов М.Г., Пайзулаев М.М. Перспективы возведения сейсмостойких зданий из трубобетонных конструкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (1):138-149. – DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-1-138-149
2. Аль-Саеди Х.Х.Х. Прочность трубобетона при внецентренном сжатии: дисс. ...канд. тех. наук : 05.23.01/ Хамид Халаф Хассан Аль-Саеди. – Минск, 1988. – 113 с.
3. Астафьева М.А. Прочность сталебетонных колонн со спиральным армированием бетона : Дис. канд. техн. наук. Магнитогорск, 2019. 143 с.
4. Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутого профиля: дисс. ... канд. тех. наук : 05.23.01/ Иван Витальевич Астахов. – Санкт-Петербург, 2006. – 123 с.
5. Афанасьев А.А., Курочкин А.В. Трубобетонные конструкции для возведения каркасных зданий/ А.А. Афанасьев, А.В. Курочкин//Строительные науки. –2016. – №2. – С. 113-118.
6. Кришан А.Л. Рекомендации по проектированию трубобетонных колонн круглого и кольцевого сечения [Электронный ресурс]: учебное пособие. ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова». – Магнитогорск. – 2017. – 145 с.
7. Белый Г.И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений // Вестник гражданских инженеров. 2020 №6 (83). С. 46–55.
8. Ведерникова А.А. Численные исследования трубобетонных элементов при внецентренном сжатии // Инженерный вестник Дона. – 2022. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8013 (дата обращения: 05.05.2025).

9. Гаранжа И.М. Численные исследования напряженно-деформированного состояния многогранных металлических стоек / А. П. Пустовгар, И. М. Гаранжа, Л. А. Шилова, А. О. Адамцевич // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 9. – С. 10-18.
10. Белый Г.И. Развитие методов расчета стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружения // Вестник гражданских инженеров. 2020. №3(80). С. 43–54.
11. Белый Г.И., Смирнов М.О. Обратный численно-аналитический метод расчета стержневых элементов ЛСТК // Промышленное и гражданское строительство. 2021. №3. С. 57-68.
12. 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).
13. Белый, Г. И. Запредельная несущая способность стержневых элементов стальных конструкций / Г. И. Белый, А. И. Гарипов // Международный строительный конгресс. Наука. Инновации. Цели. Строительство : Сборник тезисов докладов, Москва, 11–13 апреля 2023 года. – Москва: АО «НИЦ «Строительство», 2023. – С. 195-196.
14. Белый, Г. И. Расчет на устойчивость решетчатых элементов стальных конструкций / Г. И. Белый // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 10. – С. 1347-1357. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.10.1347-1357
15. 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.

16. Березкина А. Ю. Стержневые конструкции из сталежелезобетона / А.Ю. Березкина, С.О. Постанен, М.О. Постанен// Молодой ученый. – 2016. –№26. – URL: <https://moluch.ru/archive/130/36141/> (дата обращения: 05.05.2025).
17. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия, [Текст], СТБ 1544-2005, Технический комитет по техническому нормированию и стандартизации в строительстве "Бетонные и железобетонные конструкции, бетоны и растворы" (ТК 08), Научно-проектно-производственное республиканское унитарное предприятие "Стройтехнорм" (РУП "Стройтехнорм") Минск : Минстройархитектуры , 2005 .– 17 с.
18. Бруйка В.А. Инженерный анализ в *ANSYS Workbench*: учеб. пособ. В 2-х частях/ В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусов, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
19. Ведерникова, А. А. Численно-аналитический расчет устойчивости внецентренно сжатых трубобетонных стержней круглого и квадратного сечения / А. А. Ведерникова // Вестник СевКавГТИ. – 2017. – № 3(30). – С. 112-118.
20. Гаранжа И.М. Обзор научных исследований в области изучения напряженно-деформированного состояния трубобетонных конструкций/ И.М. Гаранжа, С. Иборра-Чорро //Металлические конструкции. – 2015. – №3 (21). – С. 199-133.
21. Джонсон Р.П. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4. Проектирование сталежелезобетонных конструкций EN 1994-1-1. М.: МГСУ, 2013. – 414 с.
22. Долженко А.А. Трубчатая арматура в железобетоне: дисс. ...док. тех. Наук/ А.А. Долженко. – Воронеж, 1963. – 413 с.
23. Что посетить в Каменске Уральском. URL: <https://www.uralweb.ru/urals/ural/7749-что-посмотреть-в-каменске-уральском-afisha-sobytiy-na-2019-god.html> (дата обращения: 05.05.2025).

24. Ефимов В.П. Прочность и устойчивость комбинированных. сквозных элементов из стальных труб, заполненных бетоном: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01/ Владимир Петрович Ефимов. – Таллин, 1989. – 23 с.
25. Ефимов В.П. Упрощенная методика расчета несущей способности внецентренно сжатых трубобетонных колонн/В.П. Ефимов// Новые методы расчета строительных конструкций. Межвузовский тематический сборник трудов. Л.: ЛИСИ. – 1983. – С. 42-52.
26. Жиренков А.Н. Деформирование и прочность обычного тяжелого бетона при сложном напряженном состоянии: автореферат дисс. ...канд. тех. наук : 01.02.04/ Александр Николаевич Жиренков. – М., 2009. – 27 с.
27. Здание «Two Union Square» URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Two_Union_Square_2.jpg (дата обращения: 05.05.2025).
28. Кебенко В.Н. Оптимизация параметров сжатых и внецентренно сжатых трубобетонных элементов и конструкций: дисс. ...канд. тех. наук : 05.23.01 / Виктор Николаевич Кебенко. – Кривой Рог, 1982. – 170.
29. Кикин А.И. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном/ А.И. Кикин, В.А. Трулль, Р.С. Санжаровский. – М.: Стройиздат, 1974. – 144 с.
30. Клованич С.Ф., Малышко Л. Нелинейные модели материалов в строительной механике / С.Ф. Клованич, Л. Малышко. – Одесса: ОНМУ, 2017. – 125 с.
31. Кришан А. Л. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика: монография / А. Л. Кришан, В. И. Римшин, М. А. Астафьева. – М. : АСВ, 2020. – 321 с.
32. Кришан А.Л. Прочность трубобетонных колонн квадратного сечения при осевом сжатии/ А.Л. Кришан, А.С. Мельничук// вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2012. – №3. – С. 51-54.

33. Кришан А.Л. Реализация нелинейной деформационной модели при расчете прочности трубобетонных колонн/ А.Л. Кришан, А.С. Мельничук, А.И. Сагадатов // Предотвращение аварий зданий и сооружений. Электронный журнал. - – URL: <http://www.pamag.ru/prensa/non-linear-def-mod> (дата обращения: 05.05.2025).
34. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А., Ступак А.А., С.М. Анпилов Учет гибкости при расчете прочности центрально сжатых трубобетонных колонн квадратного сечения // Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции. – 2023. – № 4 (108). – С. 47-56.
35. Кришан, А.Л. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром: диссертация ... доктора технических наук : 05.23.01 /Анатолий Леонидович Кришан. – Магнитогорск, 2011. – 380 с.
36. Кришан А. Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/trubobetonnye-kolonny-dlya-mногоetazhnyh-zdaniy> (дата обращения: 02.05.2025).
37. Кузнецов К.С. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым ядром из высокопрочного бетона: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01/ Константин Сергеевич Кузнецов. – Магнитогорск, 2007. – 152 с.
38. Банк «Санкт-Петербург» теперь в Telegram. URL: <https://spark.ru/startup/spark-news/blog/79042/bank-sankt-peterburg-teper-v-telegram> (дата обращения: 05.05.2025).
39. Лукша Л.К. Исследование прочности и пластичности бетона в условиях стесненной поперечной деформации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01/ Леонид Константинович Лукша. – Минск, 1962. – 21 с.
40. Лукша Л.К. Прочность трубобетона/ Л.К. Лукша. – Минск: Вышэйшая школа, 1977. – 96 с.

41. Маракуца В.И. Прочность и устойчивость трубобетонных элементов при кратковременном и длительном нагружении: дисс. ...канд. тех. наук : 05.23.01 / В. И. Маракуца. – Киев, 1969. – 256 с.
42. Мартиросян А.С. Экспериментальные исследования и эффективные методы расчета несущей способности высокопрочных сталежелезобетонных колонн с жесткой арматурой: дисс. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / Анна Сергеевна Мартиросян. – М., 2017. – 164 с.
43. Мельничук А.С. Прочность коротких трубобетонных колонн квадратного поперечного сечения: дисс. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / Александр Станиславович Мельничук. – Казань, 2014. – 150 с.
44. Овчинников И.И. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 2. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой/ И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков, Евгений Сергеевич Малдыхин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ», Том 7, №4 – 2015, с. 1-29 с.
45. Пинский В.В. Несущая способность элементов и узлов из трубобетона: дис. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / Василий Васильевич Пинский. – Киев, 1988. – 250 с.
46. Пичугин С.Н. Прочность и устойчивость стержневых элементов конструкций из гнутосварных профилей: дисс. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / Сергей Николаевич Пичугин. – Ленинград, 1985. – 159 с.
47. Резван И.В. Несущая способность бетонного ядра трубобетонных колонн/ И.В. Резван, Д.Р. Маилян// Вестник Майкопского государственного технологического университета. – 2011. – №3. – С. 10-19.
48. Римшин В.И. Исследования несущей способности внецентренно сжатых сталетрубобетонных колонн / В. И. Римшин, М. Н. Семенова, И. Л. Шубин [и др.] // Строительные материалы. – 2022. – № 6. – С. 8-14. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-803-6-8-14.

49. Росновский В.А. Трубобетон в мостостроении /В.А. Росновский. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – 109 с.
50. Сагадатов А.И. Напряженно-деформированное состояние сжатых трубобетонных элементов с внутренним стальным сердечником: диссертация ... кандидата технических наук: 05.23.01 / Азат Ирекович Сагадатов. – Магнитогорск, 2006. – 180 с.
51. Санжаровский Р.С. Теория и расчет прочности и устойчивости элементов конструкций из стальных труб, заполненных бетоном: дисс. ... док. тех. наук : 05.23.01 / Рудольф Сергеевич Санжаровский. – М, 1977. – 453 с.
52. Сахаров А.А. Несущая способность трубобетонных элементов с бетоном, твердеющим под давлением: дисс. ... канд. тех. наук: 05.23.01 / Андрей Александрович Сахаров. – Самара, 1999. – 184 с.
53. Стороженко Л.И. Работа под нагрузкой сжатых трубобетонных элементов с усиленными ядрами/Л.И. Стороженко, Е.А. Ермоленко, О.В. Демченко//Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: Сборник научных статей XIX Международного научного семинара. – Брест: БрГТУ, 2014. – Ч. 1 – с. 231-236.
54. Стороженко Л.И. Расчет трубобетонных конструкций / Л.И. Стороженко, П.И. Плахотный, А.Я. Черный. – Киев: Будивельник, 1991. – 120 с.
55. Теличко В.Г. Исследование прочности при двухосном сжатии бетона В25/ В.Г. Теличко, Л.А. Зиборов//Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула, 2009. – С. 89-94.
56. Тихоненко Ю.Н., Беседин Г.М., Кадочникова Г.Н., Фурсов В.В. Теоретические и экспериментальные работы гнутых профилей с учетом собственных напряжений // Реф. информ. Проектирование металлических конструкций. М.: ЦНИС, 1969. – Вып. 7 (15). – С. 93–101.
57. ТКП EN 1994-1-1-2009 (02250) Еврокод 4. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для

зданий. – Минск: Министерство архитектуры и строительства республики Беларусь, 2010. – 107 с.

58. Тришевский Н.С., Гаммерштейн В.А., Акимов В.П. Упрощенная методика определения механических свойств холодногнутой профили // Высокоэкономичные гнутые профили проката. – М. 1965. – С. 197-201.

59. Харченко С.А. Напряженно-деформированное состояние трубобетонных элементов с упрочненными ядрами: дисс. ... канд. тех. наук: 05.23.01. – Кривой Рог, 1986. – 193 с.

60. Цай Шаохуай. Новейший опыт применения трубобетона в КНР // Бетон и железобетон. – 2001. №3. – С. 20-24

61. Цыгулев Д.В. Устойчивость трубобетонных элементов прямоугольного сечения, сжатых с двухосными эксцентриситетами: дисс. ...канд. тех. наук : 05.23.01 / Денис Владимирович Цыгулев. – Усть-Каменогорск, 1999. – 174 с.

62. Чэнь Т. Тенденции развития мостостроения в Китайской народной республике/Т. Чэнь, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников// Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2015. – №3. – С. 107-119.

63. Шеховцов В.А. Экспериментально-теоретическое исследование устойчивости сжато-изогнутых комплексных стержневых элементов конструкций в упругопластической стадии работы: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Вячеслав Афанасьевич Шеховцов.– Л., 1981. – 24 с.

64. Яровой И.С. Исследование напряженно-деформированного состояния гибких внецентренно сжатых трубобетонных элементов при кратковременном и длительном действии нагрузки: Дис. канд. техн. Наук. – Кривой Рог, 1974. – 195 с.

65. Kamil M.G. Fiber element simulation of interaction behavior of local and global buckling in axially loaded rectangular concrete-filled steel tubular slender columns under fire exposure/ M.G. Kamil, Q.Q. Liang, M.N.S. Hadi // Thin-Walled Structures. – 2019. – V. 145. – Pp. 106403. – <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106403>

66. Bao J.Q. A new generalized Drucker-Prager flow rule for concrete under compression/ J. Q. Bao// *Engineering Structures*/ – 2013. – №56. – Pp. 2076-2082.
67. Bradford M.A. Design of slender concrete-filled rectangular steel tubes/M.A. Bradford, S.H. Nguen//studies from the School of Civil Engineering. UNICIV report No. R-326. – Kensington, 1994. – 21 c.
68. Cederwall K., Engstrom B., Grauers M. High-strength concrete used in composite columns // *ACI Symposium Publication*. – №121. – <https://doi.org/10.14359/2838>.
69. Choi Y.-H. New approach to AISC P–M interaction curve for square concrete filled tube (CFT) beam–columns/ Y.-H. Choi, D.A. Foutch, J.M. LaFave//*Engineering Structures*. – 2006. - №28. – C. 1586–1598.
70. Du Y. Ultimate resistance behavior of rectangular concrete-filled tubular beam-columns made of high-strength steel// Chen Z., Wang Y., Liew R.// *Journal of Constructional Steel Research*. – 2017. – №133. – C. 418–433.
71. Ellobody E. Experimental investigation of eccentrically loaded fibre reinforced concrete-filled stainless steel tubular columns/ E. Ellobody, M.F. Ghazy//*Journal of Constructional Steel Research*. – 2012. - №86. – C. 167-176.
72. Ellobody E. Numerical modelling of fibre reinforced concrete-filled stainless steel tubular columns//*Thin-Walled Structures*. – 2013. – №63. – C. 1–12.
73. Fujimoto T. Behavior of Eccentrically Loaded Concrete-Filled Steel Tubular Columns/ T. Fujimoto; A. Mukai; I. Nishiyama; K. Sakino//*Journal of Structural Engineering*. – 2004. - №130. – C. 203-212.
74. Furlong R.W. Strength of steel-encased concrete beam columns // *Journal of the Structural division Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 1967. – №93(5). – Pp. 113-124.
75. Gourley B. C. A synopsis of studies of the monotonic and cyclic behavior of concrete filled steel tube beam-column. Structural Engineering Report No. ST-01-4/

- Gourley B. C., Tort C., Hajjar J. F., Schiller P. H./ Department of Civil Engineering, Institute of Technology, University of Minnesota, USA, 2001. – 269 с.
76. Guochang Li, Bowen Chen, Zhijian Yang, Yihe Feng. Experimental and numerical behaviour of eccentrically loaded high strength concrete filled high strength square steel tube stub columns // *Thin-Walled Structures*. 2018. No. 127. Pp. 483–499.
77. Guochang Li, Bowen Chen, Zhijian Yang, Yihe Feng. Experimental and numerical behaviour of eccentrically loaded high strength concrete filled high strength square steel tube stub columns // *Thin-Walled Structures*. – 2018. – No. 127. – Pp. 483–499.
78. Hadi M. High strength thin-walled rectangular concrete-filled tubular slender beam-columns, Part II: Behaviour/ Hadi M., Liang Q.Q., Patel V.I. // *Journal of Constructional Steel Research*, 2012. – 32 с. – URL: <http://ro.uow.edu.au/engpapers/4324/> (дата обращения: 05.05.2025).
79. Hatzigeorgiou G.D. Numerical model for the behavior and capacity of circular CFT columns, Part II: Verification and extension/ G.D. Hatzigeorgiou // *Engineering Structures*. – 2008. – №30. – С. 1579-1589.
80. Hua H. Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending moment in combination/H. Hua, C. Huangb, Z. Chen//*Journal of Constructional Steel Research*. – 2005. – №61. – С. 1692–1712.
81. Hunaiti Y. Experimental Evaluation of the Effect of Bond on the Maximum Capacity of Composite Columns/ Y. Hunaiti, M. Wakabayashi, K. Masuo //*Journal of Constructional Steel Research*. – 1992. - №22. – С. 39-55.
82. Islam Md. M. Finite element analysis of steel fiber reinforced concrete (SFRC): validation of experimental shear capacities of beams/Md. M. Islam// *Procedia Engineering*. – 2014. – №90 – С.89-95.
83. Jiang J.-F. Identification of material parameters for Drucker-Prager plasticity model FRP confined circular concrete columns/ J.-F. Jiang, Y.-F. Wu //*International Journal of Solids and Structures*. – 2012. – №49. – С. 445-456.

84. Kazzen K.W. Corner Properties of Cold-Formed Shapes // J. of the Struct. Div., Proc. of the ASCE. – 1967. – Vol. 93. – No STI, Feb. – Pp.401–432.
85. Lai Z. Effective stress-strain relationships for analysis of noncompact and slender filled composite (CFT) members/ Z. Lai, A.H. Varma //Engineering Structures. – 2016. – № 124 – С. 457–472.
86. Lai Z. Experimental database, analysis and design of noncompact and slender concrete-filled steel tube (CFT) members. Open Access Dissertations. – 314 с. URL: http://docs.lib.purdue.edu/open_access_dissertations/314 (дата обращения: 05.05.2025).
87. Leon R. Concrete-Filled Tubes Columns and Beam-Columns: A Database for the AISC 2005 and 2010 Specifications/ R. Leon, T. Perea, J. Hajjar, M. Denavit. – URL: <http://businessdocbox.com/Construction/69076363-Concrete-filled-tubes-columns-and-beam-columns-a-database-for-the-aisc-2005-and-2010-specifications.html> (дата обращения: 05.05.2025).
88. Liew J.Y. R., Xiong M., Xiong D. Design of Concrete Filled Tubular Beam-columns with High Strength Steel and Concrete // Structures. – 2016. – №8. Ч. 2. – С. 213-226. – DOI:10.1016/j.istruc.2016.05.005.
89. Liu D. Behaviour of eccentrically loaded high-strength rectangular concrete-filled steel tubular columns/ D. Liu // Journal of Constructional Steel Research. – 2006. – №62 – С. 839-846.
90. Lu F.W. A study on the behavior of eccentrically compressed square concrete-filled steel tube columns/ F.W. Lu, S.P. Li, G. Sun //Journal of Constructional Steel Research. – 2007. - №63. – С. 941–948.
91. Bradford M.A., Loh H.Y., Uy B. Slenderness limits for filled circular steel tubes//Journal of Constructional Steel Research. – 2002. – No. 58 – Pp. 243–252.
92. Mou T., Fan B., Tian B., Tao Q. Scheme design of a 530m CFST arch bridge--the First Yangtze River Bridge in Hejiang, Sichuan, China // ARCH'10 – 6th

International Conference on Arch Bridges. College of Civil Engineering, Fuzhou University on 11-13 October 2010. – Pp. 113-119.

93. Muciaccia G., Giussani F., Rosati G., Mola F. Response of self-compacting concrete filled tubes under eccentric compression // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2011. No. 67 – Pp. 904–916.

94. Mursi M. Strength of slender concrete filled high strength steel box columns/ M. Mursi, B. Uy // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2004. – №60 – Pp. 1825–1848.

95. Nishiyama I. Summary of research on concrete-filled structural steel tube column system carried out under the US-Japan cooperative research program on composite and hybrid structures./S. Morino, K. Sakino, H. Nakahara, T. Fujimoto, A. Mukai, E. Inai, M. Kai и др.// *BRI Research paper No. 147*. – 2002. – 176 с. – URL: <https://www.kenken.go.jp/english/contents/publications/paper/pdf/147.pdf>. (дата обращения: 05.05.2025).

96. Yang Y.-F., Han L.-H. Behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) stub columns under eccentric partial compression/ Yang Y.-F., Han L.-H. // *Thin-Walled Structures*. – 2011. – №49. – С. 379–395.

97. O'Shea M. D., Bridge R. Q. Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes // *Journal of Structural Engineering*. – 2000. – Т. 126. – №. 11. – С. 1295-1303.

98. Perea T., Leon R. Behavior of composite CFT beam-columns based on nonlinear fiber analysis/ T. Perea, R. Leon // *International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete*. – 2008. – Режим доступа: [https://doi.org/10.1061/41142\(396\)20](https://doi.org/10.1061/41142(396)20).

99. Portolés J.M. Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading/ Portolés J.M., Romero M.L., Bonet J.L., Filippou F.C. // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2011. – №67. – С. 623–633.

100. Schiller P.H., Hajjar J.F. A Distributed Plasticity Formulation for Three-Dimensional Rectangular Concrete-Filled Steel Tube Beam-Columns and Composite

Frames // Structural Engineering Report No. ST-96-5. Dept. of Civil Engineering, Institute of Technology, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota. – 2008. – 371 p.

101. Schnabl S., Jelenić G., Planinc I. Analytical buckling of slender circular concrete-filled steel tubular columns with compliant interfaces/ S. Schnabl, G. Jelenić, I. Planinc // Journal of Constructional Steel Research. – 2015. – №115 – C. 252–262.

102. Shakir-Khalil H. Composite Shell Columns/ H. Shakir-Khalil // IABSE reports. – 1990. – №60. – C. 641-646.

103. Shakir-Khalil H., Moili M. Further tests on concrete-filled rectangular hollow-section columns // The Structural Engineer. – 1989. – V. 68. – No. 20/16. – Pp. 405–413.

104. Shakir-Khalil H., Zegnicher J. Experimental behavior of concrete-filled rolled rectangular hollow-section columns // The Structural Engineer. – 1989. – V. 67. – No. 19/3. – Pp. 346–353.

105. Su, M.N., Cai, Y.C., Chen, X.R., Young, B. Behaviour of Concrete-filled Cold-formed High Strength Steel Circular Stub Columns, Thin-Walled Structures. – 2020. – No. 157. – Pp. 107078. URL: <https://www.researchgate.net/publication/346061094> (дата обращения: 05.05.2025).

106. Thompson M.K., Thompson J.M. ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis. – London: Butterworth-Heinemann, 2017. – 466 с.

107. Tokgoz S. Experimental study on steel tubular columns in-filled with plain and steel fiber reinforced concrete/ S. Tokgoz, C. Dundar // Thin-Walled Structures. – 2010. – № 48. – C. 414–422.

108. Wang X. Behavior of short circular tubed-reinforced-concrete columns subjected to eccentric compression/ X. Wang, J. Liu, S. Zhang // Engineering Structures. – 2015. №91. – C. 77–86.

109. Wang X. Behaviour and design method of short square tubed-steel-reinforced-concrete columns under eccentric loading/ X. Wang, J. Liu, X. Zhou // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2016. – №116. – С. 193–203.
110. Yang Y.-F., Han L.-H. Behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) stub columns under eccentric partial compression/ Yang Y.-F., Han L.-H. // *Thin-Walled Structures*. – 2011. №49. – С. 379–395.
111. Zeghiche J., Chaoui K. An experimental behaviour of concrete-filled steel tubular columns // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2005. – V. 61. – Pp. 53-66.
112. Казютина, М. Н. Применение трубобетонных конструкций в зданиях и сооружениях / М. Н. Казютина // *Современные методы расчетов и обследований железобетонных и каменных конструкций : материалы 73-й студенческой научно-технической конференции, 23 мая 2017 года* / [редколлегия: В. Ф. Зверев, А. А. Хотько, С. М. Коледа]. - Минск: БНТУ, 2017. – С. 39-52. <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/39809/39-52.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 05.05.2025).
113. Prion H., Boehme J. Beam-column behaviour of steel tubes filled with high strength concrete/ H. Prion H., J. Boehme // *Canadian Journal of Civil Engineering*. – 1994. – V. 21. – Pp. 207-218. – DOI:10.1139/L94-024.
114. Neogi, P. K., Sen, H. K., and Chapman, J. C. Concrete-Filled Tubular Steel Columns Under Eccentric Loading/ *The Structural Engineer*. – 1969. – Vol. 47. – No. 5. – Pp. 187-195.
115. Kamil M.G., Liang Q.Q., Hadi M.N.S. Nonlinear post-fire simulation of concentrically loaded rectangular thin-walled concrete-filled steel tubular short columns accounting for progressive local buckling // *Thin-Walled Structures*. – 2019. – V. 145. – P. 106423. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106423> (дата обращения: 05.05.2025).

116. Xiang Zhu X., Lei G., Hou L., Tian Z., Zhang Z. Experimental and numerical study of steel tubes filled with steel slag-based artificial aggregate (SA-CFST) under lateral impact load // *Construction and Building Materials*. 2025. V. 485. P. 139532.
117. Dundu M. Column buckling tests of hot-rolled concrete filled square hollow sections of mild to high strength steel // *Engineering Structures*. – 2016. – V. 127. – Pp. 73-85. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.039>.
118. Patel V.I. High strength thin-walled rectangular concrete-filled steel tubular slender beam-columns, Part I: Modeling / V.I. Patel, Q.Q. Liang, M.N.S. Hadi // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2011. – V. 70. – DOI:10.1016/j.jcsr.2011.10.019.
119. Metalocus, INES LALUETA, PACO PELAEZ «Guangzhou TV Tower / Canton Tower / 广州塔 by Information Based Architecture» METALOCUS. Accessed April 29, 2025. URL: <https://www.metalocus.es/en/news/guangzhou-tv-tower-canton-tower-guang-zhou-ta-information-based-architecture> (дата обращения: 05.05.2025).
120. Прогулка по Ленинграду 1984 года. Вспоминаем середину восьмидесятых и ностальгируем. URL: <https://dzen.ru/a/ZQcxemgUPGVbS6IG> (дата обращения: 05.05.2025).
121. SEG Plaza, Shenzhen. SteelConstruction.info. URL: https://steelconstruction.info/SEG_Plaza,_Shenzhen (дата обращения: 05.05.2025).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Справка о внедрении



ООО «Спектр Глобал»
195197, Санкт-Петербург, ул. Минеральная, д.13 лит Ч оф.302
Тел. +7 (812) 921-49-29, +7 (911) 815-38-66
E-mail: info@spektr-global.ru, www.spektr-global.ru
ОГРН 1227800077416 ИНН/КПП 7804693968/780401001

23.04.2025 г.

СПРАВКА

О внедрении результатов диссертационной работы аспиранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Ведерниковой Алёны Андреевны «Развитие метода расчета трубобетонных элементов конструкций, находящихся в предельной и запредельной стадиях работы».

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертации «Развитие метода расчета трубобетонных элементов конструкций, находящихся в предельной и запредельной стадиях работы» Ведерниковой Алёны Андреевны используются специалистами ООО «Спектр Глобал» в практической работе при проектировании объектов с использованием трубобетонных конструкций (ТБК).

Разработанная в диссертации инженерная методика расчета ТБК позволила значительно упростить проверку прочности и устойчивости трубобетонных элементов без использования расчетных комплексов и сложных конечно-элементных моделей. Результаты исследования позволяют подбирать рациональные соотношения толщины трубы к ее характерному размеру, марки стали для арматуры и трубы и класса бетона, что на практике реализуется в снижении расхода стали на несущие трубобетонные конструкции.

Генеральный директор



В.С. Гусельников

Приложение 2. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ №1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2022663635

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):
2022663635
Дата регистрации: 18.07.2022
Номер и дата поступления заявки:
2022663036 11.07.2022
Дата публикации и номер бюллетеня:
18.07.2022 Бюл. № 7
Контактные реквизиты:
нет

Автор(ы):
Белый Григорий Иванович (RU),
Ведерникова Алёна Андреевна (RU)
Правообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный
университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программа для расчета трубобетонных конструкций «обратным» методом

Реферат:

Программа предназначена для строительной области техники, в частности для расчета трубобетонных конструкций (стержней), сжатых внецентренно. Программа способна определить несущую способность трубобетонных стоек, выполненных из стальной трубы и заполненных бетоном. Расчет может быть выполнен на прочность и на устойчивость. Расчет в программе может быть произведен при различных характеристиках материалов - с использованием обыкновенных и высокопрочных сталей и бетонов. Все характеристики материалов задаются числовыми значениями, соответственно, к расчету могут приниматься как результаты испытаний, так и стандартные значения, предлагаемые нормами проектирования. Лежащая в основе программы методика расчета, названная «обратным» методом расчета, позволяет осуществить расчет быстро и с высокой точностью. Тип ЭВМ: универсальная; ОС: кроссплатформенная.

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 20 КБ

Приложение 3. Свидетельство о регистрации программы ЭВМ №2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ


RU2022682845

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2022682845

Дата регистрации: 28.11.2022

Номер и дата поступления заявки:
2022682028 17.11.2022

Дата публикации и номер бюллетеня:
28.11.2022 Бюл. № 12

Автор(ы):

Белый Григорий Иванович (RU),
Ведерникова Алёна Андреевна (RU)

Правообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный
университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программа для расчета трубобетонных конструкций «обратным» методом. Версия 2.0

Реферат:

Программа предназначена для расчета трубобетонных конструкций (стержней), сжатых внецентренно. Программа позволяет определить несущую способность трубобетонных стоек, выполненных из стальной трубы и заполненных бетоном, есть возможность учета продольного армирования. Расчет может быть выполнен на прочность и на устойчивость и произведен при различных характеристиках материалов - с использованием обыкновенных и высокопрочных сталей и бетонов. Все характеристики материалов задаются числовыми значениями, соответственно, к расчету могут приниматься как результаты испытаний, так и стандартные значения, предлагаемые нормами проектирования. Лежащая в основе программы методика расчета, названная «обратным» методом расчета, позволяет осуществить расчет быстро и с высокой точностью. В сравнении с первой версией программа дополнена следующим функционалом: расчет стержней круглого сечения; более удобный учет продольного армирования; учет обжатия в коротких стержнях круглого сечения; учет начальных напряжений и упрочнения, возникающих при изготовлении в прямоугольных гнуто-сварных трубах; улучшена сходимость расчета при высокой точности. Тип ЭВМ: универсальная; ОС: кроссплатформенная.

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 20 КБ

Приложение 4. Код программы на языке python

Главный модуль Main

```

from geometry import *

for Rb in Rb_Eb:
    f = open('fi_new.txt', 'a')
    f.write('' + '#Rb = ' + str(Rb[0]) + '\n')
    f.close()
    for Rs in Rs_array:
        f = open('fi_new.txt', 'a')
        f.write('' + '#Rs = ' + str(Rs) + '\n')#('\n' + 'Rs =
' + str(Rs) + ';' + 'Rb = ' + str(Rb[0]) + '\n' + ';' + '\t')
        f.close()
        A_red = (F - 2) * (M - 2) * Rb[1] / Es + 2 * F + 2 *
M - 4
        print('Ared= ', A_red)
        A_red1 = (F - 2) * (M - 2) * Rb[1] / Es + F * M - (F
- 2) * (M - 2)
        I_red = (M-2)*(F-2)**3/12 * Rb[1] / Es + M*F**3/12 -
(M-2)*(F-2)**3/12
        ro = I_red / A_red / y_max
        eb1 = 0.6 * Rb[0] / Rb[1] * Es / Rs
        eb0 = 0.002 * Es / Rs
        eb2 = 0.0035 * Es / Rs
        Eb_ink = 0.4 * Rb[0] / (eb0 - eb1) / Rs
        Eb_ink_down = Rb[0] / (0.001 * Es / Rs)/Rs
        Ab, As, Yb, Ys = A_1(tD_rel, n_polos)

```

```

    A_b, A_s, Y_b, Y_s = getting_rel_par(Ab, As, Yb, Ys,
ro, A_red)

    f = open('fi_new.txt', 'a')
    f.write('' + '\n')#('\n')
    f.close()

    for mx0_treb in mx0_array:
        f = open('fi_new.txt', 'a')
        f.write((str(mx0_treb)))
        f.close()
        fi_tabl = []
        for lam_11 in lanbda:
            f = open('fi_new.txt', 'a')
            f.write('lan= ' + str(lam_11)) # ('\n')
            f.close()
            fi_array_real = []
            Conf_real = []
            mx0_real_array=[]
            mx0_yes_no_array = []
            N_bet = []
            N_st = []
            Ey_re = []
            for i in range((int((e_lim_zapr - e_lim) /
d_e_lim))):
                mx_0, fi_real, k1, n_b, n_s, step,
EY_real, Eb_aver, Es_aver, mxdef = cir_fi(ro, e_lim, y_max,
Y_b, Y_s, Rb[0], Rb[1], eb0, eb1, eb2, Es, Rs, Eb_ink,
Eb_ink_down, A_b, A_s, lam_11, mx0_treb, I_red, A_red,
tol=10)

```

```

        if k1 > 0.01:
            break
        fi_array_real.append(fi_real)
        e_lim += d_e_lim
        N_bet.append(n_b)
        N_st.append(n_s)
        Ey_re.append(EY_real)
        mx = 0.1
        tol = 10
    if len(fi_array_real)!=0:
        fi_real = max(fi_array_real)
    if len(fi_array_real)==0:
        fi_real = 'NA'
    fi_tabl.append(fi_real)
    e_lim = 0.7
    f = open('fi_new.txt', 'a')
    if lam_11 != 0.5:
        f.write(',')
    f.write(' ' + str(fi_real) + str(', '))
    f.close()
    fi_list.append(fi_real)
    f = open('fi_new.txt', 'a')
    f.write(',') + '\n')#('\n')
    f.close()
f = open('fi_new.txt', 'a')
f.write(' ' + '\n')
f.close()

```

```
f = open('fi_new.txt', 'a')
f.write(', ' + '\n')
f.close()
```

```
print(mx_0, fi_real, fi_tabl)
```

Модуль геометрических расчетов geometry

```
from input_data import *
import numpy as np
def A_1(tD_rel, n_polos):
    A_b = []
    A_s = []
    Y_s = []
    Y_b = []
    for i in range((int(n_polos/2))):
        a_b = (F-2)*(M-2)/n_polos
        a_s = 2*(F-2)/n_polos
        A_b.append(a_b)
        A_s.append(a_s)
        y_b = (F-2)*(1/2/n_polos+i/n_polos)
        Y_b.append(y_b)
        Y_s.append(y_b)
    a_s1 = M
    y_s1 = (F-1)/2
    A_b_1 = A_b.copy()
    A_b.reverse()
    A_b.extend(A_b_1)
```

```

A_s.append(a_s1)
A_s_1 = A_s.copy()
A_s.reverse()
A_s.extend(A_s_1)
Y_s.append(y_s1)
Y_s_1 = Y_s.copy()
Y_s.reverse()
Y_s.extend(np.negative(Y_s_1))
Y_b_1 = Y_b.copy()
Y_b.reverse()
Y_b.extend(np.negative(Y_b_1))
return A_b, A_s, Y_b, Y_s

```

```

def getting_rel_par(Ab, As, Yb, Ys, rol, Ared):
    A_b=np.divide(Ab, Ared)
    A_s = np.divide(As, Ared)
    Y_b = np.divide(Yb, rol)
    Y_s = np.divide(Ys, rol)
    return A_b, A_s, Y_b, Y_s

```

```

def set_eps(Yb, Ys, e0, v11):
    eps_b = []
    eps_s = []
    for i in Yb:
        e1 = e0 - v11*i
        eps_b.append(e1)
    for i in Ys:

```

```

    e1 = e0 - v11*i
    eps_s.append(e1)
if min(eps_b) <= 0:
    b = 'no'
if min(eps_b) > 0:
    b = 'yes'
return eps_b, eps_s, b

def E_sect_steel_concrete(e_s, e_b, Eb, e_b_0, e_b_1, e_b_2,
E0, Rs, Rb, E_ink, E_ink_down):
    E0s = 1
    E0b = Eb/E0
    R0s = 1
    R0b = Rb/Rs # rel parameters
    E_s = []
    E_b = []

    if Rs >= 700:
        for e1 in e_s:
            if e1 <= 0.8 and e1 >= -0.8:
                E_sect_steel = E0s
            if e1 > 0.8 and e1 <= 0.002*E0/Rs+1:
                E_sect_steel = (0.8 + 0.3/(0.002*Es/Rs+1-0.8)
* (e1 - 0.8)) / e1
            if e1 < -0.8 and e1 >= -0.002*E0/Rs-1:
                E_sect_steel = (-0.8 + 0.3/(0.002*Es/Rs+1-
0.8) * (e1 + 0.8)) / e1
            if e1 > 0.002*Es/Rs+1:

```

```

        E_sect_steel = 0
    if e1 < -0.002*Es/Rs-1:
        E_sect_steel = 0
    E_s.append(E_sect_steel)
if Rs < 700:
    for e1 in e_s:
        if e1 <= 0.8 and e1 >= -0.8:
            E_sect_steel = E0s
        if e1 > 0.8 and e1 <= 1.7:
            E_sect_steel = (0.8 + 2/9 * (e1 - 0.8)) / e1
        if e1 < -0.8 and e1 >= -1.7:
            E_sect_steel = (-0.8 + 2 / 9 * (e1 + 0.8)) /
e1

        if e1 > 1.7:
            E_sect_steel = R0s / e1
        if e1 < -1.7:
            E_sect_steel = -R0s / e1
    E_s.append(E_sect_steel)

# concrete diagrams: high strength concrete, than plain
if Rb >= 37:
    e_b_1 = 0.0015 * Es / Rs
    E0b = Rb/e_b_1/Rs
    if Rb == 54:
        e_b_2 = 0.00265 * Es / Rs
    if Rb == 57:
        e_b_2 = 0.0025 * Es / Rs

```

```

for e1 in e_b:
    if e1 <= e_b_1 and e1 >= 0:
        E_sect_conc_line_down = E0b
    if e1 >= e_b_1 and e1 <= e_b_2:
        E_sect_conc_line_down = R0b / e1
    if e1 <= e_b_2 + 0.001*Es/Rs and e1 >= e_b_2:
        E_sect_conc_line_down = (R0b - (e1 - e_b_2) *
E_ink_down) / e1
    if e1 < 0 or e1 > e_b_2 + 0.001*Es/Rs:
        E_sect_conc_line_down = 0
    E_b.append(E_sect_conc_line_down)
if Rb<37:
    for e1 in e_b:
        if e1 <= e_b_1 and e1 >= 0:
            E_sect_conc_line_down = E0b
        if e1 > e_b_1 and e1 <= e_b_0:
            E_sect_conc_line_down = (E0b * e_b_1 + E_ink
* (e1 - e_b_1)) / e1
        if e1 >= e_b_0 and e1 <= e_b_2:
            E_sect_conc_line_down = R0b / e1
        if e1 <= e_b_2 + 0.001*Es/Rs and e1 >= e_b_2:
            E_sect_conc_line_down = (R0b - (e1 - e_b_2) *
E_ink_down) / e1
        if e1 < 0 or e1 > e_b_2 + 0.001*Es/Rs:
            E_sect_conc_line_down = 0
        E_b.append(E_sect_conc_line_down)

return E_s, E_b

```

```

def mx_fi (Es, Eb, Ab, As, yb, ys, Eb0_Es, Es0, ro, mx, ymax,
fi_start, lam_0, e_lim, Iredx, Ared):

    A_eff = sum(np.multiply(Eb, Ab)) + sum(np.multiply(Es,
As))

    yc = sum(np.multiply(np.multiply(Ab, Eb), yb))+\
        sum(np.multiply(np.multiply(As, Es), ys))

    ix2 = sum(np.multiply(np.multiply(np.multiply(Ab, Eb),
yb), yb))+\
        sum(np.multiply(np.multiply(np.multiply(As, Es),
ys), ys))

    E1 = [1]*len(Es)
    E2 = [Eb0_Es/Es0]*len(Eb)
    A_osl = 1 - A_eff
    ix2_osl = Iredx / ro ** 2 / Ared - ix2
    C1 = A_eff + yc * mx * ro / ymax
    C2 = yc + ix2 * mx * ro / ymax
    C1_fic = A_osl - yc * mx * ro / ymax
    C2_fic = -yc + ix2_osl * mx * ro / ymax
    fi = fi_start * C1
    fi_fic = fi_start * C1_fic
    mx_fic = C2_fic / C1_fic

    k_def = 1 #+ 0.125 * fi * lam_0**2 / (1 - fi * lam_0**2 /
math.pi ** 2)

    k_def_fic = (k_def - 1) * fi_fic / fi + 1

    # mx_0 = (e_lim - fi_fic * (1 + mx_fic * k_def) - fi) /
fi / k_def

    # mx_0 = e_lim / fi / k_def - (fi_fic / fi * (1 / k_def +
mx_fic) + 1 / k_def)

```

```

mx_0 = C2 / C1 # только для расчета на прочность
mx_def_1 = (e_lim - fi_fic * (1+mx_fic)) / fi - 1
return mx_0, fi, ix2, mx_def_1

def cir_fi(ro, elim, ymax, Y_b, Y_s, Rb0, Eb0, eb0, eb1,
eb2, Es1, Rs, Eb_ink, Eb_ink_down, A_b, A_s, lam_11,
mx0_treb, Ired, Ared, tol):
    mx_start = 0
    mx_end = 1000000
    mx1 = (mx_end + mx_start) / 2
    k = 0
    while tol >= 0.04:
        fi_1 = elim / (1 + mx1)
        e_0 = fi_1
        v_11 = -fi_1 * ro * mx1 / ymax
        eps_b, eps_s, conf = set_eps(Y_b, Y_s, e_0, v_11)
        E_st, E_bet = E_sect_steel_concrete_1(eps_s, eps_b,
Eb0, eb0, eb1, eb2, Es1, Rs, Rb0, Eb_ink,
Eb_ink_down)
        E_st_aver = sum(E_st) / len(E_st)
        E_bet_aver = sum(E_bet) / len(E_bet)
        # Для расчета кривой
        #mx_0, fi_real, I_x_2 =
mx_fi_for_compression_line(E_st, E_bet, A_b, A_s, Y_b, Y_s,
Eb0, Es, ro, mx1, ymax, fi_1,

#lam_11,

#elim)

```

```

# для обычного расчета
mx_0, fi_real, I_x_2, mxdef= mx_fi(E_st, E_bet, A_b,
A_s, Y_b, Y_s, Eb0, Es, ro, mx1, ymax, fi_1,

lam_11,

elim, Ired, Ared)

#print(mx_0, fi_real)
tol = abs((mx_0 - mx0_treb) / mx0_treb)
k += 1
if mx_0 > mx0_treb:
    mx_end = mx1
    mx1 = (mx1 + mx_start) / 2
if mx_0 < mx0_treb:
    mx_start = mx1
    mx1 = (mx1 + mx_end) / 2
if k > 500:
    break

N_b, N_s = N_N_bs(eps_s, eps_b, E_bet, E_st, A_b, A_s,
fi_real)

return mx_0, fi_real, tol, N_b, N_s, k, I_x_2,
E_bet_aver, E_st_aver, mxdef

def N_N_bs (es, eb, Eb1, Es1, Ab, As, fi):
    Nb = sum(np.multiply(np.multiply(Ab, Eb1), eb))/fi*100
    Ns = sum(np.multiply(np.multiply(As, Es1), es))/fi*100
    return Nb, Ns

```

```

# определение площадей стержней круголого сечения
def A_1_circle(n_pol, b, k):
    A_bet = []
    A_steel = []
    y_bet = []
    y_steel = []
    for i in range(int(n_pol/2)):
        alfa_b_1 = math.pi - 2 * math.asin(i * 2 / n_pol)
        alfa_b_2 = math.pi - 2 * math.asin((i + 1) * 2 /
n_pol)
        alfa_s_1 = math.pi - 2 * math.asin(i * 2 / (n_pol +
2))
        alfa_s_2 = math.pi - 2 * math.asin((i + 1) * 2 /
(n_pol + 2))
        n1 = n_pol / 2 - i
        n2 = n_pol / 2 - 1 - i
        Cb_1 = 2 * math.sqrt(K / n_pol * n1 * (K - K / n_pol
* n1))
        Cb_2 = 2 * math.sqrt(K / n_pol * n2 * (K - K / n_pol
* n2))
        A_b1 = (b / 2 - 1) ** 2 / 2 * (alfa_b_1 -
math.sin(alfa_b_1))
        A_b2 = (b / 2 - 1) ** 2 / 2 * (alfa_b_2 -
math.sin(alfa_b_2))
        A_b = A_b1 - A_b2
        y_b_seg_1 = Cb_1 ** 3 / 12 / A_b1
        if A_b2!=0:
            y_b_seg_2 = Cb_2 ** 3 / 12 / A_b2
        if A_b2 == 0:

```

```

        y_b_seg_2 = 0
        y_b = (y_b_seg_1 * A_b1 - y_b_seg_2 * A_b2) / A_b
        A_s1 = alfa_s_1 / 2 * ((b / 2) ** 2 - (b / 2 - 1) **
2)
        A_s2 = alfa_s_2 / 2 * ((b / 2) ** 2 - (b / 2 - 1) **
2)
        A_s = A_s1 - A_s2
        y_s_koltso_1 = 76.394 * ((b / 2) ** 3 - (b / 2 - 1)
** 3) * math.sin(alfa_s_1 / 2) / ((b / 2) ** 2 - (b / 2 - 1)
** 2) / math.degrees(alfa_s_1)
        y_s_koltso_2 = 76.394 * ((b / 2) ** 3 - (b / 2 - 1)
** 3) * math.sin(alfa_s_2 / 2) / (
                (b / 2) ** 2 - (b / 2 - 1) ** 2) /
math.degrees(alfa_s_2)
        y_s = (y_s_koltso_1 * A_s1 - y_s_koltso_2 * A_s2) /
A_s
        if i == n_pol / 2 - 1:
            A_steel.append(A_s2)
            y_steel.append(y_s_koltso_2)
        A_bet.append(A_b)
        A_steel.append(A_s)
        y_bet.append(y_b)
        y_steel.append(y_s)
    A_1 = A_steel.copy()
    A_2 = A_bet.copy()
    A_bet.extend(A_2)
    A_steel.extend(A_1)
    y_1 = np.negative(y_steel.copy())
    y_2 = np.negative(y_bet.copy())

```

```

y_bet.extend(y_2)
y_steel.extend(y_1)
return A_bet, A_steel, y_bet, y_steel

# НОВЫЕ ДИАГРАММЫ
# Диаграмма деформирования бетона, согласно СП63 (Саржина)
def concrete_diagram_sarzhin(B_class, Rb, Eb0, Rs, Es0):
    eta_n_voshod = [0, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95,
1]
    eta_n_nishod = [0.98, 0.95, 0.92, 0.9, 0.87, 0.85]
    lambda_b = 1
    eps_b_max =
B_class/Eb0*lambda_b*(1+0.75*lambda_b*B_class/60+0.2*lambda_b
/B_class)/(0.12+B_class/60+0.2/B_class)
    v_b_max = Rb / eps_b_max / Eb0
    # нисходящая ветвь
    w_1_nishod = 1.95 * v_b_max - 0.138
    v_0_nishod = 2.05 * v_b_max
    w_2_nishod = 1 - w_1_nishod
    # восходящая ветвь
    w_1_voshod = 2 - 2.5 * v_b_max
    v_0_voshod = 1
    w_2_voshod = 1 - w_1_voshod
    eps_b_ar = []
    sigma_b_ar = []
    for i in eta_n_voshod:
        v_b_1 = v_b_max + (v_0_voshod - v_b_max) *
math.sqrt(1 - w_1_voshod * i - w_2_voshod * i ** 2)

```

```

    eps_1 = Rb * i / (Eb0 * v_b_1)
    eps_b_ar.append(eps_1 * Es0 / Rs)
    sigma_b_ar.append(Rb * i / Rs)
eps_k = 0.9 * eps_b_ar[-1]
eps_b_ar[-1] = eps_k
for i in eta_n_nishod:
    v_b_1 = v_b_max - (v_0_nishod - v_b_max) *
math.sqrt(1 - w_1_nishod * i - w_2_nishod * i ** 2)
    eps_1 = 0.9 * Rb * i / (Eb0 * v_b_1)
    eps_b_ar.append(eps_1 * Es0 / Rs)
    sigma_b_ar.append(Rb * i / Rs)
return eps_b_ar, sigma_b_ar

# поиск модулей деформации
def Eb(eps1, eps_ar, s_ar):
    index = 0
    if eps1 >= eps_ar[-1] or eps1 < 0:
        return 0
    for i in range(len(eps_ar)):
        if eps1 <= eps_ar[i]:
            index = i
            break
    sigma = s_ar[index-1] + (eps1 - eps_ar[index-1]) *
(s_ar[index] - s_ar[index-1])\
        / (eps_ar[index] - eps_ar[index-1])
    E_bet = sigma / eps1
    return E_bet

```

```

def Eb_rel (eps_b, epsb_diag, sibma_diag, E_s0):
    Eb_rel = []
    for eps in eps_b:
        Eb_1 = Eb(eps, epsb_diag, sibma_diag)
        Eb_rel.append(Eb_1)
    return Eb_rel

# concrete diagrams: high strength concrete, than plain
if Rb >= 0:
    E0b = Rb/e_b_1/Rs
    for e1 in e_b:
        if e1 <= e_b_1 and e1 >= 0:
            E_sect_conc_line_down = E0b
        if e1 >= e_b_1 and e1 <= e_b_2:
            E_sect_conc_line_down = R0b / e1
        if e1 <= e_b_2 + 0.001*Es/Rs and e1 >= e_b_2:
            E_sect_conc_line_down = (R0b - (e1 - e_b_2) *
E_ink_down) / e1
        if e1 < 0 or e1 > e_b_2 + 0.001*Es/Rs:
            E_sect_conc_line_down = 0
        E_b.append(E_sect_conc_line_down)
    return E_s, E_b

def E_sect_steel_concrete_1(e_s, e_b, Eb, e_b_0, e_b_1,
e_b_2, E0, Rs, Rb, E_ink, E_ink_down):
    E0s = 1

```

```

E0b = Eb/E0
R0s = 1
R0b = Rb/Rs # rel parameters
E_s = []
E_b = []
if Rs >= 350:
    for e1 in e_s:
        if e1 <= 0.9 and e1 >= -0.9:
            E_sect_steel = E0s
        if e1 > 0.9 and e1 <= 1.1:
            E_sect_steel = (0.9 + 2/9*(e1 - 0.9)) / e1
        if e1 < -0.8 and e1 >= -1.1:
            E_sect_steel = (-0.9 + 2/9*(e1+0.9)) / e1
        if e1 > 1.1:
            E_sect_steel = 1.1 / e1
        if e1 < -1.1:
            E_sect_steel = -1.1 / e1
        E_s.append(E_sect_steel)
if Rs < 350:
    for e1 in e_s:
        if e1 <= 0.8 and e1 >= -0.8:
            E_sect_steel = E0s
        if e1 > 0.8 and e1 <= 1.7:
            E_sect_steel = (0.8 + 2/9 * (e1 - 0.8)) / e1
        if e1 < -0.8 and e1 >= -1.7:
            E_sect_steel = (-0.8 + 2 / 9 * (e1 + 0.8)) /

```

e1

```

    if e1 > 1.7:
        E_sect_steel = R0s / e1
    if e1 < -1.7:
        E_sect_steel = -R0s / e1
    E_s.append(E_sect_steel)

# concrete diagrams: high strength concrete, than plain
    if Rb >= 37:
        e_b_1 = 0.0015 * Es / Rs
        E0b = Rb/e_b_1/Rs
        if Rb == 54:
            e_b_2 = 0.00265 * Es / Rs
        if Rb == 57:
            e_b_2 = 0.0025 * Es / Rs
        for e1 in e_b:
            if e1 <= e_b_1 and e1 >= 0:
                E_sect_conc_line_down = E0b
            if e1 >= e_b_1 and e1 <= e_b_2:
                E_sect_conc_line_down = R0b / e1
            if e1 <= e_b_2 + 0.001*Es/Rs and e1 >= e_b_2:
                E_sect_conc_line_down = (R0b - (e1 - e_b_2) *
E_ink_down) / e1
            if e1 < 0 or e1 > e_b_2 + 0.001*Es/Rs:
                E_sect_conc_line_down = 0
            E_b.append(E_sect_conc_line_down)

    if Rb<37:
        for e1 in e_b:

```

```

if e1 <= e_b_1 and e1 >= 0:
    E_sect_conc_line_down = E0b
if e1 > e_b_1 and e1 <= e_b_0:
    E_sect_conc_line_down = (E0b * e_b_1 + E_ink
* (e1 - e_b_1)) / e1
if e1 >= e_b_0 and e1 <= e_b_2:
    E_sect_conc_line_down = R0b / e1
if e1 <= e_b_2 + 0.001*Es/Rs and e1 >= e_b_2:
    E_sect_conc_line_down = (R0b - (e1 - e_b_2) *
E_ink_down) / e1
if e1 < 0 or e1 > e_b_2 + 0.001*Es/Rs:
    E_sect_conc_line_down = 0
E_b.append(E_sect_conc_line_down)

return E_s, E_b

```

Модуль входных параметров input_data

```

import math as math
tD_rel = 0.0064 #relation t/h
h_b = 1
n_polos = 20
mx = 0.1
dmx = 0.001
sechenie = 'прямоугольное'
excentr = 'одноосный, прочность'
mx0_array = [0.25, 0.5, 1.0, 1.5]# [0.25,0.5, 0.75, 1.0, 1.25,
1.5, 1.75, 2.0]
lanbda = [0.2]#[0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4]

```

```
e_lim = 0.7
d_e_lim = 0.05
e_lim_zapr = 5
Es = 206000
Rb_Eb = [[44, 0.85*42500]]
Rs_array = [290]
# Это для прямоугольных стержней
F = 1 / tD_rel
M = 1 / tD_rel / h_b
y_max = F / 2
x_max = M / 2
tol = 10
k_upr = 1.0 #strenght coefficient for steel corners
```