

На правах рукописи



Олуромби Акинвале Александр Ричардович

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
ПРЯМОШОВНЫХ И СПИРАЛЬНОШОВНЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛЕЙ  
ПОВЫШЕННОЙ И ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ С  
ИЗГИБОМ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский центр» Строительство», Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Ведяков Иван Иванович**

Официальные оппоненты: **Туснин Александр Романович**,  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»), профессор кафедры «Металлические и деревянные конструкции», проректор по научной работе

**Притыкин Алексей Игоревич**,  
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КГТУ»), декан факультета судостроения и энергетики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ФГБОУ ВО «ПНИПУ»)

Защита состоится «23» декабря 2020 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, 2-я Институтская, д. 6 и на сайте [www.cstroy.ru](http://www.cstroy.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  Шулятьев Станислав Олегович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Отечественное стальное строительство преимущественно использует фасонный и листовой прокат. Развитие только этих элементов конструкций ограничивает спектр потенциальных возможностей современного металлостроения. Ориентируясь на зарубежный опыт строительства и опыт строительства уникальных сооружений в России XXI века, можно заключить, что развитие в направлении использования трубчатых профилей позволяет находить более экономичные и эффективные конструктивные решения стальных конструкций. То же можно сказать про использование сталей повышенной и высокой прочности. Изучение и совершенствование новых материалов и элементов конструкций является приоритетной задачей строительной науки.

Вопрос напряженно-деформированного состояния элементов при сжатии с изгибом можно считать одним из наиболее важных и сложных. Специфика явлений потери устойчивости для нетиповых элементов конструкций, таких как сварные трубы круглого сечения из сталей повышенной и высокой прочности, требуют не только всесторонних теоретических исследований, но и соответствующих экспериментальных подтверждений. Данный вопрос, на сегодняшний день, изучен не полностью и имеет ряд пробелов, которые, в том числе, отражаются в отсутствии развитой нормативно-методической базы.

### Степень разработанности темы исследования

Вопросами местной и общей устойчивости оболочечных и стержневых элементов занимались и занимаются следующие специалисты: Э. Л. Айрумян, В. А. Балдин, Г. Е. Бельский, А. Н. Божинский, Б. М. Броуде, Я. Брудко, И. И. Ведяков, В. З. Власов, А. С. Вольмир, В. М. Горпинченко, Э. И. Григолюк, С. А. Ильясевич, А. А. Кользеев, Д. В. Конин, С. Д. Лейтес, В. Д. Насонкин, Н. И. Непершин, Б. Н. Решетников, А. М. Ривкин, С. П. Тимошенко, С. В. Трушин, А. Р. Туснин, Б. С. Цетлин, Н. М. Шейнфельд.

За последние несколько лет сделаны существенные шаги в сторону продвижения использования стальных труб в строительстве. Разработан и утвержден новый ГОСТ Р 58064-2018 «Трубы стальные сварные для строительных конструкций. Технические условия» – первый отечественный стандарт, регламентирующий характеристики и свойства труб для строительных конструкций. Кроме того, в последней редакции СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» расширено количество классов прочности сталей для труб. Появилась возможность применять стали повышенной и высокой прочности от С390 до С690, что ранее нормами не предусматривалось.

Нормативно заложены важные основы, способствующие использованию трубчатых конструкций. Тем не менее, остается актуальным вопрос о методах их расчета и проектирования. Имеющаяся нормативная база в этой части не актуализировалась многие десятилетия. Доступные инженерные методики расчета

основаны на советских исследованиях полувековой давности и не учитывают особенностей современных материалов и технологий производства. Разработка новых методик расчета стальных труб из современных сталей является важным шагом в развитии отечественного проектирования металлических конструкций.

**Цель работы** – Разработка методик расчета прямошовных и спиральношовных труб из сталей повышенной и высокой прочности при сжатии с изгибом на основе результатов экспериментов и теоретических расчетов.

**Задачи исследований:**

1. Определить структурные особенности, механические и химические свойства трубных сталей повышенной и высокой прочности для строительных конструкций.

2. Провести серию испытаний объектов исследования и изучить фактическое напряженно-деформированное состояние труб, а также выявить особенности потери местной и общей устойчивости.

3. Определить характер и степень начальных несовершенств сварных труб и их влияние на несущую способность при сжатии с изгибом.

4. Разработать расчетный критерий потери местной устойчивости сварных труб, учитывающий упругопластические свойства трубных сталей и влияние изгиба.

5. Разработать инженерную методику расчета критических нагрузок трубчатых элементов при сжатии с изгибом в соответствии с результатами опытов.

6. Предложить методику конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния сварных труб, которая будет учитывать влияние локальных несовершенств и специфику потери местной устойчивости.

**Объектом исследования** являются прямошовные и спиральношовные трубы из сталей повышенной и высокой прочности.

**Предметом исследования** является напряженно-деформированное состояние шарнирно опертых труб при продольном центральном и внецентренном сжатии.

**Научная новизна работы:**

1. Разработаны методики расчета прямошовных и спиральношовных труб из сталей повышенной и высокой прочности при сжатии с изгибом, одновременно учитывающие как стержневые, так и оболочечные начальные несовершенства, а также физические особенности материала.

2. Предложен критерий потери местной устойчивости прямошовных и спиральношовных труб при сжатии с изгибом, учитывающий упругопластическую работу материала и несовершенства стенки.

**Теоретическая значимость работы:**

1. Разработана методика расчета сжато-изгибаемых труб, основанная на аналитической модели шарнирно опертого упругопластического стержня и учитывающая критерии местной и общей устойчивости.

2. Получены величины случайных эксцентриситетов и начальных погибов стенки прямошовных и спиральношовных труб отечественного производства из сталей повышенной и высокой прочности, позволяющие с большей точностью определить несущую способность и напряженно-деформированное состояние труб при сжатии с изгибом.

3. Для расчетов на устойчивость предложен способ аппроксимации диаграммы деформирования трубной стали « $\sigma$ - $\epsilon$ » с помощью кусочной функции, состоящей из линейного и гиперболического участков.

4. Получены зависимости коэффициента устойчивости от гибкости, тонкостенности, эксцентриситета и формы диаграммы деформирования стали « $\sigma$ - $\epsilon$ » для сжато-изгибаемых шарнирно опертых труб.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Разработана методика конечно-элементного моделирования сжато-изгибаемых стальных труб, учитывающая фактическое влияние начальных несовершенств стенки и потерю местной устойчивости.

2. Установлено влияние состояния поставки труб, механических и химических свойств сталей повышенной и высокой прочности на напряженно-деформированное состояние труб при сжатии с изгибом.

3. Разработана инженерная методика расчета несущей способности сжато-изгибаемых стальных труб, учитывающая потерю местной устойчивости.

4. Даны рекомендации по уточнению нормативной методики расчета сжато-изгибаемых стальных труб.

#### **Методология и методы исследования**

В рамках диссертационной работы использовались следующие экспериментальные и теоретические методы: для изучения свойств объекта исследования в качестве основного метода использовался эксперимент; методы идеализации и моделирования применялись при создании расчетных схем и моделей, призванных описать поведение объекта исследования; метод конечных элементов использовался для численного анализа изучаемых явлений; для аналитического решения задач строительной механики использовались общепринятые математические методы, в том числе методы интегрального и дифференциального исчисления; для решения систем уравнений, описывающих равновесие сил приведенной системы, использовались методы Кармана, Гаусса и метод итераций; для определения эксплуатационных свойств трубных сталей применялись классические методы механических, химических и оптико-физических исследований, регламентируемые соответствующими нормативными документами.

**Личный вклад автора** заключается в: изучении проблематики современной строительной науки в области расчета и проектирования стальных трубчатых конструкций; разработке научной гипотезы и подготовке теоретической базы исследования; подготовке и организации испытаний полномасштабных образцов

сварных труб на сжатие с изгибом; организации исследований свойств трубных сталей; определении характера и степени начальных несовершенств; анализе и обработке полученных экспериментальных данных; разработке методик и критериев расчета сварных труб для строительных конструкций на сжатие с изгибом; написании статей для публикаций на тему исследования.

**На защиту выносятся:**

1. Методика конечно-элементного моделирования стальных труб с учетом начальных несовершенств стенки.
2. Инженерная методика расчета сжато-изгибаемых стальных труб.
3. Методика расчета сжато-изгибаемых труб, основанная на аналитической модели шарнирно опертого упругопластического стержня.
4. Разработанный на основе результатов исследований критерий потери местной устойчивости стальных труб, учитывающий упругопластическую работу материала и изгиб трубы.
5. Способ аппроксимации диаграммы деформирования трубной стали с помощью линейно гиперболической функции, предназначенный для расчетов на устойчивость.

**Степень достоверности результатов исследования** обеспечивается: использованием апробированных методов проведения испытаний элементов стальных конструкций с применением поверенных и настроенных измерительных приборов; применением классических законов и принципов строительной механики и математики; использованием верифицированных программных комплексов, таких как Ansys Mechanical и Maple; соответствием результатов расчета по предлагаемым методикам результатам экспериментов.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях:

- IV Международный форум и выставка высотного и уникального строительства «100+ Forum Russia» (Екатеринбург, 2017 г.);
- VII Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (НГАСУ, 2018 г.);
- I Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и исследователей АО «НИЦ «Строительство» (Москва, 2019 г.).

**Внедрение результатов.** Разработанные по итогам исследовательской работы методики расчета стальных труб использовались при проектировании и проверочных расчетах следующих объектов:

- здание музея «Битва за оружие Великой Победы» в пос. Прохоровка Белгородской области;
- башня сети цифрового наземного телевизионного вещания Пермского края высотой 275 метров;

– башня радиотелевизионной передающей станции в городе Владикавказе высотой 210 метров;

– башня радиотелевизионной передающей станции в городе Екатеринбурге высотой 236 метров.

На основе полученных в ходе исследования свойств трубных сталей, характеристик начальных несовершенств и особенностей их влияния на напряженно-деформированное состояние труб разрабатывалось СТО АРСС 11251254.001-018-3 «Проектирование стальных конструкций многоэтажных зданий».

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ, общим объемом 3,69 печатных листов (2,73 из которых написаны лично автором), в том числе 5 работ, общим объемом 2,25 печатных листов (1,28 из которых написаны лично автором), опубликованы в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Объем работы составляет: 157 страниц машинописного текста, 59 рисунков, 20 таблиц. Список литературы состоит из 103 наименований.

Работа выполнена в лаборатории металлических конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко структурного подразделения АО «НИЦ «Строительство» под руководством доктора технических наук, профессора И.И. Ведякова.

Автор искренне благодарит доктора технических наук, профессора Павла Дмитриевича Одесского и кандидата технических наук Дениса Владимировича Кони́на за содействие, помощь и всестороннюю поддержку в работе над диссертацией.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, выделены научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** рассматривается отечественный и зарубежный опыт использования труб в строительных конструкциях. Отмечается их востребованность, в том числе и в строительстве уникальных сооружений. В таких случаях особенно актуальным становится использование труб из сталей повышенной и высокой прочности.

Проводится анализ отечественной и зарубежной нормативно-технической литературы по расчету и проектированию труб и трубчатых конструкций. Рассматриваются достижения в области теоретических исследований напряженно-деформированного состояния труб и цилиндрических оболочек. Анализируются методы расчета, принятые в различных странах. Представлен обзор экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния труб и цилиндрических оболочек.

Вопросами местной и общей устойчивости оболочечных и стержневых элементов занимались и занимаются следующие ученые: Э. Л. Айрумян, В. А. Балдин, Г. Е. Бельский, А. Н. Божинский, Б. М. Броуде, Я. Брудко, И. И. Ведяков, В. З. Власов, А. С. Вольмир, В. М. Горпинченко, Э. И. Григолюк, С. А. Ильясевич, А. А. Кользеев, Д. В. Конин, С. Д. Лейтес, В. Д. Насонкин, Н. И. Непершин, Б. Н. Решетников, А. М. Ривкин, С. П. Тимошенко, С. В. Трушин, А. Р. Туснин, Б. С. Цетлин, Н. М. Шейнфельд.

На основе проведенного анализа научно-исследовательских работ в области напряженно-деформированного состояния сжато-изгибаемых труб из сталей повышенной и высокой прочности сформулированы цели, задачи и актуальность диссертационной работы.

**Во второй главе** рассматриваются материалы прямошовных и спиральношовных труб – приводятся результаты исследований химического состава трубных сталей, микроструктуры основного металла и сварного соединения, твердости шва и околошовной зоны, ударной вязкости основного металла и сварного соединения, результаты испытаний на растяжение стандартных пятикратных цилиндрических образцов.

В таблице 1 приведен сортамент рассматриваемых труб, марки сталей и способ их изготовления.

Рассматриваемые трубы имеют достаточно эффективный химический состав с оптимальным количеством легирующих добавок и высоко чистотой по вредным примесям – сере и фтору.

В исследуемых материалах присутствует набор всех типов микроструктур, имеющих место в современных сталях для металлических конструкций: феррито-перлитная (у нормализованной трубы 530x10-Б); высокодисперсная феррито-



цементитная смесь, типичная для термически улучшенных труб (530x10-А и 720x7,5); специфическая, ориентированная, типичная для случая термомеханической обработки (325x9-А, 325-5, 530x8); типичная для термомеханической обработки с последующим высокотемпературным отпуском (у трубы 325x9-Б).

Таблица 1 – Исследуемые сварные трубы, марки сталей и состояния поставки

Маркировка	Сечение, мм	Марка стали	Состояние поставки
Прямошовные			
325x9-А	325x9	07Г2Б	ЛТО
325x9-Б	325x9	07Г2Б	ЛТО + ОТО
325x5	325x5	07Г2Б	ЛТО
530x8	530x8	07Г2Б	ЛТО
Спиральношовные			
530x10-А	530x10	17Г1СУ	Закалка+Отпуск
530x10-Б	530x10	17Г1СУ	Нормализация
720x7,5	720x7,5	10Г2ФБ	Закалка+Отпуск
Обозначения, принятые в таблице 1:			
ЛТО – локальная термическая обработка;			
ОТО – объемная термическая обработка.			

В исследуемых трубах имеют место диаграммы « $\sigma$ - $\epsilon$ » с площадкой текучести, что рационально с точки зрения эксплуатационных свойств сталей. Диаграммы отличаются по форме (переход к площадке текучести, длина площадки текучести, величина  $\delta_p$  и  $\sigma_T/\sigma_B$ ), что позволяет оценить ее влияние на работу трубы при центральном и внецентренном сжатии наряду с геометрическими характеристиками (тонкостенность, гибкость, эксцентриситет). Диаграммы растяжения рассматриваемых трубных сталей приведены в приложении А.

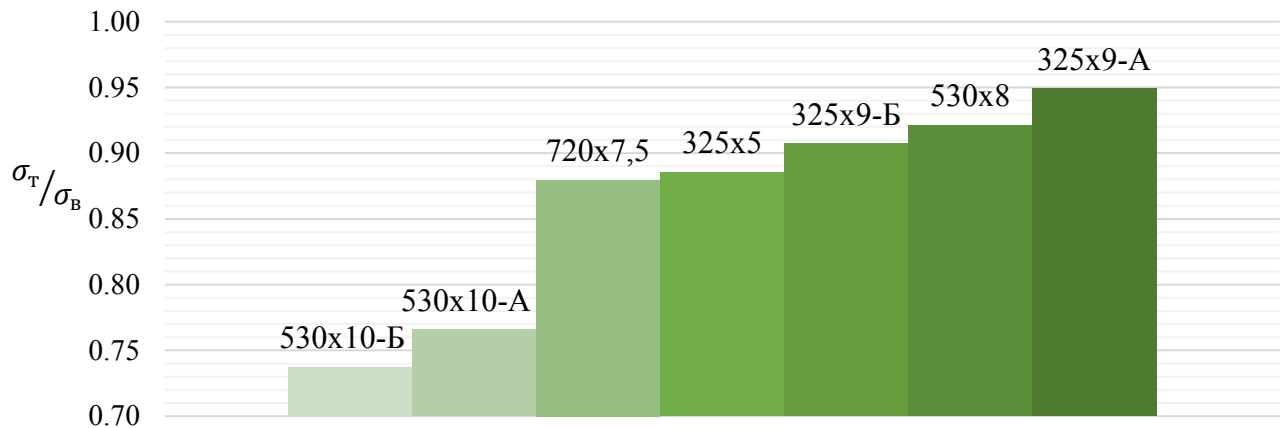


Рисунок 1 – Отношение предела текучести к временному сопротивлению рассматриваемых трубных сталей.

По результатам исследования твердости сварных соединений можно заключить, что наличие шва не меняет прочностных свойств трубы в целом. Это следует из того, что твердость соединения несущественно отличается от твердости основного металла, при том, что размеры сварного соединения относительно невелики по сравнению с размерами трубы. Также известно, что при деформациях происходит выравнивание твердости на локальных участках. Тем не менее при исследованиях напряженно-деформированного состояния труб следует учитывать влияние шва как небольшого концентратора напряжений. На работу труб также могут оказывать влияние остаточные тангенциальные напряжения, которые находятся на уровне  $(0,07 \div 0,1)\sigma_T$ , и остаточные сварные напряжения.

Результаты испытаний на ударную вязкость установили, что сталь прямошовных труб, на примере образца 325x9-А, обладает высокой хладостойкостью ( $KCV^{-100} = 37,6 \div 129$  Дж/см<sup>2</sup>). Спиральношовные трубы, на примере образца 530x10-А, также имеют хорошие вязкие свойства. В обоих случаях высокая ударная вязкость обусловлена высокодисперсной структурой. В случае прямошовной трубы структура мельче.

**Третья глава** посвящена теоретическим исследованиям несущей способности стальных труб при сжатии с изгибом.

Исследуемые трубы имеют различия в формах диаграммы деформирования стали « $\sigma$ - $\varepsilon$ ». В зависимости от состояния поставки варьируется отношение предела пропорциональности к пределу текучести ( $\frac{\sigma_{пц}}{\sigma_T} \approx 0,78 \div 0,96$ ). Очертание участка от  $\sigma_{пц}$  до  $\sigma_T$  особенно важно в расчетах устойчивости элементов средней и малой гибкости, в частности труб, поскольку критические напряжения таких элементов, зачастую попадают в интервал  $\sigma_{пц} - \sigma_T$ .

Для аналитических расчетов на устойчивость предлагается способ аппроксимации диаграммы « $\sigma$ - $\varepsilon$ » с помощью кусочной функции, состоящей из линейного и гиперболического участков:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \sigma_1(\varepsilon) = E\varepsilon, & \text{если } \varepsilon \leq \frac{\sigma_{пц}}{E} \\ \sigma_2(\varepsilon) = \sigma_{пц} + \frac{1}{k \left( \frac{\sigma_{пц}}{E} + \frac{-k\sigma_{пц} + \sqrt{Ek}}{Ek} \right)} - \frac{1}{k \left( \varepsilon + \frac{-k\sigma_{пц} + \sqrt{Ek}}{Ek} \right)}, & \text{если } \varepsilon > \frac{\sigma_{пц}}{E} \end{cases}, \quad (1)$$

где:  $\sigma_{пц}$  – предел пропорциональности;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $E$  – модуль упругости;

$$k = \frac{E^3}{(E\sigma_{пц} - E\sigma_T - 500\sigma_{пц}^2 + 1000\sigma_{пц}\sigma_T - 500\sigma_T^2)^2}.$$

Параметрами этой функции являются  $\sigma_T$  и  $\sigma_{пц}$ , что позволяет задать необходимую форму пластическому участку диаграммы до конца площадки текучести. С помощью выражения (1) в аналитических расчетах труб на устойчивость

учитывались различные деформационные свойства трубных сталей. На рисунке 2 изображены аппроксимации диаграмм деформирования для сталей различного типа.

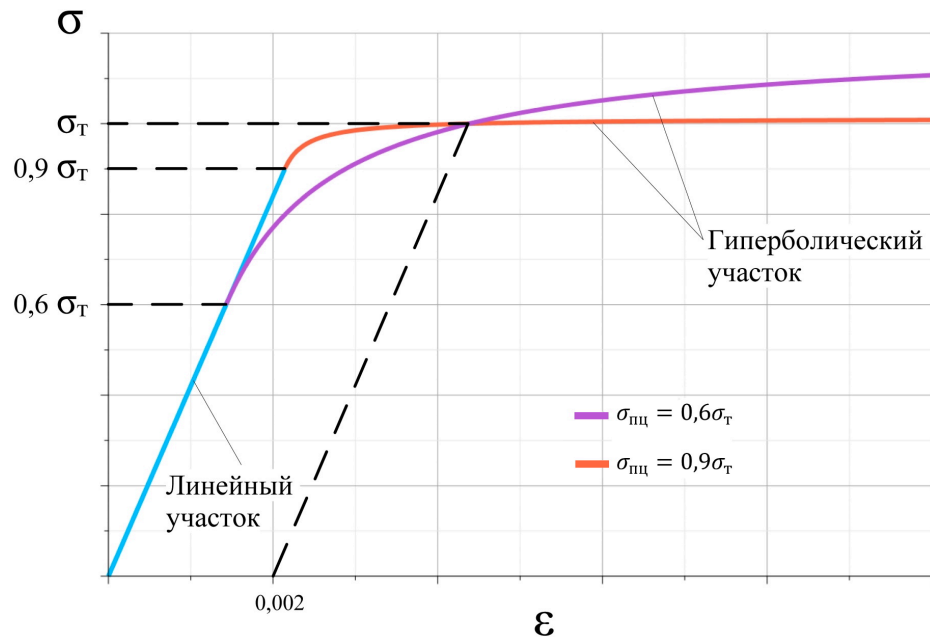


Рисунок 2 – Вид аппроксимированной параметрической функции  $\sigma(\epsilon)$  для случаев:  $\frac{\sigma_{пц}}{\sigma_T} = 0,9$ ;  $\frac{\sigma_{пц}}{\sigma_T} = 0,6$

Предложена аналитическая методика расчета шарнирно опертых сжато-изгибаемых труб, основанная на модели упругопластического стержня (рисунок 3). Уравнение изогнутой кривой стержня принималось в виде полуволны синусоиды:

$$y(z) = y_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{l}\right) \quad (2)$$

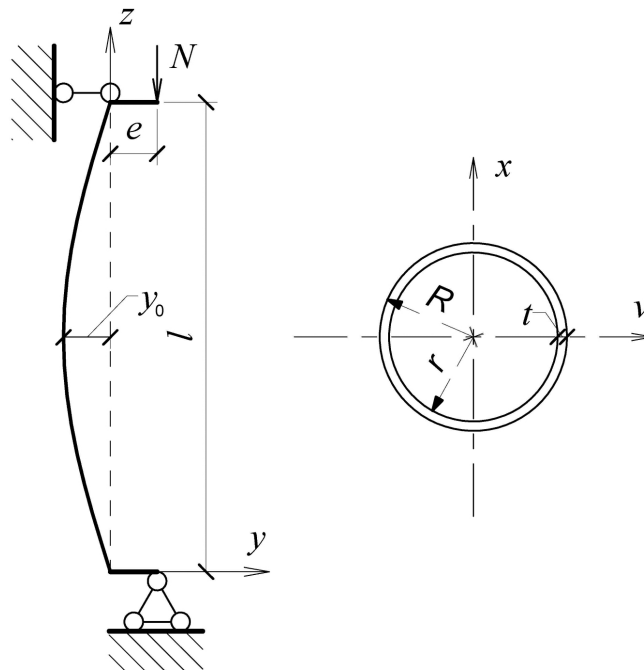


Рисунок 3 – Вид расчетной схемы и поперечного сечения

Упругопластические свойства материала моделировались с помощью выражения (1). Общий вид эпюр напряжений и относительных деформаций в сечениях трубы изображен на рисунке 4.

Задача сводится к системе уравнений равновесия внешних и внутренних сил для среднего сечения трубы:

$$\begin{cases} N(y_0, \varepsilon_0) = \int_{-R}^R dv \int_{-\sqrt{R^2-v^2}}^{\sqrt{R^2-v^2}} dx \int_0^{\sigma(-v \cdot y_0 \cdot (\frac{\pi}{l})^2 + \varepsilon_0)} 1 \cdot d\sigma - \int_{-r}^r dv \int_{-\sqrt{r^2-v^2}}^{\sqrt{r^2-v^2}} dx \int_0^{\sigma(-v \cdot y_0 \cdot (\frac{\pi}{l})^2 + \varepsilon_0)} 1 \cdot d\sigma, \\ N(y_0, \varepsilon_0) = \frac{1}{e - y_0} \left( \int_{-R}^R dv \int_{-\sqrt{R^2-v^2}}^{\sqrt{R^2-v^2}} dx \int_0^{\sigma(-v \cdot y_0 \cdot (\frac{\pi}{l})^2 + \varepsilon_0)} v \cdot d\sigma - \int_{-r}^r dv \int_{-\sqrt{r^2-v^2}}^{\sqrt{r^2-v^2}} dx \int_0^{\sigma(-v \cdot y_0 \cdot (\frac{\pi}{l})^2 + \varepsilon_0)} v \cdot d\sigma \right). \end{cases} \quad (3)$$

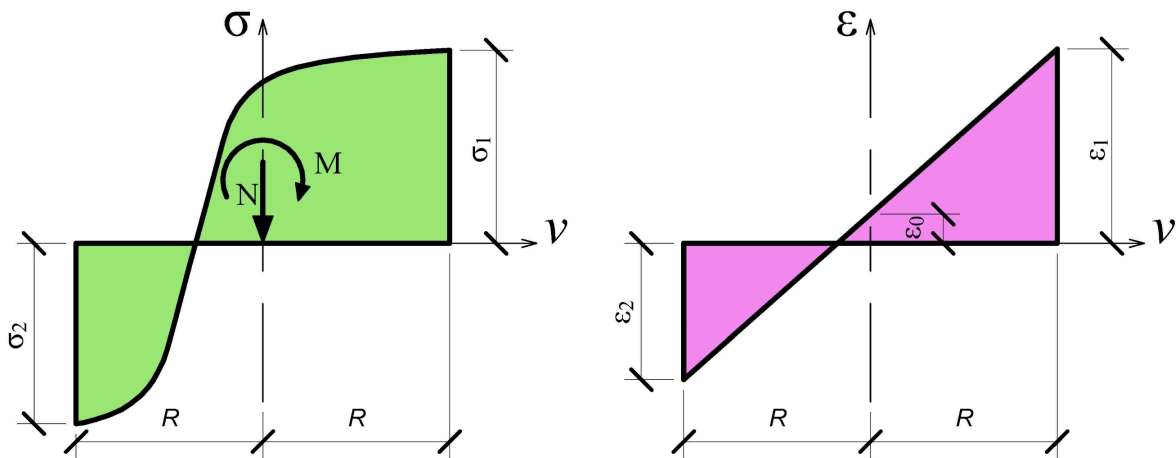


Рисунок 4 – Общий вид эпюр напряжений и относительных деформаций в сечении трубы при сжатии с изгибом

Система уравнений (3) неявно описывает зависимость сжимающей нагрузки от прогиба  $N(y_0)$  (рисунок 5). Для определения критической нагрузки используются два критерия исчерпания несущей способности, характеризующих потерю местной общей устойчивости. Критерий общей устойчивости представляет собой максимум функции  $N(y_0)$  ( $\frac{\partial N}{\partial y_0} = 0$ ). За критерий местной устойчивости принимается формула критических напряжений цилиндрических оболочек, обобщенная Э.И. Григолюком:

$$\sigma_m = \frac{1}{\sqrt{3 \cdot (1 - \mu^2)}} \cdot \sqrt{E_k \cdot E_c} \cdot \frac{t}{R}, \quad (4)$$

где:  $\sigma_m$  – напряжение, соответствующее потере местной устойчивости трубы при центральном сжатии;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E_k$  – касательный модуль;  $E_c$  – секущий модуль.

Влияние изгиба на критические напряжения труб учитывается с помощью формулы Б.М. Броуде:

$$\sigma_{m.b} = \frac{\sigma_m}{8} \left( 9 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right), \quad (5)$$

где:  $\sigma_{m,b}$  – критическое напряжение трубы при сжатии с изгибом;  $\sigma_1$  – максимальное напряжение в сечении трубы;  $\sigma_2$  – минимальные напряжения в сечении, диаметрально противоположные  $\sigma_1$  (рисунок 4).

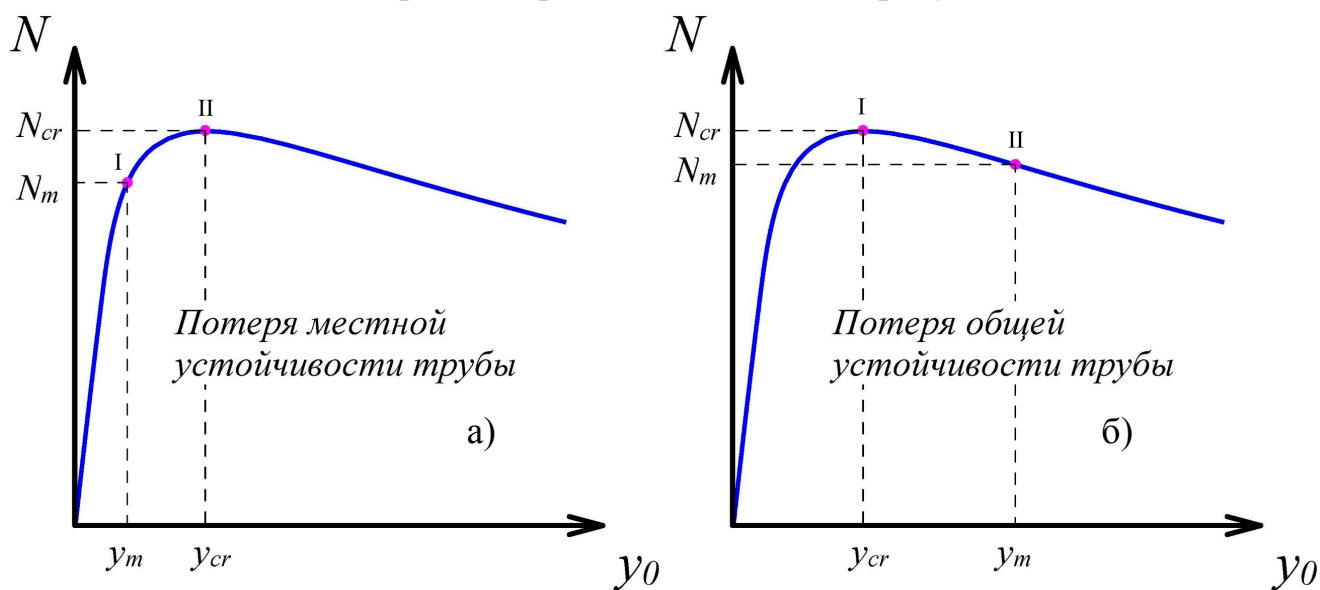


Рисунок 5 – График зависимости сжимающей нагрузки от прогиба трубы: а) потеря местной устойчивости; б) потеря общей устойчивости

Для решения систем уравнений использовался пакет программ для символьных вычислений – Maple.

Выполнен анализ нормативных методик расчета сжато-изгибаемых труб в соответствии с СП 16.13330.2017. Для тонкостенных труб ( $\frac{D}{t} > 50$ ) средней и малой гибкости ( $\lambda < 40$ ) несущая способность, в основном, определяется проверкой на местную устойчивость. В то же время, этот расчет является наиболее трудоемким и неочевидным. СП 16.13330.2017 регламентирует его в недостаточной мере, в частности, представлен способ определения только критических напряжений без перехода к соответствующим критическим нагрузкам при сжатии с изгибом. Отчасти этот пробел можно восполнить с помощью СП 294.13258000.2017, однако этот документ необязателен к применению и носит рекомендательный характер.

**В четвертой главе** представлены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния прямошовных и спиральношовных труб при сжатии с изгибом.

Трубы рассматриваемого сортамента (таблица 2) испытывались на сжатие с изгибом. Модели труб делились на два типа: для условного центрального сжатия (рисунок 6а); для внецентренного сжатия (рисунок 6б).

Во избежание нежелательных деформаций вблизи опор, к трубам для испытаний приваривались торцевые пластины и ребра жесткости.

Для всех образцов труб моделировалось шарнирное опирание: для условного центрального сжатия столы пресса приводились в режим шаровых опор; для

внецентренного сжатия устанавливались дополнительные ножевые шарниры (рисунок 6б).

Испытано 13 прямошовных и 8 спиральношовных труб (таблица 2). Образцы для испытаний имели следующие геометрические и физические характеристики: расчетная длина  $\approx 3,8$  метра; гибкость от 14,8 до 34,0; задаваемый эксцентриситет от 0 до 225 мм; предел текучести от 431 до 597 МПа.

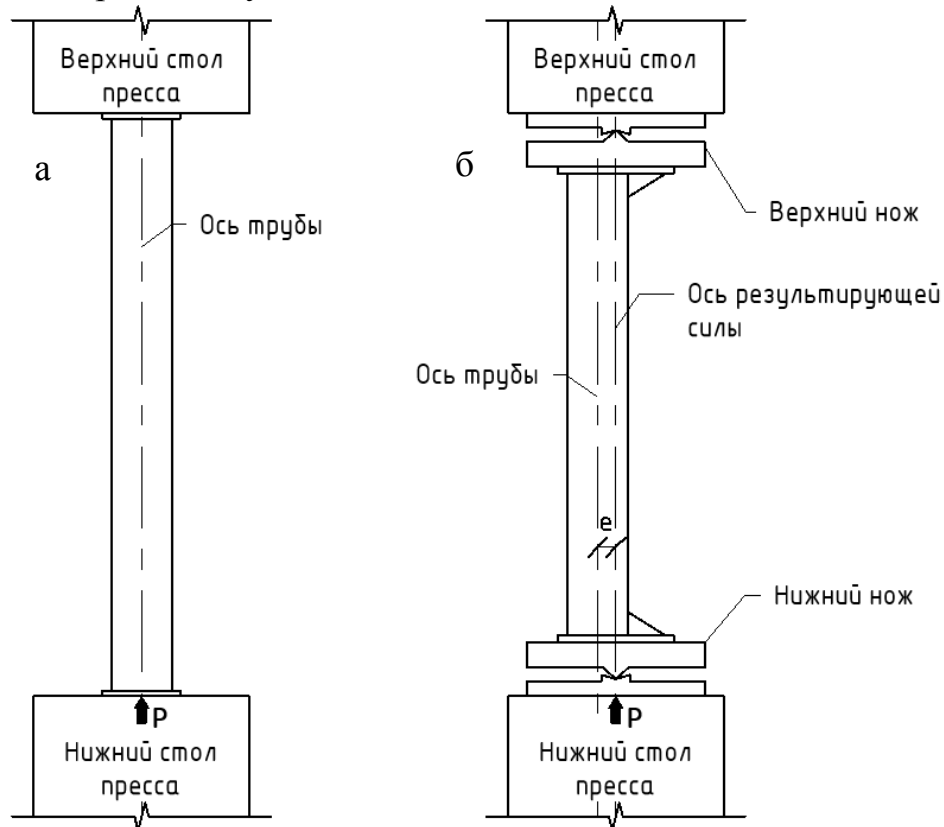


Рисунок 6 – Схема испытаний образцов труб: а) условное центральное сжатие; б) внецентренное сжатие

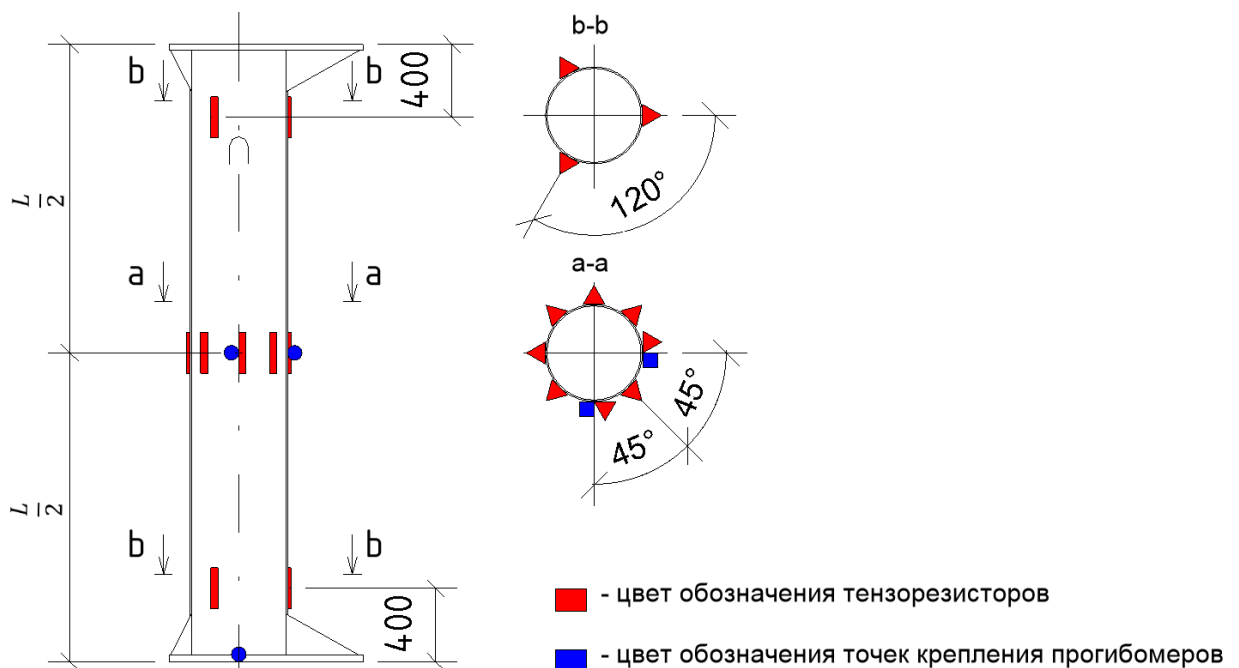


Рисунок 7 – Схема установки тензодатчиков и прогибомеров

Таблица 2 – Расчетные характеристики образцов труб. Критические нагрузки по результатам испытаний и расчетов

Маркировка образца	$\lambda$	$D/t$	$m$	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_{пц}/\sigma_T$	$N_{Испытания}$ , кН	$N_{Ansys}$ , кН	$N_{Maple}$ , кН	$N_{СП}$ , кН
325x9-A-0	34,0	36	0,116	597	0,78	4709 (м)	4287	4365 (о)	4326 (пр)
325x5-0	33,6	65	0,114	558	0,86	2708 (м)	2345	2364 (о)	2178 (м)
530x8-0	20,6	66	0,098	557	0,81	6377 (м)	6563	6563 (м)	5857 (м)
325x9-A-70	33,4	36	0,911	597	0,78	2649 (о)	2884	2894 (о)	2796 (пр)
325x5-70	33,0	65	0,888	558	0,86	1619 (м)	1540	1530 (м)	1344 (м)
325x9-A-120 (1)	33,4	36	1,561	597	0,78	2060 (о)	2315	2315 (м)	2080 (пр)
325x9-A-120 (2)	33,4	36	1,561	597	0,78	2060 (о)	2315	2315 (м)	2080 (пр)
325x9-B-120 (1)	21,7	36	1,561	520	0,93	2040 (м)	2246	2119 (м)	1815 (пр)
325x9-B-120 (2)	21,7	36	1,561	520	0,93	2040 (м)	2246	2119 (м)	1815 (пр)
325x5-120 (1)	33,0	65	1,523	558	0,86	1177 (м)	1226	1197 (м)	1040 (м)
325x5-120 (2)	33,0	65	1,523	558	0,86	1158 (м)	1226	1197 (м)	1040 (м)
530x8-150	20,2	66	1,167	557	0,81	3630 (м)	3973	3855 (м)	3227 (м)
530x8-210	20,2	66	1,633	557	0,81	2884 (м)	3394	3247 (м)	2698 (м)
530x10-A-0	20,7	53	0,098	507	0,92	7456 (м)	7573	7544 (м)	8015 (о)
530x10-B-0	20,7	53	0,098	431	0,94	6357 (м)	6484	6455 (м)	6847 (о)
720x7,5-0	15,1	96	0,090	575	0,95	8162 (м)	8976	8898 (м)	7416 (м)
530x10-B-120	20,3	53	0,940	431	0,94	3924 (м)	4258	4061 (м)	3630 (пр)
530x10-A-120	20,3	53	0,940	507	0,92	4709 (м)	4954	4768 (м)	4267 (пр)
530x10-A-180	20,3	53	1,411	507	0,92	3728 (м)	4169	3914 (м)	3434 (пр)
530x10-B-180	20,3	53	1,411	431	0,94	3326 (м)	3590	3335 (м)	2923 (пр)
720x7,5-225	14,8	96	1,276	575	0,95	3924 (м)	5082	4473 (м)	3895 (м)

Обозначения, принятые в таблице 2:

$N_{\_}$  – критическая нагрузка, кН;

о – общая устойчивость;

м – местная устойчивость;

пр – прочность;

$m$  – относительный эксцентриситет (для центрального сжатия принят с учетом случайного эксцентриситета  $\frac{i}{20} + \frac{L}{750}$ );

$\lambda$  – гибкость (рассчитывалась исходя из фактической расчетной длины равной расстоянию между осями вращения верхнего и нижнего столов пресса);  $D/t$  – отношение наружного диаметра трубы к толщине стенки.

Примечание – для результатов нормативного и аналитического расчета (Maple) в скобках приводится решающий критерий оценки несущей способности, а для испытаний – фактический вид потери устойчивости.





С помощью прогибомеров измерялись прогибы в среднем сечении труб в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Один прогибомер фиксировал вертикальные перемещения подвижной опоры.

Для измерения относительных деформаций на образцы устанавливались тензометрические датчики в виде фольговых тензорезисторов с базой 5 мм. На каждый образец устанавливалось 14 датчиков: 8 – на среднее сечение; по 3 датчика – на сечения в 400 мм от торцов.

Нагрузка на образцы подавалась ступенями с приращением 1...20% от расчетной критической нагрузки. Выдержка между ступенями составляла от 1 до 15 минут. Испытания велись до момента интенсивного роста прогибов и деформаций на фоне падения и нагрузки.

По результатам испытаний были получены: критические нагрузки, прогибы, перемещения торцов, относительные деформации контрольных точек (рисунок 9), общий вид деформирования и характер потери устойчивости труб (рисунок 8б).

Результаты испытаний сравнивались (таблица 2) с: конечно-элементным расчетом в программе Ansys (рисунок 8а); аналитическим расчетом, описанным в третьей главе; нормативным расчетом в соответствии с СП 16.13330.2017.

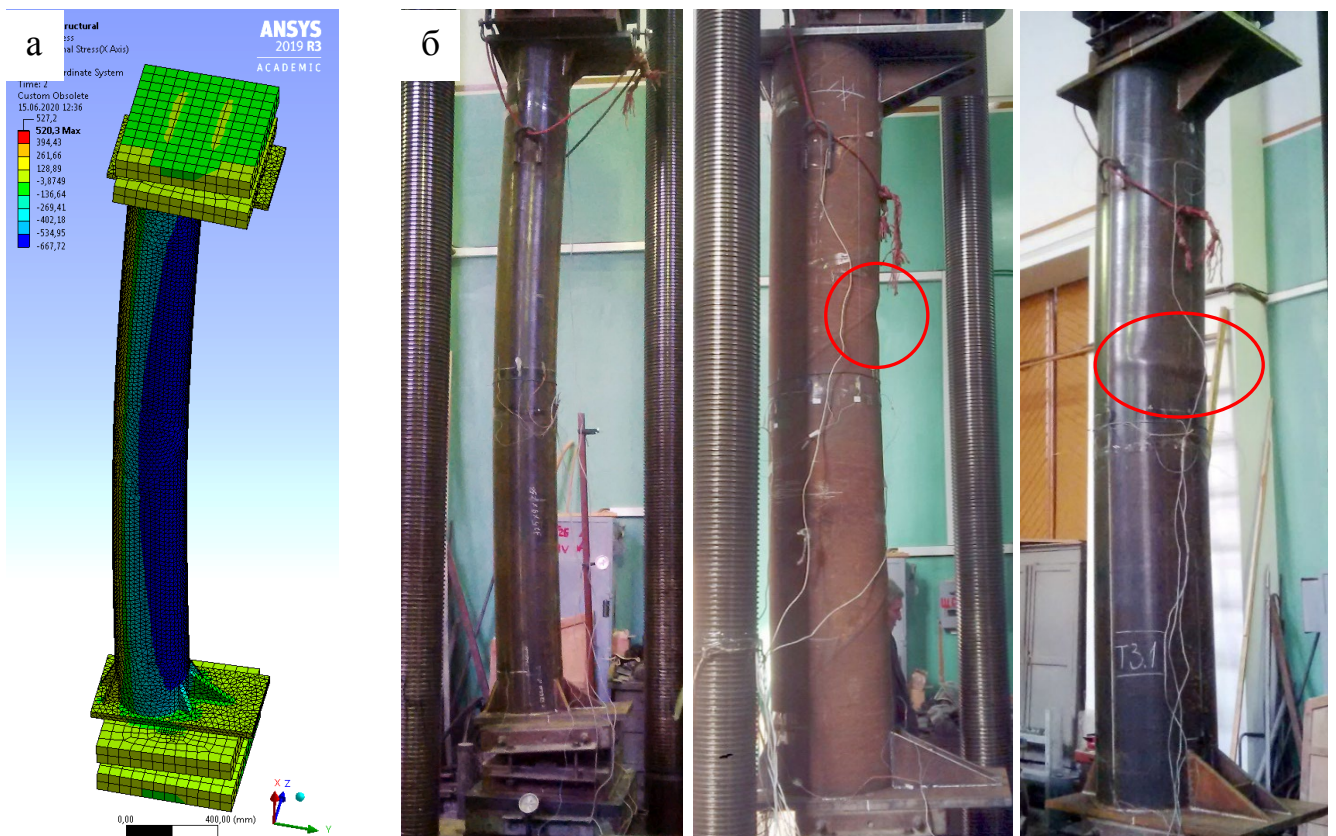


Рисунок 8 – Вид деформации моделей труб: а) конечно-элементная модель; б) натурные модели



Отмечены случаи потери общей устойчивости (у 3 образцов) и местной устойчивости (у 18 образцов). При потере местной устойчивости прямошовным трубам были свойственны выпучины, а спиральношовным – вмятины (рисунок 8б). Причем, у спиральношовных труб деформации стенки, зачастую, происходили вблизи сварного шва. Вопреки расчетным предположениям, потеря устойчивости стенки, в большинстве случаев, происходила не в среднем сечении, а в произвольном сечении – в месте наибольших начальных несовершенств.

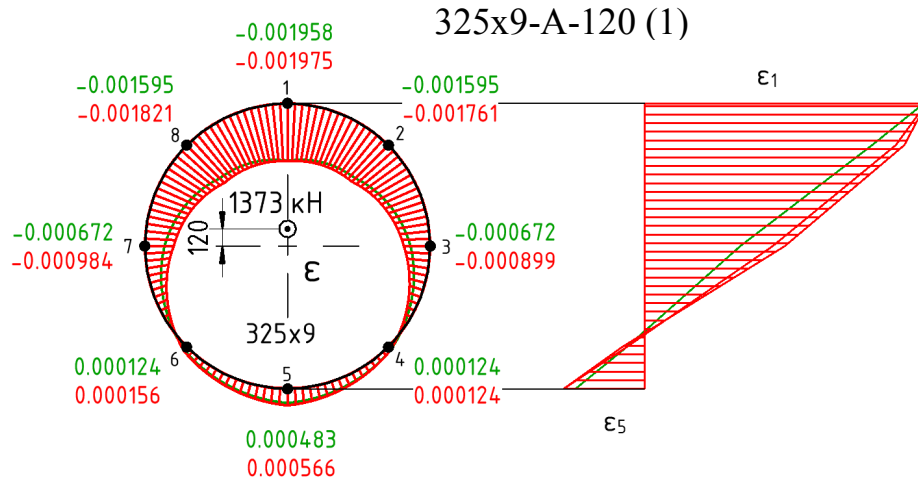


Рисунок 9 – Эпюры (круговые и линейные) относительных деформаций среднего сечения при внецентренном сжатии в случае численного расчета (зеленый цвет) и по результатам испытаний (красный цвет)

Установлено, что конечно-элементная модель трубы на основе идеальной цилиндрической оболочки, не пригодна для оценки несущей способности труб средней и малой гибкости ( $\lambda < 34$ ). Такая модель не учитывает особенностей потери местной устойчивости и приводит к завышению несущей способности.

Нормативный расчет с учетом проверок местной устойчивости занижает несущую способность до 20%, а в ряде случаев – завышает до 8%.

Принятый в аналитическом расчете критерий местной устойчивости труб в соответствии с выражениями Э.И. Григолюка (4) и Б.М. Броуде (5) является завышенным и нуждается в корректировке.

**В пятой главе** приводятся практические рекомендации по расчету сжато-изгибаемых сварных труб.

По результатам испытаний установлено, что фактические случайные эксцентриситеты не превышают значений, определяемых по формуле СП 294.13258000.2017:

$$e_b = \frac{i}{20} + \frac{l}{750}, \quad (6)$$

где:  $i$  – радиус инерции;  $l$  – расчетная длина стержня.

Учитывать начальные «стержневые» несовершенства труб в расчетах рекомендуется с помощью случайных эксцентриситетов по формуле (6). Данная

рекомендация относится и к нормативному расчету по СП 16.13330.2017, то есть предлагается вместо расчета на центральное сжатие выполнять расчет на внецентренное сжатие с учетом случайных эксцентриситетов.

По результатам тензометрических измерений отмечено, что фактические деформационные свойства материала несколько отличаются от результатов испытаний на растяжение пропорциональных цилиндрических образцов. Для учета этих отличий предлагается использовать в расчетах поправочные коэффициенты для предела текучести и предела пропорциональности ( $\delta_T$  и  $\delta_{пц}$ ).

$$\sigma_{T,прив.расч} = \delta_T \cdot \sigma_{T,цил} \quad (7)$$

$$\sigma_{пц,прив.расч} = \delta_{пц} \cdot \sigma_{пц,цил} \quad (8)$$

где:  $\sigma_{T,цил}$ ,  $\sigma_{пц,цил}$  – предел текучести и предел пропорциональности по результатам испытаний цилиндрических образцов;

$\sigma_{T,прив.расч}$ ,  $\sigma_{пц,прив.расч}$  – приведенный расчетный предел текучести и предел пропорциональности;

$$\delta_T = \begin{cases} 0,8; & \text{если } -1 \leq \alpha < -0,2 \\ 0,84 + 0,2\alpha; & \text{если } -0,2 \leq \alpha \leq 0,8; \\ 1; & \text{если } 0,8 < \alpha \leq 1 \end{cases} \quad \delta_{пц} = 0,85;$$

$$\alpha = \frac{1-m}{1+m}; \quad m - \text{относительный эксцентриситет}$$

Для конечно-элементного моделирования несовершенств стенки предлагается использовать модель трубы с осесимметричным участком, образующая которого представляет собой волну синусоиды (рисунок 10). Данный участок также можно охарактеризовать как собственную форму колебаний цилиндрической оболочки. Располагать его следует в месте наибольших напряжений трубы.

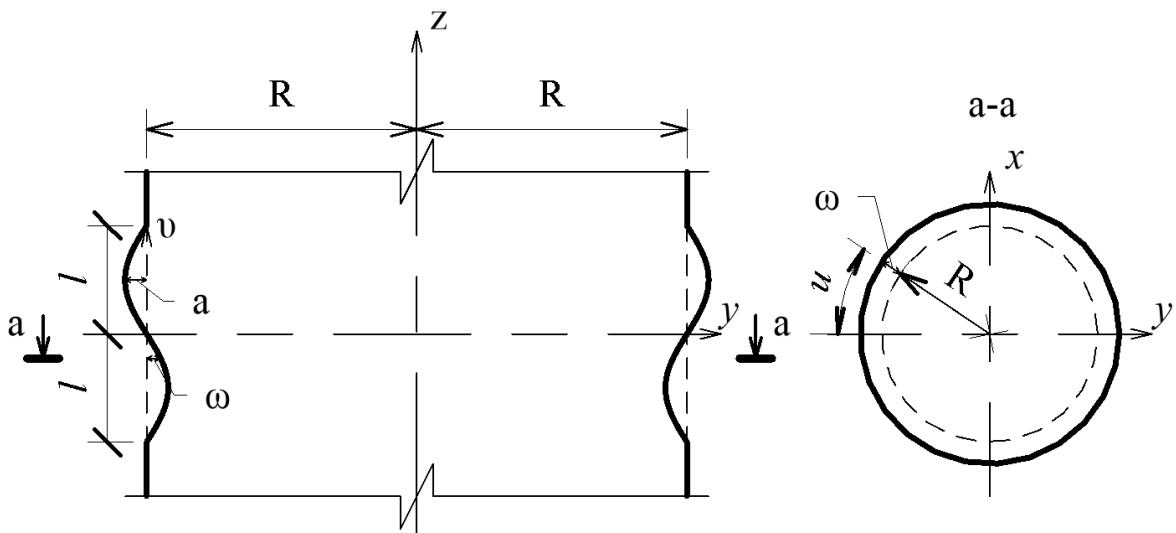


Рисунок 10 – Моделирование несовершенств труб осесимметричным начальным искривлением

Амплитуда синусоидальной образующей характеризует величину начального несовершенства стенки. На основе результатов испытаний были

подобраны амплитуды, при которых конечно-элементные модели теряли устойчивость при тех же прогибах и нагрузках что и экспериментальные модели (рисунок 11).

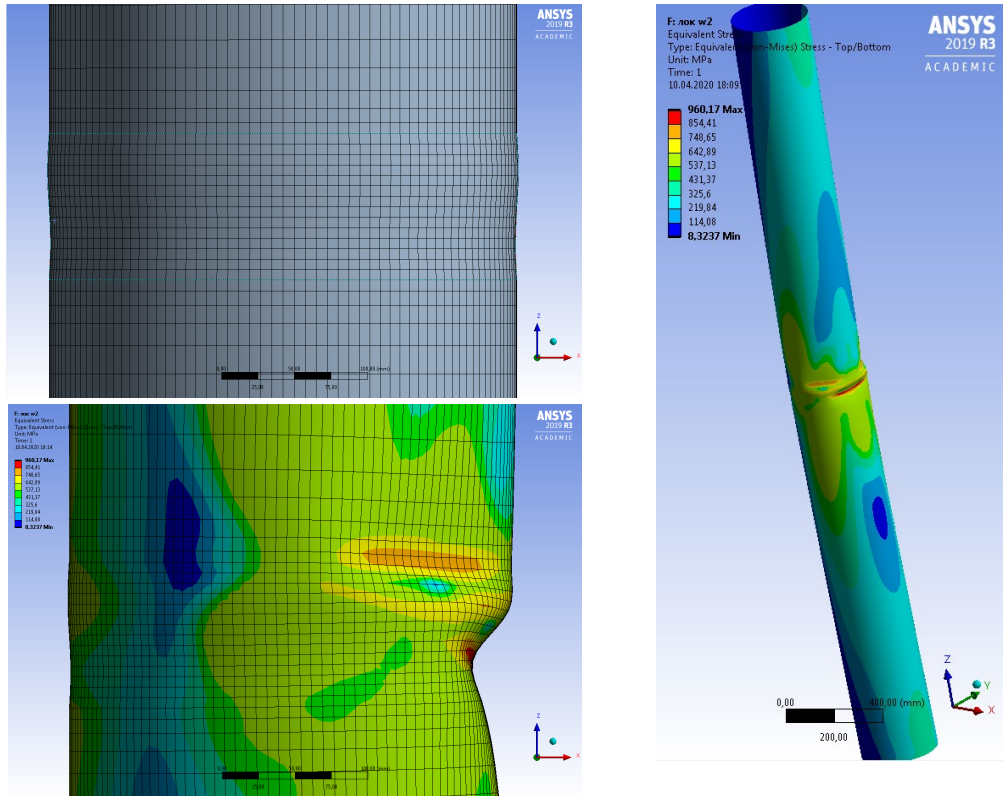


Рисунок 11 – Вид расчетной конечно-элементной модели трубы 325x5-120 (1) с учетом локальных дефектов

На основе результатов испытаний предлагается критерий потери местной устойчивости стальных сварных труб для строительных конструкций:

$$\sigma_{\text{кр.расч.нов.}} = c_{\text{пл}} \cdot \sqrt{E_k \cdot E_c} \cdot \frac{t}{R} \quad (9)$$

где:  $E_k$  – касательные модуль;  $E_c$  – секущий модуль;  $t$  – толщина стенки трубы;  $R$  – радиус срединной поверхности трубы;  $c_{\text{пл}}$  – коэффициент, учитывающий локальные несовершенства и изгиб трубы (таблица 3).

Таблица 3 – Коэффициент  $c_{\text{пл}}$  на основе экспериментальных данных

$\alpha_{\text{нл}}$		1	-1
$c_{\text{пл}}$	Прямошовные трубы	0,08÷0,19	0,45
	Спиральношовные трубы	0,20÷0,31	

где:  $\alpha_{\text{нл}}$  – отношение минимального напряжения в сечении к максимальному в момент потери устойчивости.

Выражение (9) точнее оценивает критические напряжения труб, теряющих устойчивость в упругопластической стадии, и в отличие от нормативного расчета, не завышает критические напряжения при изгибе.

Предлагается инженерная методика расчета критических нагрузок сжато-

$$N_{кр} = \frac{A \cdot (a - \sqrt{a^2 - b})}{2 \cdot \bar{\lambda}^2}, \quad (10)$$

где:  $a = \bar{\lambda}^2 \cdot \sigma_{cr.b} + (m + 1) \cdot R_y \cdot \pi^2$ ;  $b = 4 \cdot R_y \cdot \sigma_{cr.b} \cdot \bar{\lambda}^2 \cdot \pi^2$ ; основные обозначения в соответствии с СП 16.13330.2017;

$$\sigma_{cr.b} = \frac{\sigma_{cr.1}}{8} \cdot \left(9 - \frac{1-m}{1+m}\right).$$

изгибаемых труб, основанная на модели упруго стержня (10). В качестве критерия истощения несущей способности используются критические напряжения цилиндрических оболочек в соответствии с СП 16.13330.2017.

Нормативный расчет на общую устойчивость, как показывают испытания, завышает несущую способность даже для толстостенных труб ( $\frac{D}{t} < 40$ ). При этом расхождение критических нагрузок увеличивается с ростом эксцентриситета (рисунок 12). Расчет по (10) предупреждает потерю как местной, так и общей устойчивости.

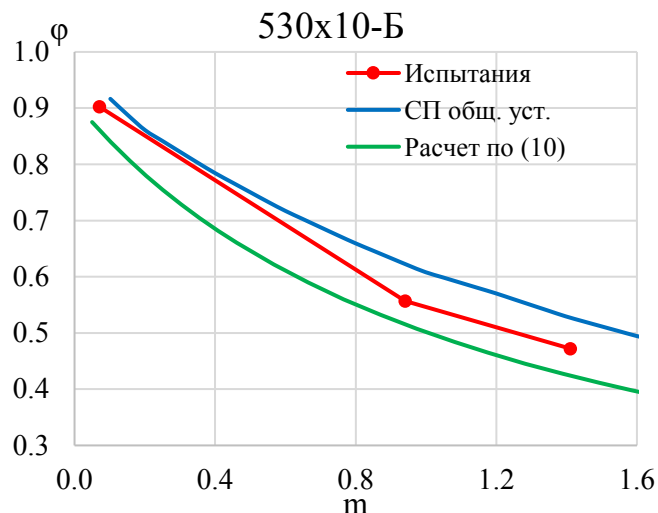


Рисунок 12 – Зависимости коэффициента устойчивости от относительного эксцентриситета

Рекомендуется отменить ограничение СП 16.13330.2017 по проверке местной устойчивости в соответствии с п. 11.2.2  $\left(\frac{r}{t} \leq 0.5\pi \sqrt{\frac{E}{R_y}}\right)$ , поскольку оно не соответствует результатам испытаний и приводит к завышению несущей способности.

**В приложении А** приводятся диаграммы растяжения трубных сталей.

**В приложении Б** приводятся акты внедрения результатов работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Трубы круглого сечения из сталей повышенной и высокой прочности являются высокоэффективными элементами стальных конструкций, преимущество которых доказано на примере использования в строительстве многих уникальных сооружений. Отечественная нормативно-методическая база по части расчета и проектирования труб и трубчатых конструкций не актуализировалась многие десятилетия и требует дополнений, которые будут соответствовать современным тенденциям, технологиям производства и материалам.

2. Рассмотрены прямошовные и спиральношовные трубы, изготовленные по различным технологиям и имеющие принципиальные отличия в свойствах сталей, характере и величине начальных несовершенств. Прямошовные трубы поставлены без объемной термической обработки (ОТО), что характерно сказывается на форме диаграммы деформирования « $\sigma$ - $\epsilon$ » – отмечается короткая площадка текучести. При изготовлении труб с прямым швом использовалась сварка токами высокой частоты, которая делает шов фактически незаметным в теле трубы. Исследования показали, что начальные несовершенства стенок прямошовных труб обусловлены остаточными напряжениями и структурными особенностями сталей из-за отсутствия ОТО. Спиральношовные трубы поставляются с ОТО и имеют ярко выраженную площадку текучести. При их изготовлении используется классическая дуговая сварка, создающая явное утолщение стенки, которое становится концентратором напряжений.

3. В рамках исследовательской работы: проведены лабораторные испытания 21 модели стальной сварной трубы на сжатие с изгибом ( $\bar{\lambda} = 0,78 \div 1,83$  или  $\lambda = 14,8 \div 34,0$ ;  $\frac{D}{t} = 36 \div 96$ ;  $\sigma_T = 341 \div 597$  МПа;  $m = 0 \div 1,63$  или  $e = 0 \div 225$  мм); детально исследованы материалы труб семи типов с различными физическими, химическими, геометрическими и структурными свойствами; создано и проанализировано более двухсот конечно-элементных моделей различных конфигураций; выполнено более тысячи расчетов по действующему СП 16.13330.2017, аналитически исследованы зависимости критических нагрузок труб от геометрических и физических характеристик; проанализировано 16 отечественных и зарубежных методик расчета труб и цилиндрических оболочек.

4. Экспериментально-теоретические исследования показали, что существенное влияние на несущую способность и напряженно-деформированное состояние оказывают характер и величина начальных несовершенств. Наибольшее значение имеют локальные несовершенства стенок труб. Теоретические расчеты, учитывающие их влияние, дают критические нагрузки и деформации близкие к экспериментальным значениям. Величины случайных эксцентриситетов по

результатам исследований не превышают значений, определяемых выражением (6). Установлено, что увеличение изгибающего момента в сечении трубы приводит к снижению предела пропорциональности и текучести стали в продольном направлении (относительно испытаний на растяжение стандартных пятикратных цилиндрических образцов) до 20%. Это обусловлено: изменениями напряженно-деформированного состояния труб, остаточными напряжениями, неравномерностью свойств трубных сталей по толщине.

5. Существенное влияние на напряженно-деформированное состояние труб, работающих в упругопластической стадии, оказывает диаграмма деформирования стали « $\sigma$ - $\epsilon$ ». Форма участка  $\sigma_{\text{пц}} - \sigma_{\text{т}}$  определяет момент потери местной и общей устойчивости. При детальном исследовании сжато-изгибаемых труб рекомендуется подробно моделировать пластическую часть диаграммы « $\sigma$ - $\epsilon$ », особенно, участок до конца площадки текучести. В рамках данного исследования предложен способ аппроксимации диаграммы « $\sigma$ - $\epsilon$ » линейно гиперболической функцией, который достаточно точно ( $R^2 \approx 97-98\%$ ) описывает переход от  $\sigma_{\text{пц}}$  к  $\sigma_{\text{т}}$ .

6. На основе полученных результатов испытаний дана количественная оценка начальных несовершенств труб. Предложен критерий потери местной устойчивости стальных сварных труб для строительных конструкций. Разработаны методики оценки напряженно-деформированного состояния и несущей способности сжато-изгибаемых сварных труб для строительных конструкций: аналитическая, основанная на аналитической модели шарнирно опертого упругопластического стержня; конечно-элементная, учитывающая локальные несовершенства стенки; упрощенная инженерная, основанная на нормативных проверках и приводящая рассматриваемую задачу к упруго деформируемому стержню. Каждая методика учитывает стержневые и оболочечные особенности работы трубчатых элементов, что является обязательным для труб рассматриваемой геометрии.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:**

- исследование влияния опорных закреплений различной жесткости на напряженно-деформированное состояние сжато-изгибаемых труб;
- совершенствование методик расчета трубчатых конструкций из сталей повышенной и высокой прочности;
- исследование начальных несовершенств стальных труб отечественного и зарубежного производства и учет их влияния в расчетах трубчатых конструкций;
- разработка рекомендаций по проектированию и расчету строительных конструкций из труб.

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации****Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Конин, Д.В. Влияние диаграммы "σ-ε" на несущую способность при сжатии труб из стали высокой прочности / Д.В. Конин, П.Д. Одесский, А.Р. Олуромби // Строительство и реконструкция. - 2017. – №5 (73). – С. 15-20.
2. Конин, Д.В. Анализ устойчивости прямошовных и спиральношовных труб из высокопрочных сталей при центральном и внецентренном сжатии на примере натуральных экспериментов / Д.В. Конин, А.Р. Олуромби // Известия высших учебных заведений. Строительство. - 2018. - №6 (714). - С. 106-116.
3. Конин, Д. В. О расчете местной и общей устойчивости стальных труб круглого сечения при внецентренном сжатии в упругопластической постановке / Д. В. Конин, А. Р. Олуромби // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2018. – №6. – С. 25-29.
4. Конин, Д. В. Исследование влияния тонкостенности труб круглого сечения на устойчивость при центральном и внецентренном сжатии / Д. В. Конин, А. Р. Олуромби // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 12. – С. 42-48.
5. Олуромби, А.Р. Влияние состояния поставки стальных труб на несущую способность при сжатии с изгибом / А.Р. Олуромби // Строительная механика и расчет сооружений. - 2019. - №5(286). - С. 57-63.

**Публикации в других изданиях:**

6. Олуромби А.Р. Аналитический расчет сжато-изогнутых стержней трубного профиля в упругопластической стадии работы / А.Р. Олуромби, Д.В. Конин // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018). Программа и тезисы докладов. – 2018. – С. 161.
7. Олуромби А.Р. Устойчивость прямошовных и спиральношовных труб из высокопрочных сталей при сжатии и сжатии с изгибом / А.Р. Олуромби, Д.В. Конин // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018). Программа и тезисы докладов. – 2018. – С.117.
8. Ведяков И.И. К вопросу об использовании электросварных прямошовных труб из сталей повышенной прочности в строительных металлических конструкциях / И.И. Ведяков, Д.В. Конин, А.Р. Олуромби // Вестник «НИЦ» Строительство». – 2018. – №3 (18). – С. 102-112.
9. Ведяков И.И. Сравнительный анализ устойчивости стальных труб малой гибкости при действии продольных сжимающих сил / И.И. Ведяков, Д.В. Конин, А.Р. Олуромби // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли российской федерации в 2017 году. Сборник научных трудов Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2018. – С. 161-170.