

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
(ННГАСУ)

На правах рукописи



Шкода Ирина Васильевна

**МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОБСТВЕННЫХ И  
ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В СТЕРЖНЕВЫХ ТРУБОБЕТОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЯХ**

1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, доцент  
Хазов Павел Алексеевич

Нижегород – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 4  |
| ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАТЕРИАЛАХ И КОНСТРУКЦИЯХ .....   | 11 |
| 1.1. Обзор методов исследования динамического поведения подъемно-транспортных машин и путевых конструкций .....   | 11 |
| 1.1.1. Динамические процессы подъемно-транспортные машины .....   | 11 |
| 1.1.2. Методы исследования динамических воздействий на путевые конструкции .....  | 14 |
| 1.1.2.1. Фундаментальные исследования динамики систем с подвижными нагрузками .....   | 17 |
| 1.1.3. Методы исследования усталостного разрушения конструкций .....  | 21 |
| 1.2. Особенности работы сталебетонных конструкций при статических воздействиях ..   | 23 |
| 1.2.1. Общие исследования напряженно-деформированного состояния труб и их узлов ..  | 23 |
| 1.2.2. Особенности работы железобетонных и сталебетонных элементов .....  | 27 |
| 1.2.3. Аналитические, численные и экспериментальные методы исследования трубобетонных конструкций .....   | 29 |
| 1.3. Особенности работы сталебетонных конструкций при динамических воздействиях   | 33 |
| 1.3.1. Обзор экспериментальных методов определения динамических характеристик деформируемых твердых тел .....   | 33 |
| 1.3.2. Специфика поведения металлов и сплавов при динамических воздействиях .....   | 36 |
| 1.3.3. Динамика стальных конструкций из труб .....  | 38 |
| 1.3.4. Особенности высокоскоростного деформирования бетонов и железобетонов .....   | 41 |
| Выводы по главе 1 .....   | 52 |
| ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ПРИ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ ..... | 54 |
| 2.1. Классификация и параметры колебательных процессов .....  | 54 |
| 2.2. Влияние композитной природы трубобетона на его демпфирующие свойства .....   | 56 |
| 2.3. Теоретические основы свободных колебаний трубобетонных стержней .....  | 58 |
| 2.3.1. Методика определения динамических характеристик материала при свободных колебаниях .....   | 60 |
| 2.3.2. Экспериментальная методика определения предварительно сжимающих напряжений на собственные колебания трубобетонных стержней .....   | 61 |
| 2.4. Методика исследования демпфирующих свойств трубобетона при вынужденных колебаниях в различных частотных диапазонах .....   | 66 |
| Выводы по главе 2 .....   | 80 |
| ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ КАРКАСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ СО СКВОЗНЫМИ ТРУБОБЕТОННЫМИ КОЛОННАМИ .....               | 82 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.1. Повышение демпфирующих свойств стальных конструкций подъемно-транспортных машин за счет внедрения бетонного сердечника .....                                      | 82  |
| 3.1.1. Методика масштабного моделирования в экспериментальном исследовании стержневых систем.....  | 84  |
| 3.1.2. Сравнительный анализ повышения демпфирующих свойств стальных подкрановых систем за счет внедрения бетонного сердечника при вынужденных затухающих колебаниях... | 88  |
| Выводы по главе 3 .....  | 101 |
| ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СТАЛЬНЫХ И ТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....   | 102 |
| 4.1. Разработка алгоритмов анализа узловых соединений стальных трубчатых элементов с использованием численного моделирование фланцевых соединений.....                 | 102 |
| 4.1.1. Численное моделирование и анализ фланцевого соединения круглых стальных труб  | 103 |
| 4.1.2. Численное моделирование и анализ фланцевого соединения гнутосварных труб прямоугольного сечения.....  | 108 |
| 4.2. Методика назначения деформационно-прочностных характеристик для моделирования напряженно-деформированного состояния стержневых элементов.....                     | 116 |
| Выводы по главе 4 .....  | 121 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 123 |
| ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ .....  | 124 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....  | 128 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А .....   | 153 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В процессе эксплуатации подъемно-транспортных машин и механизмов, конструкций автомобильных и железнодорожных мостов, нефтяных и газовых платформ возникают колебания, вызванные нагрузками от движущихся грузов, вибрацией от кранового оборудования, воздействием ветра, сейсмической активностью и другими динамическими возмущениями. Для обеспечения безопасности и надежности работы таких систем необходимо снижать эти колебания и рассеивать энергию при динамических нагрузках. Существуют различные технологии, предназначенные для уменьшения амплитуды колебаний и повышения устойчивости таких конструкции, основанные на применении демпфирующих материалов, к которым могут быть отнесены бетоны и созданные на их основе композитные трубобетонные конструкции. Сочетание в композите характеристик стали и бетона делает его привлекательным для использования в различных инженерных проектах. Разработка экспериментальных методик исследования деформационно-прочностных характеристик трубобетона является перспективным направлением.

Для рационального и надежного проектирования конструкций, подверженных динамическим нагрузкам, а также для обеспечения прочности и устойчивости их элементов критически важно иметь хорошее понимание демпфирующих свойств материалов. В связи с этим исследование поведения современных конструкционных материалов, таких как трубобетон, в условиях динамических нагрузок становится ключевой задачей с точки зрения обеспечения безопасности и эффективности инженерных решений, разработки методов математического и экспериментального моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций.

С появлением новых материалов существует необходимость в оснащении баз данных программно-вычислительных комплексов, в которых поведение математических моделей, заменяющих реальные конструкции, зависит от введенных параметров и констант, характеризующих свойства материалов, получаемых на основе многочисленных экспериментальных исследований. Это также подчеркивает **актуальность** данной темы исследования.

**Степень разработанности темы исследований.** Тема поведения трубобетона при статических нагрузках достаточно хорошо изучена отечественными и зарубежными учеными. Результаты исследований опубликованы в многочисленных работах таких авторов, как Г.П. Передерий, А.А. Гвоздев, О.Я. Берг, В.А. Росновский, А.И. Кикин, В.А. Труль, Л.К. Лукша, Г.А. Гениев, Р.С. Санжаровский, Л.И. Стороженко, А.Л. Кришан, Г.В. Несветаев, Д.Р. Маилян, В.И. Римшин, Н. Н. Аистов, А. Ф. Липатов, В. Ф. Маренин, Н. Ф. Скворцов, а также J. S. Sewell, K. Sakino, M. Tomii, K. Watanabe, R. Knowles, R. Park, F. Abed, P.F. Sakino. Эти работы внесли значительный вклад в понимание и моделирование поведения трубобетонных конструкций при

статическом нагружении. Несмотря на малую изученность трубобетона при динамическом нагружении следует отметить важный вклад в развитие динамики бетонов и железобетонов такими учеными, как А.М. Брагов, А.К. Ломунов, Л.А. Игумнов, А.Ю. Константинов, Д.А. Ламзин.

На сегодняшний день существует явный дефицит работ, посвященных динамическому поведению трубобетона. Это обусловлено отсутствием серийных испытательных установок, ограниченностью программных средств обработки данных и недостаточной методической базой для проведения динамических испытаний. Кроме того, в действующих нормативных документах по проектированию сталежелезобетонных конструкций отсутствует методика расчета на динамическое воздействие, что сдерживает применение трубобетона. Следовательно, существует острая необходимость в проведении углубленных исследований и разработке соответствующих методик, которые в последующем могут быть интегрированы в нормативную базу и внедрены в существующие САПР, что позволит эффективно использовать трубобетон в условиях динамических воздействий.

**Целью диссертационной работы** является разработка экспериментальных методик проведения динамических испытаний и основанные на них исследования деформационных и демпфирующих свойств трубобетонных конструкций при динамических воздействиях.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **основные задачи**:

- 1) Разработка экспериментальной методики определения динамических характеристик предварительно напряженных трубобетонных стержней при свободных и вынужденных колебаниях, позволяющей оценить влияние уровня сжимающих напряжений на амплитудно-частотные характеристики и демпфирующие свойства материала;
- 2) Разработка экспериментальной методики сравнительного анализа динамических характеристик стальных и трубобетонных моделей конструкций для эксплуатации подъемно-транспортных машин;
- 3) Разработка алгоритма поиска рациональных вариантов соединений стальных трубчатых элементов на основе вычислительных экспериментов;
- 4) Разработка методики назначения деформационно-прочностных характеристик для моделирования напряженно-деформированного состояния трубобетонных конструкций при помощи стержневых конечных элементов.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- Предложена экспериментальная методика для определения динамических характеристик предварительно напряженных трубобетонных стержней при свободных и вынужденных колебаниях, а также разработано программное обеспечение для ее реализации (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689601). В отличие от ранее

предложенных, методика позволяет оценить влияние уровня сжимающих напряжений на амплитудно-частотные характеристики и демпфирующие свойства материала в различных частотных диапазонах. На основе экспериментальных данных получена математическая зависимость (полином третьей степени), описывающая влияние осевой нагрузки на приведенный коэффициент  $E_N$  (п. 3, п. 13, п. 14, п. 15);

- Разработана экспериментальная методика анализа динамических характеристик стальных и трубобетонных конструкций, основанная на испытаниях масштабных моделей каркасов для эксплуатации подъемно-транспортных машин, позволяющая оценить эффективность внедрения бетонного сердечника в стальные стержневые элементы для повышения их демпфирующей способности (п. 13, п. 15);

- Предложен алгоритм поиска рациональных вариантов соединений стальных трубчатых элементов, основанный на результатах многочисленных вычислительных экспериментов над цифровыми моделями, позволяющий обеспечить прочность разрабатываемой конструкции (п. 14);

- Разработана методика назначения деформационно-прочностных характеристик для моделирования напряженно-деформированного состояния трубобетонных конструкций при помощи стержневых элементов. На основании экспериментальной апробации методики создано программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682661) (п. 14, п. 15).

**Теоретическая значимость** работы заключается в систематизации и развитии методов анализа динамических характеристик трубобетонных конструкций. Разработаны и апробированы новые методики экспериментальных исследований и расчетные алгоритмы, позволяющие оценить влияние начального напряженного состояния на динамические параметры конструкций. Полученные математические зависимости и программные комплексы формируют основу для создания усовершенствованных методов расчета напряженно-деформированного состояния трубобетонных элементов при динамических воздействиях. Теоретические результаты исследований были внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО ННГАСУ по направлениям подготовки: 08.03.01 Строительство (профиль: промышленное и гражданское строительство), 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений (специализация: строительство высотных и большепролетных зданий и сооружений)» (акт внедрения №01.01-12/9 от 18.02.2026 г.).

**Практическая значимость** работы заключается в разработке и внедрении комплекса методов и программных средств для проектирования трубобетонных конструкций (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682661 от 26.09.2024, № 2024689601 от 09.12.2024). Разработанное программное обеспечение и

экспериментальные методики позволяют на стадии проектирования точно оценивать динамические характеристики конструкций с учетом реальных условий эксплуатации, включая влияние осевых нагрузок. Предложенные алгоритмы поиска рациональных соединений и методы назначения деформационно-прочностных характеристик обеспечивают повышение эффективности конструктивных решений и снижение материалоемкости. Также практическая значимость подтверждается **внедрением** результатов:

1. при разработке систем мониторинга конструкций в рамках проекта «Техноплатформа 2035», реализованного на базе ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (№01/26 от 20.01.2026 г.).

2. в рамках сотрудничества с АО «Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА», г. Арзамас, Нижегородская область (б/н от 21.02.2025 г.).

**Методология и методы исследования.** Методологической основой работы является системный подход, сочетающий аналитические, численные и экспериментальные методы. В процессе исследования использованы: методы теоретической механики и теории колебаний, методы математического и компьютерного моделирования, методы механики деформируемого твердого тела и механики композитов, экспериментальные метод, методы статистического анализа.

**Основные положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментальная методика определения динамических характеристик предварительно напряженных трубобетонных стержней при свободных и вынужденных колебаниях (**п. 3, п. 13, п. 14, п. 15**);

2. Экспериментальная методика анализа динамических характеристик стальных и трубобетонных конструкций в масштабных моделях каркасов для эксплуатации подъемно-транспортных машин (**п. 13, п. 15**);

3. Алгоритм поиска рациональных вариантов соединений стальных трубчатых элементов (**п. 14**);

4. Методика назначения деформационно-прочностных характеристик для моделирования трубобетонных конструкций стержневыми элементами (**п. 14, п. 15**).

Работа выполнена при следующей **финансовой поддержке**:

1. в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2024-2026 гг. (FFUF -2024-0031, № НИОКТР 1023032800130-3-2.3.2);

2. при поддержке Научно-образовательного центра Нижегородской области «Техноплатформа 2035» (соглашение № 16-11-2021/55 от 16.11.2021 г.).

3. в рамках гранта «Фундамент будущего», при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

#### **Степень достоверности результатов**

Достоверность полученных научных результатов и выводов подтверждается применением апробированного математического аппарата теории колебаний, механики деформируемого твердого тела и статистических методов при обработке данных, корректным сопоставлением и принципиальной согласованностью результатов, полученных независимыми методами: аналитического расчета, конечно-элементного моделирования и натуральных экспериментальных исследований, верификацией разработанных расчетных моделей на основе сравнения с данными полноразмерных испытаний моделей конструкций и с результатами, опубликованными другими авторами, а также внедрением методик и программного обеспечения в проектный процесс специализированных организаций и использованием результатов в учебном процессе.

#### **Апробация результатов**

Результаты и основные положения проведенных исследований докладывались и обсуждались на: научной конференции X Всероссийского Фестиваля науки (г. Н. Новгород, 2020 г.); Научном конгрессе 22-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2020» (Нижегород, 2020 г.); XXV Нижегородской сессии молодых ученых (технические, естественные, гуманитарные науки) (г. Н. Новгород, 2020 г.); Международной научно-технической конференции в дистанционном формате «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКоМ - 2020) (г. Москва, 2020 г.); научной конференции XII Всероссийского Фестиваля науки (г. Н. Новгород, 2022 г.); научной конференции XIII Всероссийского Фестиваля науки (г. Н. Новгород, 2023 г.); IV Международной научно-технической конференции «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering» (MPCPE-2023) (г. Владимир, 2023 г.); V Международной научно-технической конференции «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering» (MPCPE-2024) (г. Владимир, 2024 г.); IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания» (г. Москва, 2024 г.); Международной конференции Нижегородского Фестиваля науки (г. Н. Новгород, 2024 г.); 7-й Международной научно-технической конференции в «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКоМ - 2024) (г. Москва, 2024 г.); XIII Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (г. Москва, 2025 г.), XXIV Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки» (г. Н. Новгород, 2025 г.) (Диплом I степени).

## Публикации

По материалам диссертации опубликовано 27 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых изданий по специальности 1.1.7 и приравненных к ним публикаций в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных; 7 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых изданий по смежным специальностям; 1 коллективная монография; 2 свидетельства о регистрации результатов интеллектуальной деятельности; 14 публикаций в сборниках трудов конференций.

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из следующих разделов: введения, четырёх глав, выводов, приложений; изложена на 159 страницах текста, содержит 76 рисунков, 15 таблиц, список литературы из 284 наименований.

Общая структура исследования выглядит следующим образом:

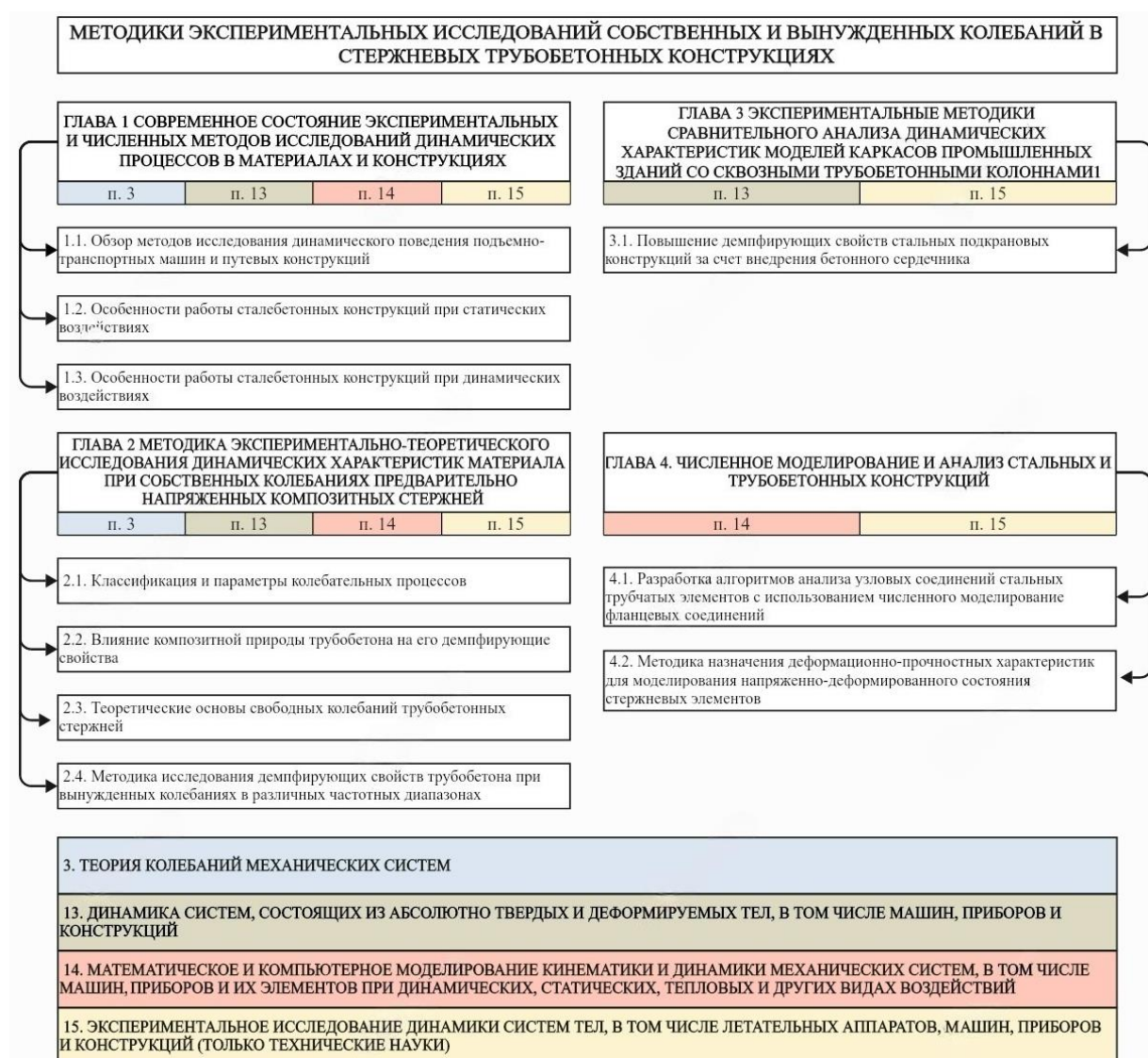


Рисунок 1 – Структура исследования и соответствие пунктам паспорта научной специальности

**Личный вклад автора**

Все представленные в диссертации материалы, а также выносимые на защиту положения, алгоритмы и методы разработаны автором лично. Роль соавторов статей заключалась в техническом содействии по фиксации результатов измерений, подготовке и проведении экспериментов.

# ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАТЕРИАЛАХ И КОНСТРУКЦИЯХ

## 1.1. Обзор методов исследования динамического поведения подъемно-транспортных машин и путевых конструкций

### 1.1.1. Динамические процессы подъемно-транспортные машины

В настоящее время наблюдается значительный рост требований к надежности подъемно-транспортных машин и оборудования. Этот рост обусловлен ключевой ролью данного типа техники в современном производстве, где она обеспечивает непрерывность и бесперебойность основных и вспомогательных технологических процессов в производственной, промышленной и строительной сферах [1].

Из всего перечня видов подъемно-транспортной техники повышенное внимание стоит уделить грузоподъемным кранам с подкрановыми конструкциями (рис.1.1), так как сбои и аварии в работе этих механизмов могут привести к серьезным последствиям, включая травмы персонала, значительные материальные потери, негативное воздействие на окружающую среду и другое технологическое оборудование. Одним из главных факторов, определяющих надежность и энергоэффективность подъемно-транспортных систем является уровень нагруженности их конструкций в условиях эксплуатации. Так как в процессе работы, подкрановые конструкции испытывают постоянные динамические воздействия различного рода, возникающие, например, при подъеме, перемещении и опускании грузов, во время движения и при торможении крана, при действии ветровых потоков на открытом воздухе и т.д., то особую важность приобретает исследование именно динамической нагруженности.

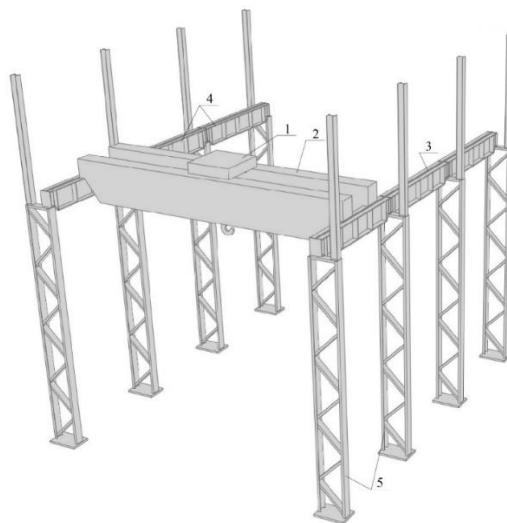


Рисунок 1.1 - Схема расположения несущих конструкций для эксплуатации подъемно-транспортных машин: 1 – тележка крана; 2 – мостовой кран (кран-балка); 3 - крановые рельсы; 4 – подкрановая балка; 5 – колонны

Исследование причин возникновения динамических воздействий, их влияние на элементы подъемно-транспортных машин, а также разработка методов и способов, которые могут снизить негативные последствия и повысить общую надежность и долговечность подобных конструкций, является актуальной задачей.

Авторами [2] создана численная модель мостового крана (рис.1.2), позволяющая прогнозировать динамические процессы в электрической и механической подсистемах крана и отрабатывать новые алгоритмы управления движением, снижающие нагрузки и износ. Данная модель позволяет более детально анализировать различные проблемные варианты движения крана. В частности, особое внимание авторы уделяют проблеме перекоса крана и его поперечное смещение относительно подкрановых путей. Такой перекос является одной из причин, образования поперечных и горизонтальных сил между мостовым краном и рельсом балки подкранового пути.

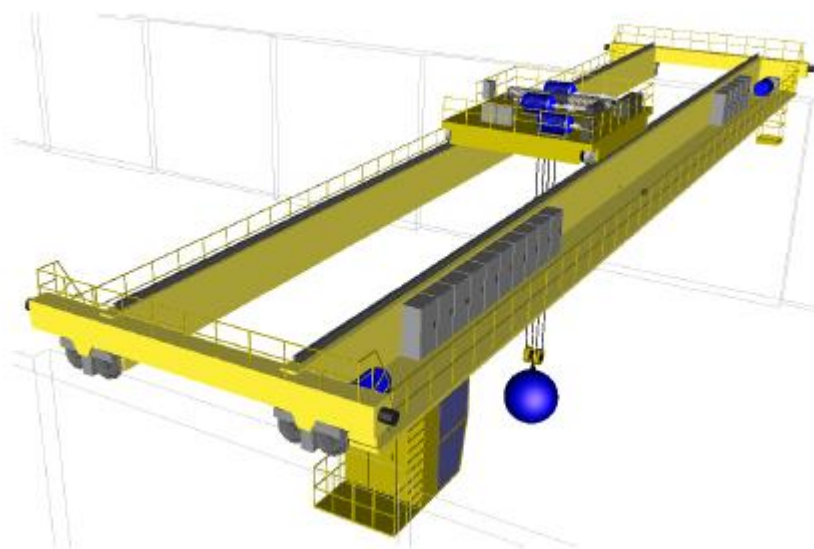


Рисунок 1.2 - Модель мостового крана в УМ [1.9]

Для расчета таких сил существует несколько различных процедур и вычислительных моделей. Проводя сравнения существующих методик, J. Musilek обращает внимание на большие различия между расчетными моделями и результатами, вызванные разными трактовками понятия перекоса крана [3]. Проанализировав существующие модели и методики в своем исследовании J. Musilek представляет динамическую модель, описывающую движение двухмостового крана по подкрановому пути, учитывающую некоторые факторы, которые не были учтены в работах Лобова [4,5]. В статьях [6,7] автором рассматриваются модели не учитывающая контакт обода колеса крана и рельсом подкранового пути и с учетом данного контакта.

Одной из основных трудностей, с которой сталкиваются металлургические предприятия, заключается в высокой динамической нагрузке на подъемно-транспортное оборудование. При

этом среди всего оборудования мостовые краны испытывают особенно тяжелые нагрузки. Основным фактором, приводящим к преждевременному отказу элементов механизмов мостовых кранов, является их недостаточная долговечность. В частности, в механической части передвижения мостового крана отмечается значительный износ реборд ходовых колес, вызванный постоянными столкновениями и контактом с рельсами подкранового пути в процессе движения.

Поэтому большое количество известных работ посвящено анализу причин возникновения динамических нагрузок во время движения мостового крана. В исследованиях [8] Л.Я. Теличко, А.А. Дорофеевым предложена система управления электроприводом, обеспечивающая движение мостового крана с минимальными динамическими нагрузками и предотвращающая контакт и столкновение реборд ходовых колес с рельсами подкранового пути. В результате чего происходит ограничение динамических нагрузок, действующих на металлоконструкцию мостового крана, на его ходовую часть, а также на подкрановые конструкции.

Выявлено, что путем регулирования скорости электроприводов в системе передвижения мостового крана в зависимости от поперечного смещения передних (в направлении движения) ходовых колес можно значительно уменьшить перекосные усилия в ферме моста, а также увеличить долговечность элементов ходовой части мостового крана и подкрановых путей.

Коллектив исследователей в числе Л.Н. Ахтуловой, А.Л. Ахтулова, О.М. Кирасирова и В.А. Машонский предлагает бороться с повышенными динамическими нагрузками на мостовой кран, влияющими на показатели аварийности, определяя оптимальный режим работы электродвигателя [9]. Для решения данной проблемы они используют имитационную модель двухбалочного мостового крана, позволяющую использовать визуальное моделирование для решения многих типовых задач. Кроме того, разработанная модель может быть интегрирована с другими подсистемами Matlab и совместима с программами твердотельного моделирования.

Большое количество исследований подкрановых конструкций посвящено задаче оценки нагруженности металлоконструкции мостового крана. Основными характеристиками нагруженности металлоконструкции крана являются внешние нагрузки или напряжения в опасных зонах. Из-за большого количества факторов, влияющих на нагруженность и наличия множества режимов работы крана оценка нагруженности является весьма сложной задачей. На сегодняшний день существует несколько принципиально разных подходов к описанию нагруженности, включая использование численного моделирования.

В одном из своих исследований [10] И.А. Лагерев утверждает, что стандартные модели, с помощью которых определяют действующие на металлоконструкцию мостового крана эксплуатационные нагрузки, учитывают, что исследуемые мостовые краны установлены на абсолютно жестком основании, что в действительности не является таковым. Для широко

распространенных мостовых кранов общего назначения жесткость надземного подкранового пути сопоставима с жесткостью моста. Поэтому подкрановая конструкция, обладая собственной динамикой, вносит существенный вклад в общую нагрузку крана. Автор предлагает использовать динамическую модель, которая является развитием предыдущей модели [11] для оценки динамических характеристик подкрановой конструкции и их воздействия на динамическую нагрузку мостового крана.

В последующих своих исследованиях И.А. Лагеревым разработаны динамические модели различных технологических операций крана для определения сил, действующих на металлоконструкцию при выполнении этих операций: модель подъема и опускания груза, модель передвижения моста и передвижения грузовой тележки [12]. С помощью разработанных моделей и реализующих их прикладных компьютерных программ может проводиться оценка нагруженности металлоконструкций мостового крана для проведения экспертизы промышленной безопасности мостовых кранов общего назначения.

В исследованиях [13] авторы впервые рассматривают поведение мостовых и козловых кранов при сейсмических нагрузках, учитывая возможность перемещения кранов вдоль путей. В отличие от норм [14, 15], в которых приведены методы расчетов для кранов, неподвижно связанных с землей, авторы доказали, что при условии, когда сумма всех динамических нагрузок на кран становится больше сил трения, начинается перемещение крана, которое имеет случайное направление, зависящее от того, какие нагрузки в данный момент оказываются большими и какое направление они имеют. Следовательно максимальные напряжения от изгиба в балках крановых мостов, возникающие в моменты начала проскальзывания кранов по рельсам, могут быть больше тех, которые получают при использовании методов расчетов, существующих в нормах [14, 15]. Изгибные колебания в балках мостовых кранов затухают из-за наличия сухого трения между колесами и рельсами, а также за счет конструкционного демпфирования и внутреннего трения в материале. На время затухания колебаний влияет распределения приведенных масс, жесткость крановых металлоконструкций и величина максимального ускорения земли в момент сейсмического воздействия.

### **1.1.2. Методы исследования динамических воздействий на путевые конструкции**

В условиях современного мира, характеризующегося ростом транспортного потока и активным развитием инфраструктуры вопросы об устойчивости и долговечности путевых конструкций становятся особенно актуальными. Важную роль в этом контексте играют динамические нагрузки, которые возникают в результате движения различных видов транспорта, будь то автомобили, поезда или другие транспортные средства. Динамическое воздействие оказывает значительное влияние на структурные элементы дорог, мостов, железнодорожных

путей и других инфраструктурных объектов, требуя эффективных решений для поддержания их надежности и функциональности.

Проблеме исследования динамических воздействий на путевые конструкции, выявления их негативного влияния и предложению методик, направленных на обеспечение устойчивости и долговечности таких объектов в условиях повышенных динамических нагрузок посвящено множество работ отечественных и иностранных ученых.

Немалое внимание исследователей уделено предмету динамического взаимодействия железнодорожных мостов и высокоскоростных составов (рис. 1.3). При движении высокоскоростных поездов по мостам происходит значительное воздействие на пролетные конструкции этих мостов [16]. В связи с этим в различных странах активно разрабатываются методы систематического исследования взаимодействия между высокоскоростными поездами и мостовыми конструкциями [16]. В настоящее время при решении данной проблемы широко применяются методы конечных элементов в сочетании методами шагового интегрирования уравнений движения системы [16].

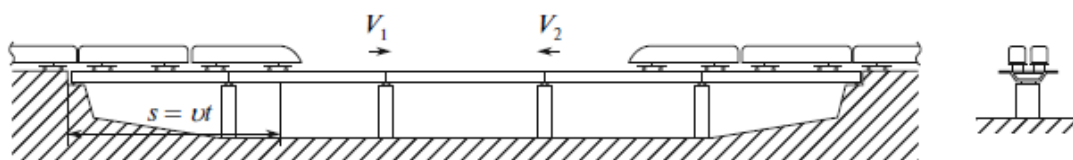


Рисунок 1.3 – Путевые конструкции с высокоскоростным транспортом [16]

В статье [17] авторами уделяется внимание взаимодействию пролетных строений и конструкции гибких опор, которые не учитываются при проектировании сооружений, так как данное взаимодействие не оговаривается и не регламентируется ни отечественными нормами СП, ни зарубежными европейскими нормами EN, включая национально нормативные базы СНГ. Авторы предлагают методику, учитывающую совместную работу высокоскоростного подвижного состава и основных мостовых конструкций. Данная методика позволяет определить напряженно-деформированное состояние элементов конструкции при продольных воздействиях от скоростных составов, что в свою очередь помогает выявить зависимость динамических характеристик мостовых сооружений от инерционных и жесткостных параметров опор. Предлагаемый метод позволяет проектировать опоры эстакад с минимальной материалоемкостью, а, следовательно, и трудоемкостью их возведения. Что в конечном счете приводит к повышению общей экономичности сооружения, без снижения надежности и долговечности мостовой конструкции.

В статье [18] А. В. Индейкин вместе с М. М. Евстифеевым анализируют частоты и формы свободных колебаний пролетного строения взаимосвязанной механической системы "мост-

поезд", рассматривая различные варианты расположения нагрузки на мосту, а также способы закрепления концевых сечений пролетного строения.

В другом исследовании [19] Ф. А. Доронин, А. В. Индейкин приводят результаты статического и динамического расчетов четырехпролетного моста, который планировался быть возведенным на железнодорожной линии Полуночная–Обская. Авторы использовали метод конечных элементов для моделирования и расчета напряженно-деформированного состояния исследуемого объекта. С помощью МКЭ-модели были вычислены частоты и формы свободных колебаний моста, а также проанализированы вынужденные колебания, вызванные кинематическим возмущением при движении по мосту подвижного состава. В результате исследования динамики моста обнаружено значительное вовлечение опор в колебательный процесс моста. В опорных трубах возникают изгибные колебания, которые происходят в вертикальной плоскости. Необходимость учета перемещений опор вдоль маршрута возрастает при высокоскоростном движении, где воздействие высокочастотных факторов обусловлено дисбалансом массы колес подвижного состава.

Вибрация и шум, порождаемые движением поездов, могут оказать существенное воздействие на жителей, здания и точные приборы, расположенные рядом с железнодорожными и трамвайными путями. Поэтому исследования по уменьшению передаваемой по земле вибрации всегда привлекали значительный интерес многих исследователей в течение многих десятилетий. Например, часть исследований направлена на решение задачи по снижению вибраций рельсов с помощью различных демпферных устройств [20]. Другие исследования [21] были направлены на проектирование механизмов, снижающих вибрации рельсов, на основе метаматериалов.

Немалое количество исследований, большая часть которых сделана китайскими учеными, концентрируется на проблеме динамического поведения системы «мост-поезд» при землетрясениях. Например, в исследованиях [22] Xia и др. Создают динамическую модель взаимодействия «мост-поезд», основанную на теории взаимодействия колеса и рельса, учитывая различные воздействия сейсмических волн. Ли и др. изучили влияние эквивалентного радиуса изолирующей опоры на реакцию моста Китайской системы железнодорожного пути при случайном землетрясении [23]. Используя метод псевдовозбуждения Чжан и др. рассчитали случайные колебания железнодорожно-мостовой системы при многоточечном землетрясении [24]. В серии экспериментов [25] коллективом авторов с помощью масштабной модели моста была рассмотрена не только сейсмическая реакция элементов мостовой подконструкции (балок, опор и пирсов), но и динамическое поведение и деформация самих путей, которые напрямую влияют на безопасность движения поездов по мосту.

Ряд экспериментов был проведен с целью доказательства достоверности результатов, получаемых при численном моделировании железнодорожных мостов. В работах коллектива под

руководством J. Yu, и др. исследователи анализировали влияние движения поезда и грунта на деформацию балки, опоры и пирса, используя имитационную модель, которая была подтверждена результатами экспериментов на вибростенде [26,27]. В исследовании [28] авторы рассчитывали и анализировали сейсмическое воздействие скорости поезда на конструкцию моста, учитывая угол падения сейсмических волн. Результаты показали, что в определенном диапазоне скорости поезда динамическая реакция моста достигает максимума.

### **1.1.2.1.       Фундаментальные исследования динамики систем с подвижными нагрузками**

Исследования динамики систем с подвижными нагрузками имеют особое значение, являясь основой для разработки и улучшения мобильных роботов, автономных транспортных средств, систем управления манипуляторами, а также играя важную роль в проектировании и обслуживании инфраструктуры, такой как мосты, сооружения на морском дне и прочее. Фундаментальные исследования в этой области направлены на разработку математических моделей, анализ влияния нагрузок на динамику системы, разработку методов управления и их применение в конкретных областях. Понимание динамики системы с подвижными нагрузками позволяет создавать более эффективные и безопасные технические решения, способные адаптироваться к различным условиям и задачам.

До недавнего времени исследования упругих систем, подверженных вынужденным колебаниями, были ограничены в основном случаями, когда источник колебаний оставался неподвижным. Однако часто, в реальных условиях многих динамических задач, связанных с динамикой упругих элементов и конструкций, источники находятся в движении. Поэтому игнорирование таких волновых эффектов, как эффект Доплера, эффект Вавилова-Черенкова, тормозное излучение и переходное излучение, неприемлемо. Причины, по которым данные эффекты игнорировались ранее, связаны как с недостаточным пониманием самих эффектов среди специалистов по динамике упругих систем, так и с ограничениями в методах решения подобных задач, присущих таким системам [29, 30].

Недавние исследования в данном направлении не только углубили понимание многих явлений, но также помогли выявить пути решения ряда актуальных технических проблем. Например, оказалось, что движение объектов по направляющим сопровождается волнообразованием. Превращение энергии поступательного движения объекта в энергию излучения осуществляется силой давления упругих волн, которая во многих случаях оказывает значительное влияние на результирующую силу сопротивления движению. При этом этот вклад может быть как положительным, так и отрицательным.

В [29] А.И. Весницкий пишет, что: «...характер колебаний двумерной системы зависит от закона движения нагрузки, а движение нагрузки происходит как под действием внешних сил, так и сил реакции со стороны двумерной системы, включая инерционные силы, вызванные относительным движением, и силы давления волн». Это говорит о том, что движущаяся нагрузка может оказаться источником дополнительных колебаний, давление которых напрямую влияет на работу системы под нагрузкой.

Впервые вопросом изучения влияния давления волн на тело, препятствующее его свободному распространению, занялся Эйлер, объясняя давлением световых волн эффект увеличения «хвостов» комет при приближении к Солнцу [31]. Последующие исследования данной темы проводились такими учеными, как В. Дворжаком, Д. Рэлеем, И. Лармором, П.Н. Лебедевым, Е.Л. Николаином и т.д.

Современные машины и механизмы включают в себя элементы, которые движутся относительно закреплений или изменяют свои размеры в процессе работы (шахматные подъемники, силовые передачи с гибкими связями, транспортеры и т.д.). Изучение динамического поведения таких устройств приводит к необходимости анализа взаимодействия распределенной механической системы, такой как струны, стержни, мембраны или пластины, с движущимися по ней нагрузками или закреплениями [32-34]. Эти проблемы также включают в себя анализ динамики мостов [35], движение по насыпям, железнодорожным полотнам, льду на поверхности водоемов и многое другое.

Исследование этих аспектов позволит более точно описывать динамическое поведение реальных машин и механизмов, что в свою очередь способствует улучшению технических решений и разработке новых принципов работы машин.

Для анализа факторов влияния инерционных сил, сил давления волн и других волновых эффектов, А.И. Весницкий в [29] рассматривает двумерную систему, имеющую форму бесконечной полосы, вдоль которой по неизвестному закону движется одномерная нагрузка или закрепление (рис. 1.4).

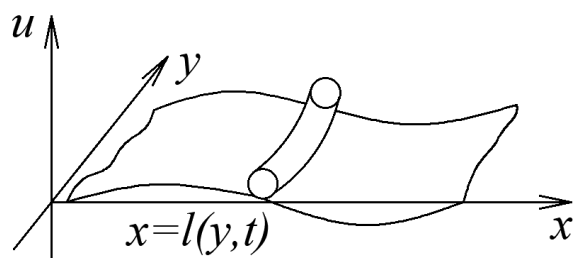


Рисунок 1.4 - Двумерная система [29]

При этом, если частота колебаний  $\Omega$  нагрузки равна некому критическому значению частоты  $\Omega = \Omega^*$ , а также скорость движения источника нагрузки  $v < v^*$ , движущаяся нагрузка

изгибных волн не излучает, тогда в сопутствующей системе координат прогиб пластины экспоненциально спадает по обе стороны от нагрузки.

В случае, когда  $v > v^*$  нагрузка излучает изгибные волны с частотой колебаний  $\Omega$  движущейся со скоростью  $v$  нагрузки. А значит постоянная движущаяся нагрузка может быть источником вибрации пластины. При этом частота волны  $\omega$  и волновые числа  $k_x$  связаны с частотой нагрузки формулами Доплера  $\omega = \Omega / (1 - v/v_\phi)$ ,  $k_x = \Omega / (v_\phi - v)$ , где  $v_\phi = \omega/k_x$  – такое излучение принято называть тормозным [37]. Если же частота источника  $\Omega = 0$ , нагрузка движется постоянно, тогда излучение называется излучением Вавилова-Черенкова ( $\omega = vk_x$ ).

Сама энергия на волнообразование черпается из энергии поступательного движения закреплений и нагрузок, а посредником такого преобразования является сила, обусловленная давлением волн [36].

Следовательно такое излучение может оказать отрицательных эффект на систему, так как часть мощности системы затрачивается на вибрацию, созданную изгибными волнами. В [29] приведен пример того, какое воздействие оказывает сила давления волн на систему: «...при движении со скоростью  $v = 30$  м/с постоянной  $\Omega = 0$  нагрузки по стальной пластине толщиной 1 мм, шириной 1 м, имеет место излучение волн амплитудой  $F \cong 1$  Н, что составляет  $\sim 3\%$  от поперечной силы, а мощность излучения вибрации  $F_v \cong 30$  Вт. Для сравнения мощность бытового громкоговорителя  $\sim 1$  Вт». Также авторами была оценена сила сопротивления движению железнодорожного состава, вызванная силой давления волн. При скорости около 100 км/ч эта сила может составлять до  $\sim 20\%$  силы тяги локомотива. Подобная оценка силы давления волн в случае движения автомобиля по ледяному покрову водоема показывает, что до  $\sim 50\%$  мощности может быть потрачено на вызванную этим вибрацию льда.

Характер взаимодействия волн излучения может существенно различаться в зависимости от параметров пластины, характеристик падающей волны и скорости движения закрепления.

В одном из разделов монографии [38] особое внимание уделено анализу распространения волн на упругом основании при движении нагрузки. Особый интерес представляет влияние скорости движения нагрузки на давление волны. В частности, рассматривается случай распространения волн в железнодорожном рельсе, укрепленном на системе шпал. Авторы предлагают рассмотреть рельс как струну, уложенную на упругое основание. Для того чтобы исключить влияние изгибной жесткости в рельсе и рассматривать отдельные шпалы как непрерывное основание, необходимо анализировать задачу на значительном участке пути. В результате получается линейная механическая система с нулевой изгибной жесткостью, подверженная воздействию подвижной нагрузки (рис. 1.5).

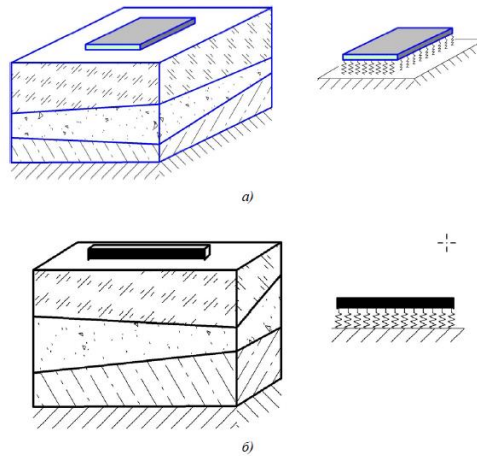
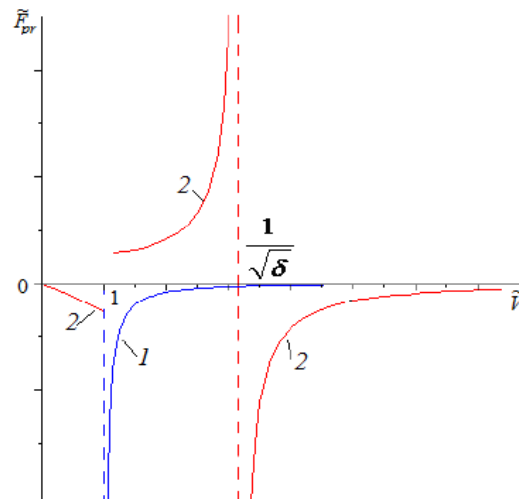


Рисунок 1.5 - Схема механической системы [38]

На рис. 1.6 приведены качественные зависимости силы давления от скорости движения нагрузки. При отсутствии поврежденности для  $\tilde{V} < 1$  имеем  $F_{pr} \equiv 0$ . В этом случае  $\tilde{V} = 1$  наблюдается резонансный эффект: сила давления  $F_{pr}$  начинает неограниченно расти (кривая 1, рис. 1.6), что сопровождается излучением волны, следующей за нагрузкой, аналогично эффекту Вавилова-Черенкова [39]. Повреждения всегда приводят к отличной от нуля силе давления волн. Постоянная составляющая силы давления волн зависит от скорости движения нагрузки, и может быть как положительной, так и отрицательной (кривая 2, рис. 1.6). Авторы монографии делают вывод о том, что при излучении волн от движущегося источника силы с повреждениями появляется горизонтальная составляющая силы реакции со стороны направляющей. Эта составляющая может быть направлена как по направлению движения нагрузки, что способствует ее движению, так и против, что создает сопротивление движению.

Рисунок 1.6 - Зависимость силы давления  $F_{pr}$  от скорости движения нагрузки  $\tilde{V}$  [38]

Указанные выше эффекты, такие как эффект Доплера, эффект Вавилова-Черенкова, тормозное излучение играют важную роль в проектировании машин и механизмов. Их проявление становится более заметным при увеличении скорости работы этих систем. Проблема

учета давления волн крайне актуальна для инженеров, занимающихся проектированием и эксплуатацией высокоскоростных наземных магистралей [40]. Это связано с тем, что при скоростях поездов в 200 км/ч и выше на железнодорожном пути и прилегающем грунте могут возникать упругие волны [41,42], давление от которых является основным фактором, влияющим на сопротивление движению.

### **1.1.3. Методы исследования усталостного разрушения конструкций**

Исследования на определение усталостей подкрановых и путевых конструкций играют критическую роль в обеспечении безопасности и эффективности работы этих систем. Подкрановые конструкции и путевые системы подвергаются значительным механическим нагрузкам в процессе работы, что со временем может привести к усталостному разрушению. Этот процесс особенно опасен, поскольку он может протекать незаметно и внезапно привести к аварийным ситуациям.

Проведение исследований усталости конструкций позволяет предвидеть возможные проблемы и предотвращать разрушения до того, как они достигнут критического уровня. Это имеет ключевое значение для обеспечения безопасности работников, а также для защиты окружающей среды и оборудования. Поэтому многие исследования посвящены проблеме усталостных разрушений, в которых исследуются причины и механизмы, приводящие к таким разрушениям [43-47].

Например, М.Г. Малыгин и К.В. Медведев провели обширное исследование по проблеме усталостных разрушений в конструкциях, предложив улучшенную модель расчета на усталость сварных узлов мостовых конструкций [1]. В своей работе они предложили более детально учитывать компоненты напряженно-деформированного состояния элементов сварного узла при переменных эксплуатационных воздействиях, предлагая использовать метод конечных элементов в расчетном анализе. Этот подход включает использование различных типов конечных элементов, объединенных в абсолютно-жесткие тела (АЖТ) в виде плоских сечений (рис. 1.7). Таким образом, единая пространственная модель всей конструкции состоит из сварного узла, аппроксимируемого трехмерными КЭ (рис. 1.8), фрагмент конструкции, включающий узел – оболочными КЭ, основную часть конструкции – пространственно-стержневыми КЭ. Такая модель позволяет учитывать влияние местных дополнительных напряжений в элементах, обусловленных их конструктивными особенностями в сочетании с локальной нагрузкой.

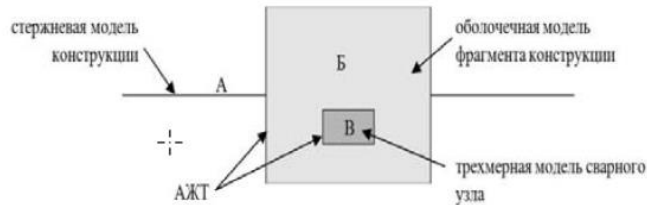


Рисунок 1.7 – Схема модели конструкции с АЖТ для расчета локальных напряжений в сварных узлах: А – фрагмент из стержневых КЭ; Б – фрагмент из оболочечных КЭ; В – фрагмент из трехмерных КЭ [1].

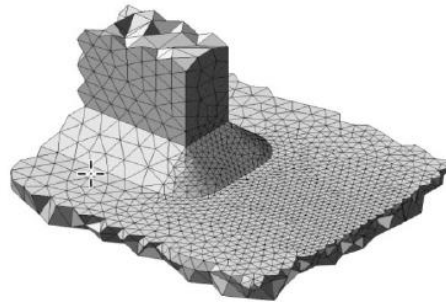


Рисунок 1.8 – Пример аппроксимации узла конструкции в зоне сварного соединения трехмерными КЭ [1]

Также в исследовании обращается внимание на факт того, что для расчета действительной нагруженности узлов следует оперировать схемами реальных поездов, отражающих группу сосредоточенных сил от колес и вагонов, а не равномерно распределенными подвижными нагрузками, как принято в нормах.

В исследовании [48], авторами которого являются Xiaoqing Zhao, Kuntao Xing, Nan Jin предлагается новый метод прогнозирования усталости для опор переменного сечения стальных подкрановых балок, основанный на методе пиковых напряжений. Данный подход позволяет выявить места возникновения усталости и предсказать усталостную долговечность опор переменного сечения при осевом и изгибном нагружении. Преимуществом данного метода является возможность его использования для подкрановых балок переменного сечения с уникальной геометрией (рис. 1.9), для которых традиционные методы, такие как метод номинальных напряжений и метод напряжений в горячей точке, не способны точно предсказать место зарождения усталостных трещин.

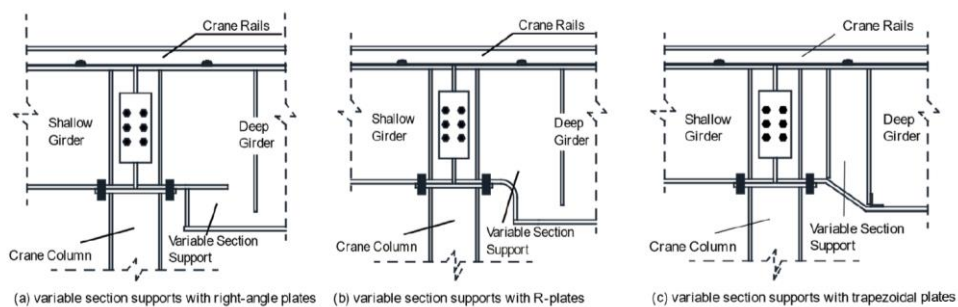


Рисунок 1.9 – Три варианта конструкции опор переменного сечения [48]

A. Nussbaumer и Manfred A. Hirt сосредоточились на изучении поведения сварных соединений трубчатых полых профилей в мостовых конструкциях с целью изучения их усталостной прочности [49-51]. Исследователи отметили значительное расхождение между результатами крупномасштабных усталостных испытаний и данными, полученными с использованием метода напряжений в горячих точках и метода номинальных напряжений. Обнаружено, что традиционные методы определения усталостной прочности предоставляют завышенные данные, что, хотя и обеспечивает безопасность, приводит к неэкономичному проектированию мостовых конструкций. Поэтому существует необходимость пересмотра методов расчета усталостной прочности сварных соединений трубчатого профиля, обусловленная стремлением к более реалистичным оценкам, которые не ухудшат безопасность конструкций.

Коллектив авторов в составе Yanchao Zhang, Hua Wang, Xiangdong Li, Qinghua Ren, Yunwen Feng, Xiaofeng Xue, продолжая исследования, проделанную другими учеными по вопросу усталостной надежности и долговечности металлических конструкций мостовых кранов, описанных в работах [52-55], предлагают оценить влияние технического обслуживания и ремонта на усталостную надежность [56]. Авторами предложена модель усталостной надежности металлической, основанную на количественном анализе влияния факторов технического обслуживания. С помощью программы *MATLAB* учеными был проведен анализ и расчет 100-тонного мостового крана. Результаты показывают, что усталостное повреждение приводит к непрерывному снижению надежности, но проведение технического обслуживания способно в определенной степени восстановить усталостную надежность металлической конструкции и задержать ее снижение.

## **1.2. Особенности работы сталебетонных конструкций при статических воздействиях**

### **1.2.1. Общие исследования напряженно-деформированного состояния труб и их узлов**

Современные механизмы, конструкции и сооружения в области машиностроения и строительства должны обладать прочностью, легкостью, энергоэффективностью и надежностью в условиях эксплуатации. Чтобы достичь этих целей, необходимо использовать не только современные прочные и легкие материалы, но также улучшать методы расчета их статической и динамической прочности и устойчивости. Разработка новых методов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) современных конструкций и сооружений является важной задачей, направленной на улучшение качества материалов, оптимальное использование ресурсов, сокращение материалоемкости конструкций, машин и механизмов, а также значительное увеличение их срока службы [57].

Конструкционные полые профили имеют более высокое соотношение прочности и веса, чем профили открытого сечения. Кроме того, они требуют гораздо меньшего веса защитного материала из-за меньшей внешней площади. Закрытые профили обладают повышенной коррозионной стойкостью, поскольку на их цилиндрических поверхностях задерживается меньше пыли и грязи, являющиеся активаторами процессов атмосферной коррозии. Несмотря на то, что они дороже, чем профилей открытого сечения в расчете на тонну, общая экономия веса стали и защитного покрытия часто приводит к тому, что общее снижение веса стали и защитных покрытий оказывается гораздо более экономичным решением.

Надежность сооружений, изготавливаемых из трубных профилей, во многом зависит от правильности расчета и изготовления узловых соединений [58, 59], что свидетельствует об актуальности исследований, касающихся НДС конструкций из труб и узлов соединения таких конструкций.

В работах [60, 61] рассматривается исследование поведения различных конструкций с расчетной схемой в виде оболочек простой формы при упругопластическом деформировании аналитическими методами. Однако для конструкций более сложной формы описать их геометрию с помощью аналитических зависимостей не представляется возможным. В таких случаях применяются численные методы, реализованные в программных комплексах *NASTRAN*, *ANSYS*, *CosmosWorks*, *SolidWorks* и др.

Исследованием действительной работы различных конструкций из замкнутых гнутых профилей и их узловых соединений занимались такие ученые как Е.Ю. Давыдов, И.В. Левитанский, Г.И. Кекс, Э.Ф. Гарф, В.И. Новиков, В.А. Балдин и Н.М. Шейнфельд, К. Силаш [62].

В исследованиях коллектива авторов казанских вузов Л.С. Сабитова, И.Л. Кузнецова и др. большое внимание уделяется анализу новых конструкций опор из трубчатых стержней для энергетического строительства, в том числе опор линий электропередачи, опор для ветрогенераторных установок, башен сотовой связи, опор городского освещения, контактных сетей электротранспорта, рекламных конструкций и светосигнального оборудования (светофоры) [63-69]. Например, в работе [57] Л.С. Сабитов проводит численные исследования НДС соединений труб разного диаметра, используя как существующие программные комплексы («ЛИРА», «ANSYS», «Autodesk Inventor»), так и разработанные самостоятельно «AutoRSS.01» и «AutoRSS.02». В результате расчетов автором получены оптимальные параметры глубины заделки труб друг в друга, толщины пластины, количество граней многогранных гнутых стойках и т.д.

Савенков В.Н. с соавторами в своей работе [70] обращают внимание на факт искажения форм поперечных сечений трубы при ее изгибе с большой кривизной оси, а также на

возникновение пластических деформаций, которые могут привести к появлению трещин и разрывам трубы со стороны растянутой зоны. В своем исследовании, используя численные методы в программной оболочке прочностного анализа *ANSYS*, они анализируют зависимость напряженно-деформированного состояния и форму поверхности труб от условий нагружения при гибке на ролике.

Коллективом авторов Сибирского федерального университета под руководством Инжутова И. С. был проведен обширный анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций, разработанных отечественными и зарубежными авторами, а также предложено новое конструктивное решение сборно-разборного узлового соединения, позволяющее сократить расход материала на его изготовление, упростить процесс сборки конструкции и повысить надежность узлового элемента [71].

В работе [72] описывается теоретические расчеты комбинированного узла рамы, который включает в себя колонну с закрытым сечением и ригель с открытым сечением. Использование прямоугольной трубы и двутавра позволяет эффективно объединить высокую жесткость сжатой колонны в обоих направлениях потери устойчивости с традиционно выгодным распределением материала двутавра, работающим на изгиб в ригеле. Авторы подчеркивают целесообразность такой комбинации профилей, отмечая, что ранее этот аспект жесткости комбинированных узлов принимался в расчет с недостаточным вниманием.

С.В. Митрофановым был предложен новый узел сопряжения стержней в легких структурных покрытиях, выполненного из квадратных труб с защитным покрытием [73]. В своей работе автор сравнивает результаты численного моделирования и экспериментальные исследования НДС разработанного узла. Схемы отказа узлов, полученные с помощью твердотельной модели, подтверждаются экспериментальными данными. Разрушение узлового соединения структурной системы данного соединения происходит либо из-за потери местной устойчивости стенки трубчатых элементов под болтовым крепежом, либо из-за среза стенки по направлению действия нагрузки.

Для минимизации объема сварки и количества деталей, при стыковке элементов конструкции, часто применяют бесфасонное соединение. Такое узловое решение также упрощает процесс отчистки и окраски металлоконструкций. Исследование НДС таких узлов описано в работах [74-79]. При проектировании конструкций из гнutosварных профилей с прямым примыканием элементов решетки важно учитывать влияние геометрических и механических факторов на несущую способность бесфасонного узла, которая может определять несущую способность всей трубчатой конструкции [80]. Кроме того, следует учитывать влияние условий закрепления сжатых элементов в узле на их устойчивость, а также гибкость стенок поясного элемента узла на общую жесткость конструкции. Все эти особенности

делают необходимым исследование работы узла с прямым соединением гнутосварных профилей друг с другом.

Немалое количество исследований в области изучения напряженно-деформированного состояния узловых соединений было проведено Зиньковой В. А. Исследования автора легли в основу разработки двух новых вариантов бесфасоночного соединения трубчатых элементов фермы [81]. Преимуществами предложенных узлов являются снижение концентрации напряжений и объема сварки в узле, уменьшение металлоемкости и трудоемкости изготовления соединения по сравнению с узлом-прототипом. Повышение несущей способности происходит за счет поворота гнутосварного трубчатого профиля в первом варианте исполнения узла и использования в качестве пояса фермы трехгранного профиля – для второго варианта.

Также Зиньковой В. А. с целью исследования НДС и совершенствования бесфасоночных узловых соединений предложена методика проведения экспериментальных исследований узловых соединений трубчатых элементов фермы [82]. Данная методика позволяет выявления специфических особенностей новых конструктивных решений узлов, сравнивая их с типовыми, а также провести сопоставительный анализ полученных данных с результатами численных исследований.

Губайдулин Р.Г. и его коллеги проводят исследование локальных концентраций напряжений в сварных соединениях бесфасоночных узлов при различных углах примыкания патрубка [79]. В первую очередь ими был проведен статический анализ формы сварных швов трубчатых узлов. Затем, с использованием данных о геометрической неоднородности, были проведены поляризационно-оптические исследования напряженно-деформированного состояния узлов. Данный метод был выбран с целью получения точных распределение напряжений в зоне примыкания патрубка к поясной трубе, а также для выявления «горячих» точек сварного шва при различных схемах нагружения патрубков и определения коэффициентов концентрации напряжений в этих точках, что необходимо для оценки долговечности бесфасоночного соединения.

В работе [75] авторы провели сравнение несущей способности ферм, состоящих из тонкостенных гнутосварных труб прямоугольного сечения, установленных на ребро, с традиционными фермами, состоящими из замкнутых профилей. В результате исследования был сделан вывод о том, что фермы, состоящие из квадратных труб, соединенных в узлах на ребро, обладают меньшей концентрацией напряжений в узлах по сравнению с традиционными фермами.

Драгорнс В.И. коллегами проводят теоретические исследования несущей способности металлического покрытия летнего амфитеатра в г. Витебске [76]. Конструкция покрытия представляет собой комбинированную систему, состоящую из пространственных стержней

цилиндрической оболочки, подкрепляющей ее с двух сторон и по контуру арками. На момент проведения исследования конструктивное решение данного покрытия не имело аналогов в практике отечественного металлостроительства. Особенностью покрытия также является использование в его конструкции запатентованного узла металлической структуры, позволивший перекрыть пролет равный 120 м. Напряженно-деформированное состояние конструкции исследовалось с помощью трех конечноэлементных моделей с различной степенью детализации.

В работах [77, 78] Дружинина М.Ю. и др. проводили исследование НДС агрегата стартового комплекса в два этапа. Сначала авторы осуществили расчет общей прочности конструкции в программном комплексе «*SADAS*». Затем, определив самый напряженный узел конструкции, провели более детальный прочностной расчет соединения в ПК «*ANSYS 13.0*». Анализ местной прочности данного узла показал наличие областей с коэффициентом запаса ниже допустимого значения, что потребовала внесения конструктивных изменений соединения.

Отдельный интерес представляют исследования надежности труб, изготовленных из полимерных материалов. Как отмечают авторы [83] данные материалы имеют значительных разброс деформационно-прочностных характеристик на стадии изготовления изделий, деградацию свойств полимерной матрицы со временем, а также ухудшение прочностных свойств при возрастании температуры.

### **1.2.2. Особенности работы железобетонных и сталебетонных элементов**

Железобетон – это композитный строительный материал, в котором соединены в единое целое бетон (матрица) и стальная арматура. Конструкции из железобетона широко применяются в современном строительстве благодаря своей надежности и экономичности. В железобетонных элементах стальная арматура используется для усиления бетонных конструкций и повышения их прочности [84].

Свойства железобетонных конструкций определяются взаимодействием между стальными и бетонными компонентами. В процессе нагружения бетон и сталь работают совместно, принимая на себя различные типы нагрузок. Бетон обеспечивает защиту стальной арматуры от коррозии, а стальная арматура в свою очередь повышает прочность и устойчивость конструкции [85].

Среди преимуществ железобетонных конструкций можно выделить их отличную прочность, устойчивость к различным внешним воздействиям, а также возможность создания сложных форм и конфигураций. Кроме того, такие конструкции отличаются долговечностью и экономичностью, что делает их популярными в различных областях строительства.

Однако существуют и недостатки железобетонных конструкций, такие как необходимость точного расчета и проектирования, увеличенный вес конструкций из-за использования стали, а также возможность появления трещин и деформаций в бетоне при длительном эксплуатационном периоде. Тем не менее, современные технологии и методы позволяют эффективно учитывать и минимизировать эти недостатки, делая железобетонные конструкции востребованными и перспективными в строительстве.

Сталежелезобетонные конструкции представляют собой особый вид конструкций в современном строительстве, отличающейся не только своими особенностями в конструктивном исполнении, но и соотношением использования материалов: бетона и стали. В этих конструкциях стальные элементы, как правило представлены внешней обычной или высокопрочной напрягаемой полосовой, листовой арматурой, размещенной на крайних гранях поперечного сечения [86].

Этот вид конструкций можно условно классифицировать следующим образом:

- Конструкции с внешним размещением стальных прокатных, изогнутых или сварных профилей, которые находятся вне железобетонного элемента (например, балки перекрытий и мостов);
- Элементы, где используется жесткая арматура внутри железобетонных элементов, представленная стальными профилями (такие как колонны, опоры и балки);
- Конструкции с применением стального листового проката или профилей, расположенных вокруг сечения, по его периметру или граням (например, трубобетонные элементы);
- Стальные несъемные опалубки, которые одновременно выполняют функции рабочей арматуры (используемые, например, в резервуарах и перекрытиях).

Свойства сталежелезобетонных конструкций определяются взаимодействием стальной и бетонной частей. Для предотвращения смещения в зоне контакта компонентов под воздействием нагрузок используются адгезионные свойства, трение и зацепление соединительных элементов.

Работоспособность сталежелезобетонных конструкций зависит от различных факторов, включая виды и величины нагрузок, форму и размеры элементов, а также деформационные и прочностные характеристики материалов. В начальной стадии, когда бетон еще не достиг монолитной структуры с заданной прочностью, все нагрузки, включая вес железобетона, собственный вес и монтажное оборудование, несутся стальными элементами. После завершения процесса замоноличивания бетона и объединения элементов, нагрузки распределяются по всей конструкции. К тому же, согласно проведенным исследованиям [87-89] обнаружено, что вместо ожидаемой усадки бетона происходит его набухание и расширение, которое сохраняется в

течение длительного периода времени, что, в свою очередь, создает благоприятные условия для работы бетона под нагрузкой.

Среди преимуществ данных конструкций можно выделить уменьшение расхода стали и, следовательно, снижение себестоимости, а также увеличение жесткости и снижение веса [90,91]. Сталобетонные элементы обладают меньшей массой в сравнении с железобетонными, что упрощает их транспортировку и монтаж. Экономическую выгоду также несет отсутствие у сталобетона необходимости применения опалубки, кружал, хомутов, отгибов, петель, закладных деталей [86]. Кроме того, они обладают повышенной пожароустойчивостью благодаря бетону, который помогает снизить температуру и защищает стальные элементы от перегрева, что не снижает их несущую способность. Производство конструкций на заводе и простота узловых соединений значительно сокращает время монтажа, а также уменьшает влияние погодных условий, что экономит рабочее время. Одним из главных преимуществ сталобетона является его высокая несущая способность.

К недостаткам конструкций из стали и железобетона можно отнести необходимость использования объединительных элементов из-за различий в физико-химических свойствах стали и бетона. Также изменение температуры, ползучесть и усадка бетон могут вызывать некоторые специфические проблемы. Расчет таких конструкций требует большей сложности, учитывая стадийность работ, перемещение материалов в области контакта и другие специфические факторы.

### **1.2.3. Аналитические, численные и экспериментальные методы исследования трубобетонных конструкций**

Трубобетон является одним из видов сталобетонных конструкции и представляет собой тонкостенную трубу, заполненную бетоном. Два материала: сталь и бетон, входящие в состав композитной конструкции, дополняют друг друга, повышая несущую способность всей конструкции. При этом между материалами возникают так называемые "сцепленные" или "взаимодействующие" эффекты, которые играют ключевую роль в поведении конструкции под нагрузкой. Однако, несмотря на понимание этой взаимосвязи, точное определение напряженно-деформированного состояния трубобетонных конструкций остается сложной задачей. Различные подходы к анализу и проектированию трубобетона могут давать различные результаты его работы, что приводит к необходимости постоянного уточнения и совершенствования методов оценки и моделирования таких конструкций.

Проводя экспериментальные и аналитические исследования, ученые, начиная с 1934 г., пробуют вывести зависимость для оценки несущей способности трубобетонных центрально сжатых стержней. Первая работа по данному вопросу была опубликована А.А. Гвоздевым [92]:

$$N = R_b F_b + \alpha R_c F_c, \quad (1.1)$$

где  $R_b F_b$  - предел прочности и площадь сечения бетонного сердечника;

$R_c F_c$  - предел прочности (предел текучести) и площадь сечения трубы-обоймы;

$\alpha$  - коэффициент упрочнения.

В предложенной зависимости увеличение несущей способности происходит за счет упрочнения стальной трубы-обоймы, а не бетонного сердечника, что не соответствует текущим представлениям о работе трубобетона.

Тем не менее данная зависимость послужила основой для развития новых отечественных методик расчета трубобетонных конструкций [93-]:

$$N = (cR_b + d)F_b + \alpha R_c F_c, \quad (1.2)$$

где  $c, d, \alpha$  - коэффициенты, определяемые опытным путем.

Методики, использующие данную зависимость, носят эмпирический характер в связи с необходимостью проведения большого количества экспериментов для определения коэффициентов, используемых в формуле. При этом найденные коэффициенты соответствуют лишь определенному набору геометрических и механических характеристик стальных труб и бетона, что делает эту методику неэффективной для постоянно растущего разнообразия материалов. Кроме того, следует иметь в виду, что данная формула описывает поведение трубобетона только при одноосном сжатии, не учитывая его пространственные свойства.

В своем исследовании [97] Хазов П.А. и Помазов А.П. разработали метод, который позволяет анализировать процесс деформации трубчатого бетонного образца, учитывая характеристики деформации стальной трубы и вклад бетона в работу конструкции на всех этапах деформации с помощью поправочного коэффициента. После проведения испытаний на осевое сжатие 12 образцов были построены графики продольной деформации в зависимости от переменных  $P - \Delta$ , а также предложена математическая модель, которая аналитически описывает процесс продольной деформации трубчатого бетонного образца:

$$P_{tb}(\Delta) = k_m \cdot P_t^{cr} \cdot \left(1 + k_b \cdot \frac{P_b^{cr}}{P_t^{cr}}\right) \cdot \lg(k_\Delta \cdot \Delta), \quad (1.3)$$

где  $k_m = 0,85$  – обобщенный коэффициент масштабирования модели;

$k_b = 2,5$  – обобщенный коэффициент вклада бетона в работу конструкции;

$k_\Delta = 500$  – обобщенный коэффициент масштабирования перемещений.

Различные исследования, проведенные как зарубежными, в числе Gardner, N. J., Jayalekshmi S.A., Schneider, S. P., Kurpanovas, A., а так и отечественными авторами - Н. Н. Аистов, А. Ф. Липатов, Л. К. Лукша, В. Ф. Маренин, В. А. Росновский, Я. П. Семененко, Н. Ф. Скворцов и др., поднимают вопрос о характере взаимосвязи между бетонным ядром и стальной трубой. Некоторые из них [98-101] утверждают, что под действием нагрузки происходит отделение

стальной оболочки от бетонного сердечника. Однако другие исследователи, такие как Н. Ф. Скворцов [102], R. Knowles и R. Park [103], высказывают иное мнение. Они отмечают, что сжатие бетонного ядра стальной оболочкой маловероятно из-за различных коэффициентов Пуассона материалов. По их мнению, при приложении нагрузки поперечные деформации трубы превышают поперечные деформации бетона. Обжатие бетона стальной трубой они объясняют наличием сил трения на поверхности контакта между опорными плитами испытательных машин и торцами испытываемых коротких образцов.

Отсутствие совместной работы между бетонным ядром и стальной оболочкой может привести к потере локальной устойчивости стальной трубы, что в свою очередь может вызвать разрушение испытываемых образцов. Поэтому возникает необходимость в разработке "усовершенствованных" модификаций трубобетона, где бетон будет теснее прилегать к обойме [104]. Анализируя эту проблему, И. В. Резван и Г. М. Мартиросов [105-106], предложили использовать бетон на напрягающемся цементе для создания предварительного напряжения трубы. Группа ученых под руководством В. И. Ефименко предлагают использовать центрифугированные трубобетонные конструкции для обеспечения совместной работы стальных оболочек с бетоном [107-108]. А. Л. Кришан предлагает проводить предварительное обжатие ядра путем длительного прессования бетонной смеси с использованием специального пустотообразователя или путем последовательного вдавливания в бетонную смесь вдоль направляющего стержня трех стальных трубок разного диаметра, расположенных коаксиально внешней обойме [109].

В ряде исследований, выполненных по трубобетону, осуществляется анализ воздействия отношения диаметра трубобетона к толщине стенки  $D/t$  на несущую конструкцию [110-113].

Помимо оценки эффективности применения трубобетона в сжатых элементах с небольшими эксцентриситетами, важным является исследование работы внецентренно-сжатых трубобетонных элементов [102, 109, 114-127], а также возможность эффективного использования данного материала в изгибаемых конструкциях [128-132].

Вопрос поведение трубобетонных конструкций при длительных нагрузках на данный момент является менее проработанным, чем при кратковременных. Данный вопрос отражен в исследованиях А.А. Долженко [114,133], А.И. Кикина, В.А. Трулля и Р.С. Санжаровского [139], А.Л. Кришана, Л.И. Стороженко [134, 135].

Также известен факт о эффективной работе трубобетонных конструкций при воздействии огня, что подтверждается результатами исследований [125-127, 136-138]. Огнестойкость совместно работающих бетонного сердечника и стальной обоймы оказывается выше, чем у бетона и стали в отдельности. В этом симбиозе стальная труба защищает бетонное ядро от

прямого воздействия огня и растрескивания, а сердечник в это время смягчает общую и локальную потерю устойчивости стальной трубы при высоких температурах.

Кроме того, трубобетонные обладают значительным потенциалом для применения в условиях сильных динамических нагрузок [99, 105, 140].

Численные исследования трубобетонных конструкций проводились многими исследователями [141-143,104]. К наиболее свежим можно отнести работы Снигеревой В.А. [144], Гаранжа И.М. [145], S. Mathankumar [146], F. Abed [147], A. D. Ahmed [148]. Группа авторов в составе Xiaozhong Li, Sumei Zhang, Yu Tao, Bing Zhang в [149] приводят результаты исследований новой конфигурации колонн из стальных труб с бетонным заполнением, в которой внешняя стальная труба используется снаружи, а дополнительная труба не воспринимает осевую нагрузку напрямую (рис. 1.10). В [150] конечно-элементные модели (МКЭ), разработанные в *ABACUS*, использовались для исследования сжимающих свойств коротких круглых бетонозаполненных стальных трубчатых колонн при различных сценариях сжатия (рис. 1.11). В [151] Ведерникова А.А. проводит сравнение результатов расчета, полученные методом конечных элементов в программном комплексе *ANSYS* с результатами экспериментальных данными и расчетами, принятых в российских и европейских нормах.

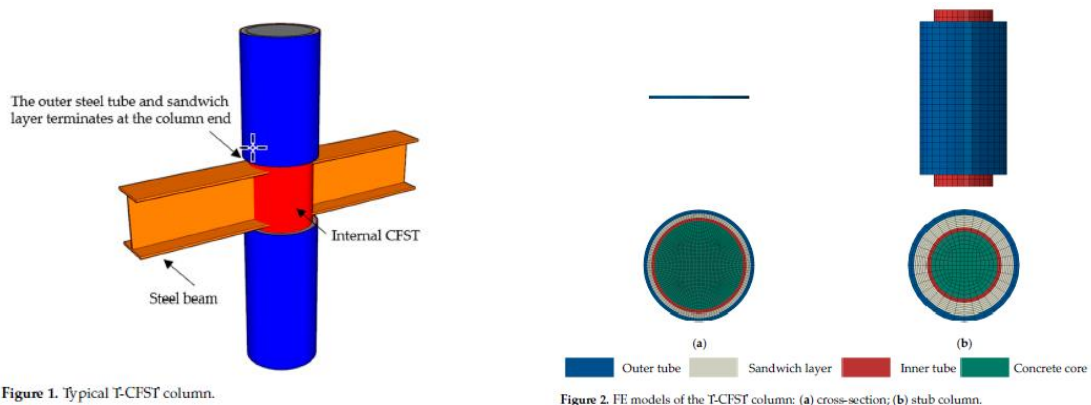


Figure 1. Typical T-CFST column.

Figure 2. FE models of the T-CFST column: (a) cross-section; (b) stub column.

Рисунок 1.10 – Предлагаемый узел новой конфигурации [149]

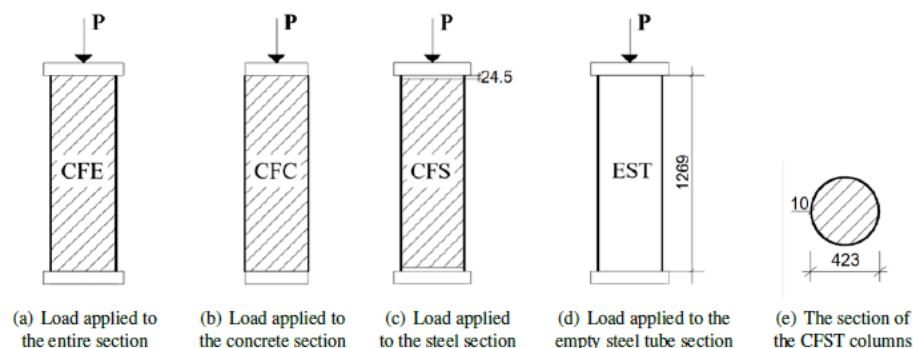


Рисунок 1.11 – Размеры колонны и различные случаи нагружения [150]

Хотя работы, связанные с численным моделированием, ведутся, в настоящее время все еще существует недостаток численных исследований, посвященных трубобетонным конструкциям, что затрудняет их эффективное моделирование. Отсутствие

стандартизированного подхода к созданию конечно-элементных моделей в различных программно-вычислительных комплексах создает дополнительные препятствия. Кроме того, вопрос моделирования условий контакта между сталью и бетоном в таких конструкциях остается недостаточно исследованным. Вопрос влияния динамического воздействия на поведение трубобетонных конструкций также требует более глубокого анализа, который на данный момент проводится в недостаточном объеме. Эти проблемы замедляют процесс интеграции перспективного материала в строительную и машиностроительную практику. Увеличение числа численных исследований позволит ускорить разработку инженерных методик расчета трубобетонных конструкций, что в свою очередь позволит получать более надежные результаты, при этом сокращая затраты на лабораторные испытания и сжимая временные рамки исследований.

### **1.3. Особенности работы сталебетонных конструкций при динамических воздействиях**

#### **1.3.1. Обзор экспериментальных методов определения динамических характеристик деформируемых твердых тел**

В современном мире программно-вычислительные комплексы, такие как *ANSYS*, *ABAQUS*, *LS-DYNA*, *NASTRAN* и др., занимают центральное место в исследованиях динамического напряженно-деформированного состояния материалов и конструкций. Однако эффективность этих комплексов непосредственно зависит от достоверности данных, заложенных в их базы, изначально взятых из результатов реальных натуральных экспериментов [152]. В связи с появлением новых материалов, обладающих уникальными свойствами, требуется не только постоянное обновление базы данных, но и разработка новых экспериментальных методов сбора информации.

В диссертации, написанной А.Ю. Константиновым [153], отмечается, что систематическое изучение динамических свойств материалов нашло свое начало в конце XIX – начале XX века в работах Дж. и Б. Гопкинсонов. В России это направление было инициировано Н.Н. Давиденковым в 1930-х годах и продолжено рядом исследователей, таких как Ф.Ф. Витман, Н.А. Златин, В.А. Степанов, Ю.Я. Волошенко-Климовицкий, А.А. Ильюшин, В.С. Ленский, Р.А. Васин и др. За рубежом данной проблеме посвящены труды ученых, таких как Р. Дэвис, А. Надаи, Дж. Даффи, Дж. Тейлора, Г. Кольского, Дж. Кэмпбелла, У. Линдхольма, Дж. Белла, А. Кобаяси. Существенный вклад в исследование динамических свойств материалов внесли и современные ученые, такие как С.А. Новиков, Г.В. Степанов, А.П. Большаков, К. Альбертини, Дж. Филд, Дж. Грей, У. Прауд, Я. Клепачко, Дж. Хардинг, Ф. Хаузер, Г. Гари, З. Розенберг, С. Немат-Нассер и другие [153-156].

Однако на протяжении всего исследовательского периода, посвященного изучению динамических свойств материалов, так и не было разработано стандартизированных методик или серийно-выпускаемого оборудования для проведения таких экспериментов. Проведение исследований усложняется отсутствием готовых программных средств обработки опытных данных, а также недостаточной наполненностью методической базой динамических экспериментов. Работы по разработке новых методов, которые позволили бы получать достоверные измерения напряжений и деформаций без искажения механических свойств материалов, продолжаются [157,158]. Несмотря на то, что за весь период исследований, посвященных данной проблеме, было создано большое количество средств для измерения усилий и деформаций от различных нагружающих устройств, исследования в этой области все еще являются актуальными.

Динамические испытания проводятся с использованием при нагружении образца интенсивной импульсной нагрузкой, которая может вызвать неоднородное напряженное состояние образца из-за распространения в нем волн напряжений. В результате этого на образец могут действовать значительные инерционные силы [159,160].

В настоящее время существует несколько наиболее распространенных методов, с помощью которых можно определить динамические характеристики и построить диаграммы деформирования материалов. К ним относятся: метод копровых испытаний на растяжение и сжатие, кулачковый пластометр, метод Тейлора и наиболее часто использующийся метод Кольского. Другие методы, например, такие как методика исследования раздачи кольцевых образцов, методика А.А. Ильюшина и В.С. Ленского, которая основана на теории распространения одномерных упругопластических волн и распределении остаточных деформаций по длине образца применяются значительно реже.

Тем не менее даже в самых распространенных методиках имеются недостатки.

Метод копровых испытаний позволяет зарегистрировать такие параметры, как скорость удара и усилие в образце, измеренное с помощью динамометром. В таких испытаниях необходимо, чтобы кинетическая энергия падающего груза во много раз должна превышать работу, необходимую для разрушения образца. Данный метод позволяет строить динамическую диаграмму деформирования при скорости деформации  $10^2 - 10^3 \text{ с}^{-1}$ , предполагая, что скорость деформации при испытании остается постоянной. Однако это условие не всегда соблюдается, особенно при испытании высокопрочных материалов. Кроме того, данный метод не предоставляет возможности контролировать требуемый закон нагружения в процессе испытаний, а при построении диаграмм не учитывается сложная динамика распространения волн [161,162,163].

Для проведения методики расширяющегося кольца используются высокоскоростная киносъемка и теневая оптическая система с использованием лазерного источника света, фотоумножителя [164] и тензорезисторов [165]. Суть метода заключается в создании одноосного напряженного состояния в тонком кольце при действии симметрично радиального давления. Однако данная методика позволяет зафиксировать только радиальную раздачу образца. Кроме того, при обработке результатов требуется дважды произвести дифференцирование экспериментальной кривой, что часто приводит к существенным искажениям полученных результатов.

Наиболее простым и удобным методом определения прочностных и деформационных свойств материалов считается метод Тейлора [166-169]. Для материалов, обладающие поведением близким к идеально-пластическому, результаты определения напряжений течения имеют хорошую сходимость. При испытании материалов с хорошим упрочнением данный метод дает осредненные значения предела текучести. В методе Тейлора для регистрации формоизменений образца при соударении применяется высокоскоростная киносъемка [161].

Среди этих методов, на сегодняшний день, выделяется метод Кольского [170-180] в котором используется разрезной стержень Гопкинсона (РГС) по причине простоты реализации и хорошей теоретической обоснованности. Этот метод позволяет получить не только диаграмму деформирования, но и кривую изменения скорости деформации в течение всего хода испытания. Испытания данной методикой возможно проводить для широкого круга материалов при скоростях деформации в диапазоне  $10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1}$  [161,181-183]. Удобство использования метода Кольского привело к разработке других вариантов РГС (растягивающий, крутильный, двухосный и т.д.) помимо стандартной схемы для сжатия образца. К тому же на основе данного метода разработаны схемы, позволяющие определить характеристики трещиностойкости.

Традиционная конфигурация РГС включает два тонких и длинных стержня с высоким пределом текучести (рис. 1.12). Между ними помещается образец из изучаемого материала, который имеет небольшую длину и предел текучести ниже, чем у мерных стержней. Систему стержней и образца подвергают воздействию упругих импульсов, которые регистрируются тензодатчиками, расположенных на мерных стержнях. После чего, основываясь на одномерной теории упругих волн, строят динамическую диаграмму деформирования образца [160].

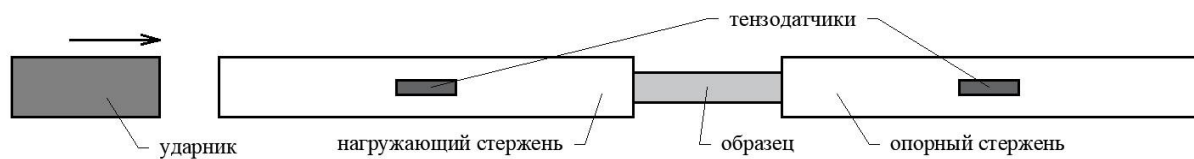


Рисунок 1.12 - Схема традиционного варианта РГС

### 1.3.2. Специфика поведения металлов и сплавов при динамических воздействиях

Поведение металлов при действии динамической нагрузки представляет собой сложную и важную область исследований в материаловедении и инженерии. Динамическая нагрузка, характеризующаяся быстрыми изменениями силы или давления на материал, может приводить к различным изменениям в его структуре, свойствах и поведении. Это имеет прямое отношение к различным отраслям промышленности и науки, включая авиацию, автомобилестроение, оборонную промышленность, строительство и многие другие.

При динамической нагрузке металлические материалы могут подвергаться различным механическим деформациям, включая упругие, и пластические деформации. Воздействие динамической нагрузки также может вызывать изменения в микроструктуре металла, образование дефектов и трещин, а также реакции на высоких температурах.

Понимание этих процессов играет ключевую роль в разработке прочных и надежных материалов, а также в оптимизации конструкций, способных выдерживать динамические нагрузки. В этом контексте исследования поведения металлов при динамической нагрузке направлены на выявление основных механизмов деформации и разрушения, а также на разработку методов прогнозирования и управления этими процессами.

Совершенствуя методику Кольского и традиционную конфигурацию РСГ, исследователи проводят испытания различных материалов и сплавов при высокоскоростной деформации. Так, например, в работе [184] Т. Николас предлагает модифицированный вариант разъемного стержня Гопкинсона для проведения испытаний ряда образцов алюминиевых, титановых и стальных сплавов на растяжение при скоростях деформации до  $10^3 \text{ с}^{-1}$ . В схеме, используемой автором, металлический образец соединяется со стержнями с помощью резьбы и окружается разрезным кольцом, что позволяет основной части волны сжатия проходить через кольцо с достаточно большой амплитудой, не вызывая пластической деформации образца.

Pothis, Jayaram R., Y. Perla, H. Arya and N.K. Naik., используя установку, представленную на рисунке 1.13, проводили исследования влияния скорости деформации на свойства при растяжении алюминиевого сплава и низкоуглеродистой стали [185]. По результатам испытаний сделан вывод о уменьшении пикового усилия, полученного с помощью тензодатчика, установленного на передающей планке, в сравнении с пиковым усилием, зарегистрированным тензодатчиком, установленным на падающей планке. Это объясняется увеличением плотности дислокаций и зародышей в образцах из алюминиевого сплава и низкоуглеродистой стали при нагружении с высокой скоростью деформации и последующим затуханием волны напряжения при ее распространении в образце. Также для обоих материалов было замечено увеличение предела текучести при высокой скорости деформации по сравнению с квазистатическим

нагрузением. Коэффициент повышения прочности для алюминиевого сплава и низкоуглеродистой стали получились равными 1,3 и 1,8 соответственно.

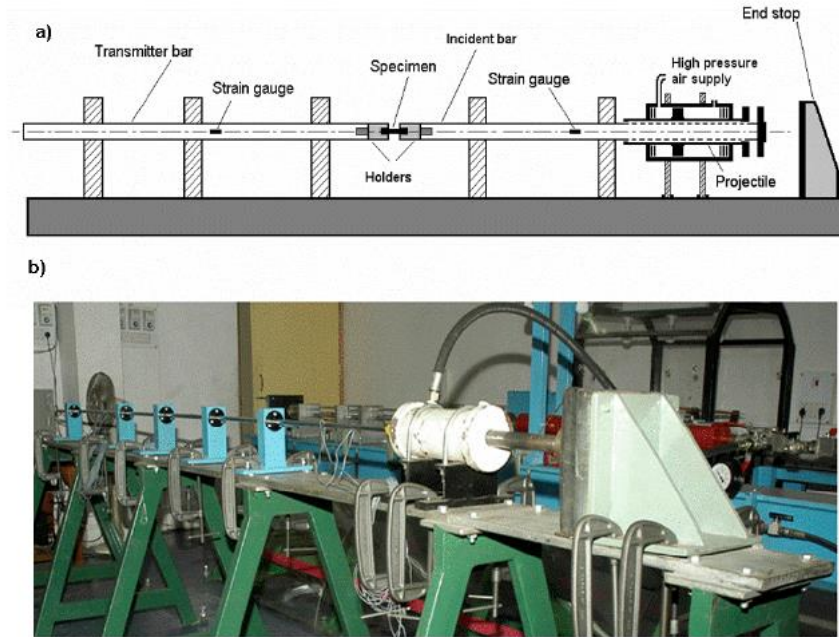


Рисунок 1.13 – Разрезной стержень Гопкинсона с нажимной планкой: а) схема установки; б) фотография установки [185]

В работе [186] коллектив авторов в рамках совместной швейцарско-русской программы проводил исследования высокопрочной стали, применяемой для изготовления прядей канатов, при высокой скорости деформации. Данные канаты из предварительно напряженных стальных нитей используются в гражданском строительстве в таких сооружениях как, вантовые и подвесные мосты, сухожилия на морских платформах, а также в качестве напряженных жил в бетонных конструкциях. Испытания, описываемые в статье, проводились с помощью экспериментальной установки, расположенной в ННГУ им. Лобачевского, которая представляет собой традиционную модификацию РСГ. В данной работе было проанализировано поведение высокопрочной стали при растяжении и сжатии при высокой скорости деформации.

В статье [187, 188] предложена экспериментальная методика для получения графика кривой «напряжение-деформация» для листовых материалов при высоких скоростях деформации до  $10^3 \text{ с}^{-1}$ . Авторы модифицируют разъемную систему прижимных планок Гопкинсона, добавляя устройство инверсии нагрузки. Это устройство преобразует сжимающую силу, приложенную к его границам, в растягивающую нагрузку на образец. Устройство инверсии состоит из «толкателя» (рис. 1.14), который располагается между входным стержнем и образцом и инвертирует поступающий сжимающий импульс в растягивающую нагрузку на образец, а также «стремянки», удерживающей образец и передающей приложенное усилие на два параллельных стержня-передатчика. Два выходных стержня используются для минимизации образования ложных волн при преобразовании выходной силы из растяжения в сжатие. Кроме

того, авторы используют цифровую корреляцию высокоскоростных видеоизображений для анализа деформации на поверхности образцов. В отличие от систем с раздвоенным растягивающим стержнем Гопкинсона, предлагаемая экспериментальная установка обладает технологическое преимущество, заключающееся в возможности создания падающей волны с использованием стандартной системы ударных стержней. Это облегчает генерацию импульсов нагрузки с коротким временем нарастания и значительной длительностью. По мнению авторов, предложенная методика особенно полезна для исследования влияния высоких скоростей деформации на начало разрушения вязких листовых материалов, когда требуются значительные деформации. Для подтверждения предложенной экспериментальной методики было проведено тщательное конечно-элементное моделирование. Результаты показали, что при использовании экспериментальной установки без каких-либо погрешностей (с идеальным выравниванием и захватом образца) измеренная кривая напряжение-деформация при скоростях деформации  $10^3 \text{ с}^{-1}$  практически не подвержена колебаниям.

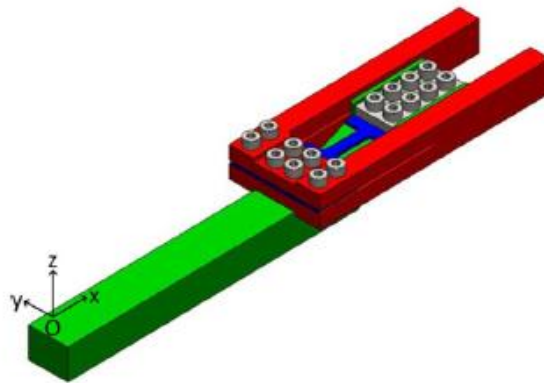


Рисунок 1.14 – Схема устройства для инвертирования нагрузки, включающая толкатель (зеленым), стремя (красным) и образец (синим) [187, 188]

### 1.3.3. Динамика стальных конструкций из труб

Конструкции из труб проявляют свою эффективность и преимущества особенно при динамических нагрузках. Их уникальные свойства делают их идеальным выбором для ситуаций, где требуется высокая прочность и устойчивость к переменным нагрузкам.

Трубы обладают инерцией, что позволяет им успешно справляться с динамическими нагрузками, такими как вибрации, удары и колебания. Это особенно важно для конструкций, которые подвергаются постоянным изменениям нагрузок, например, в строительстве мостов, подвесных конструкциях или автомобильной промышленности.

Использование трубных профилей позволяет создавать легкие, но прочные конструкции, способные эффективно амортизировать динамические силы. Это способствует увеличению срока службы конструкций и снижению риска повреждений из-за воздействий переменных нагрузок.

Кроме того, трубы могут быть легко соединены различными способами, что обеспечивает удобство в проектировании и адаптации конструкций, не уменьшая надежности и стабильности ее работы при воздействии динамических нагрузок.

Тонкостенные трубы находят применение в различных областях промышленности, таких как строительство, машиностроение, энергетика и другие. При производстве таких труб используются материалы, подбираемые с учетом требований к прочности, устойчивости и коррозионной стойкости. Анализ собственных частот и форм малых колебаний играет ключевую роль в процессе разработки новых конструкций из тонкостенных труб, а также в обновлении существующих.

Изучение динамических характеристик тонкостенных оболочек способствует повышению точности и надежности проектирования конструкций, а также позволяет прогнозировать и предотвращать возможные проблемы, связанные с колебаниями труб в процессе эксплуатации. Это особенно важно в условиях переменных нагрузок, которым подвергаются промышленные конструкции.

С учетом быстрого развития новых технологий и материалов в области строительства и машиностроения, развитие методов анализа динамики тонких оболочек становится актуальным направлением, способствующим созданию более эффективных и долговечных промышленных решений.

Еще в 1924 г. Н.М. Беляевым был поставлен вопрос о поперечных колебаниях стержня под воздействием продольных периодических сил и проблему неустойчивости движения в данном контексте [189]. Динамической устойчивостью и параметрическими колебаниями отдельных стержней под воздействием переменных продольных сил также занимались авторы работ [190,191]. Исследование устойчивости стержня при воздействии периодических продольных сил имеет значительное практическое значение в различных областях. Например, при расчете шатунов быстроходных паровых машин и двигателей внутреннего сгорания, а также при определении коэффициента запаса устойчивости при проектировании сжатых стержней в сооружениях. Этот вопрос также актуален при рассмотрении динамических нагрузок на такие строения, как, например, мосты и башни, подвергающиеся воздействию переменных нагрузок от ветра, сейсмических нагрузок, динамических нагрузок от транспорта и нагрузки от работающего оборудования. Таким образом, понимание устойчивости стержней в подобных условиях остается крайне важным в настоящее время.

Рассматривая в своей работе [193] динамическую устойчивость внецентренно сжатых тонкостенных стержней металлических конструкций, А.В. Индейкин отмечает, что влияние эффектов, связанных с кручением стержней, на динамическую устойчивость незначительно, однако им нельзя полностью пренебрегать. Полученные результаты показывают, что при

постоянной составляющей продольного усилия в стержне, фиксированной на определенном уровне, задача определения границ областей динамической неустойчивости сводится к анализу классической задачи, представленной Н. М. Беляевым и В. В. Болотиным [189, 191].

Продолжая исследования по вопросу динамики стержней, А.В. Индейкин в своей работе [192] рассматривает параметрические колебания элементов конструкций фермы и их взаимодействие с общими колебаниями конструкции. Источниками локальных колебаний являлись кинематические воздействия на концы стержней в условиях общих вынужденных колебаний конструкций, вызванных воздействием стационарных и подвижных нагрузок на конструкцию.

Коллектив авторов работы [194] в своем исследовании, опираясь на накопленный опыт анализа колебаний и вибраций строительных конструкций в целом, проводят экспериментальные и численные расчеты по определению динамических параметров отдельного конструктивного элемента башенного сооружения. В результате работы авторами предложена методика определения тяжений в предварительно напряженных раскосах антенно-мачтового сооружения, базирующаяся на определении периода собственного колебания элемента.

Использование тонкостенных труб распространено в промышленности. Для изготовления таких элементов используют различные типы стали, а также полимерные материалы. Анализ собственных частот и форм малых колебаний тонкостенных труб имеет важное значение как для проектирования, так и для проведения экспертизы уже существующих промышленных конструкций, поэтому решение задач динамики тонкостенных оболочек может увеличить срок службы таких труб.

Множество исследований, посвященных динамическим колебаниям стержней проводятся с целью изучения частот и форм собственных колебаний трубопроводов, изготовленных из тонкостенных труб большого диаметра [195-199]. В классической теории стержней ограниченные возможности оценки работы тонкостенных труб связаны с воздействием внутреннего давления и деформаций поперечного сечения. В связи с этим для получения более точных результатов исследователи предпочитают использовать в качестве расчетной модели цилиндрическую оболочку, наиболее полно отражающую реальное поведение конструкции, чем стержень.

Применение новых технологий, например, компьютерного моделирования и численного анализа, позволяет более точно описывать динамическое поведение тонких оболочек и прогнозировать их реакцию на различные нагрузки. Это дает инженерам и проектировщикам возможность оптимизировать конструкцию и выбрать наиболее подходящие материалы для достижения требуемой прочности, устойчивости и долговечности.

В своей работе А.В. Чигарев и А.Р. Покульницкий применяют методы теории упругости для определения собственных частот колебаний и форм колебаний тонкостенной круговой цилиндрической трубы, далее сравнивая результаты с данными, полученными с использованием конечно-элементарной модели, разработанной в ANSYS [200].

#### **1.3.4. Особенности высокоскоростного деформирования бетонов и железобетонов**

Динамические свойства металлов исследованы гораздо шире, чем свойства такого хрупкого материала, как бетон. Тем не менее, бетон, как наиболее распространенный строительный материал, был предметом тщательного изучения на протяжении многих десятилетий. Свойства бетона зависят от свойств мелкого и крупного заполнителей, связующего, воды, различных добавок и условий приготовления бетонной смеси. В результате сочетание всех этих факторов формирует огромное множество возможных комбинаций, которые непосредственно влияют на свойства бетона. Это приводит к тому, что невозможно исследовать все разновидности бетона. Таким образом, данные, полученные при изучении поведения бетона, отражают свойства только конкретного материала и не могут быть обобщены на другие типы бетона [160].

Однако для того, чтобы правильно разрабатывать составы бетона, его производство и применение в условиях динамических нагрузок, необходимо разработать теорию прочности, которая позволит предсказывать поведение бетона при таких нагрузках. Эта теория должна учитывать влияние различных технологических факторов, таких как качество цемента и заполнителей, состав бетона, условия его приготовления, уплотнения и твердения.

В настоящее время отсутствует полноценная теория, однако на основе многочисленных исследований сформулированы различные гипотезы и разрабатываются некоторые аспекты теории, которые могут помочь объяснить причины разрушения бетона под воздействием динамических нагрузок и особенности его поведения [160].

В монографии [160] авторы детально рассматривают факторы, влияющие на изменение свойств бетона в зависимости от времени и скорости нагружения. Среди них следует выделить:

- характеристики материалов, применяемых в составе бетона;
- особенности структуры бетона, включая расположение и объем отдельных компонентов, количество и качество дефектов, а также особенности контактной зоны;
- содержание и распределение жидкой фазы в бетоне.

Все упомянутые выше факторы тесно связаны с технологией производства бетона, поэтому правильная организация этапов его изготовления имеет крайне важное значение. Однако

следует понимать, что эти факторы воздействуют на статическую и динамическую прочность бетона по-разному [160].

При малых напряжениях в бетоне, помимо упругих деформаций, также возникают неупругие остаточные деформации, что является характерным признаком его нелинейного поведения [201,202]. Под действием динамических нагрузок поведение бетона может различаться: он может разрушиться как при нарастании нагрузки, так и при ее снижении, но также способен выдержать динамическую нагрузку, превышающую статические пределы прочности, без разрушения. На рисунке 1.15 представлена типичная диаграмма деформирования бетона при статическом одноосном сжатии и растяжении, с указанием механических характеристик. На рисунке 1.16. показана диаграмма при разных режимах однократного динамического нагружения.

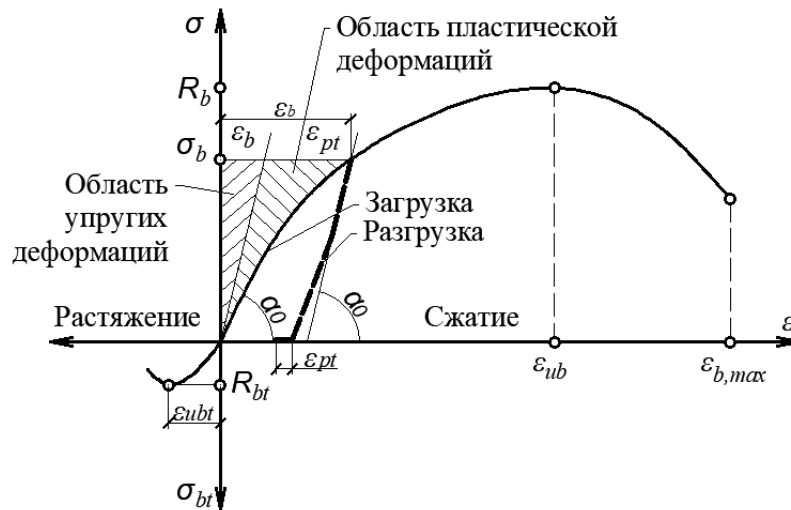


Рисунок 1.15 - Диаграмма зависимости между напряжениями и деформациями в бетоне при статическом сжатии и растяжении.  $\epsilon_{ub}$ ,  $\epsilon_{ubt}$  - предельная сжимаемость и растяжимость соответственно;  $\epsilon_{b,max}$  - максимальная сжимаемость на нисходящей ветви диаграммы [160,202]

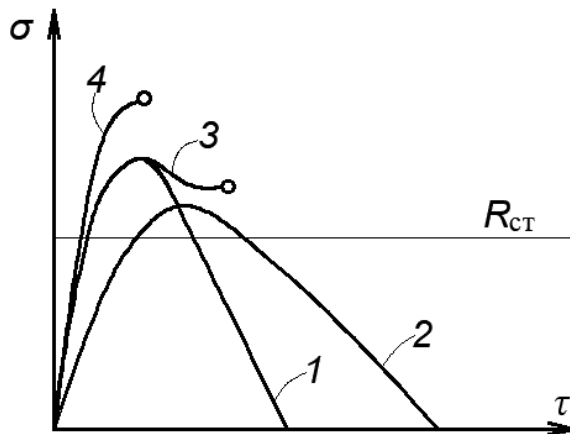


Рисунок 1.16 - Диаграммы деформирования при различных режимах динамического нагружения бетона: 1,2 – образец не разрушился; 3,4 – образец разрушился [202]

Согласно [160] главным параметром, определяющим поведение бетона при динамической нагрузке, является коэффициент динамического упрочнения (КДУ), который представляет собой отношение прочности бетона при динамической нагрузке к его статической прочности. Для оценки стойкости бетона к перегрузкам (по сравнению со статической прочностью) также используется показатель времени до разрушения. Критериями поведения бетона при ударе являются следующие:

- количество энергии, необходимое для возникновения первых трещин или полного разрушения материала;
- динамический предел прочности, при котором происходит локальное разрушение;
- объем разрушений при определенных параметрах удара.

Критерии, определяющие стойкость бетона различным видам динамических нагрузок, зависят от характера и скорости нагружения, структуры бетона и других факторов.

На рисунке 1.17 приведены результаты испытания строительного раствора при высоких скоростях деформации, полученные с использованием методики Кольского, описанные в работе [203]. Данное изображение показывает влияние скорости деформации на типичные диаграммы деформирования хрупкого материала.

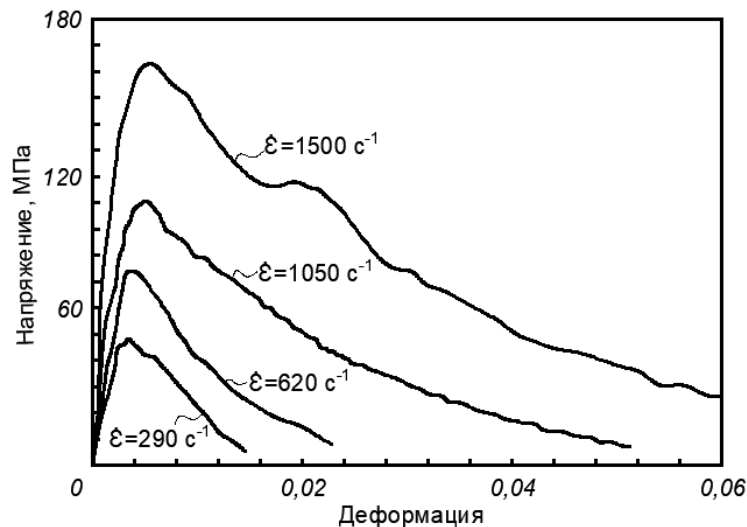


Рисунок 1.17 - Динамические диаграммы деформирования строительного раствора [203]

В большом количестве работ [204-209] рассматривается зависимость КДУ от времени нагружения различных бетонов при сжимающем усилии. Результаты, полученные в ходе испытаний, показали, что при уменьшении времени нагружения, другими словами, при увеличении скорости деформации, происходит упрочнение бетона. В этих экспериментах КПД приближался к значению равному двум при минимальном времени нагружения 0,001 с. При этом существует некоторый разброс результатов испытаний, который увеличивается с ростом скорости деформаций. Согласно [204,205] такой разброс может происходить из-за применения различных методов испытаний, различий в форме и размерах испытуемых образцов, различий в

пропорциях компонентов, входящих в состав бетонных образцов, различий в условиях, при которых бетонные образцы набирали свою прочность, наличие инерционных эффектов и эффектов трения, а также различий в скорости деформации при изменении статической прочности.

Из результатов ряда испытаний [205,208,209] бетонов на сжатие стало ясно, что влияние скорости деформации на коэффициент динамического упрочнения (КДУ) становится заметным при скоростях деформации выше определенного критического значения, которое различается в зависимости от оценок разных исследователей.

На основании экспериментальных данных также было установлено, что при испытаниях на растяжение влияние скорости деформации на КДУ становится существенным при превышении определенной величины скорости деформации, которая оценивается по-разному в различных источниках [206-208]. Кроме того, было отмечено, что при одинаковой скорости деформации при растяжении КДУ значительно превышает значения, полученные при сжатии [207].

В работе [210] был проведен анализ влияния времени нагружения на величину деформаций. По данным испытаний сделан вывод, что скорость нагружения не влияет на предельную деформацию при разрушении.

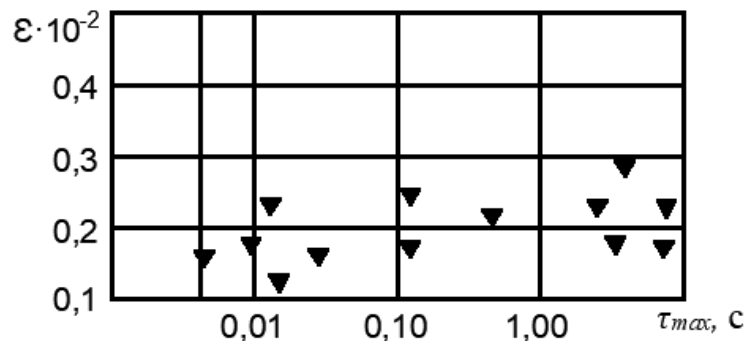


Рисунок 1.18 - Предельные деформации бетона при разном времени нагружения [210]

В исследованиях [-] были получены результаты экспериментов при скорости деформации около  $10 \text{ с}^{-1}$ , которые показывают противоречивость деформации бетона при сжатии: она то уменьшается примерно на 30%, то увеличивается на 40% по сравнению со статической сжимаемостью. Кроме того, наблюдается некоторый разброс в результатах испытаний. В работах [203,204] авторы отмечают, что причиной этого разброса и противоречивости результатов могут быть различия в используемых испытательных установках, формах и размерах образцов, а также составе бетонной смеси, что в свою очередь влияет на статическую прочность, а также из-за несовершенства измерительных приборов.

Анализ зависимости величины динамического модуля деформации от скорости нагружения образцов проведен в работе [210]. На рисунке 1.19 показана зависимость модуля деформации от времени нагружения при разных ступенях нагружения  $\sigma/R$ . Авторами было замечено, что при увеличении скорости нагружения происходит увеличение скорости деформации. При наибольшей ступени нагружения модуль увеличивается в большей степени. Так же в [210] замечено, что при повышении скорости испытания, предел упругой работы и трещинообразования также возрастают.

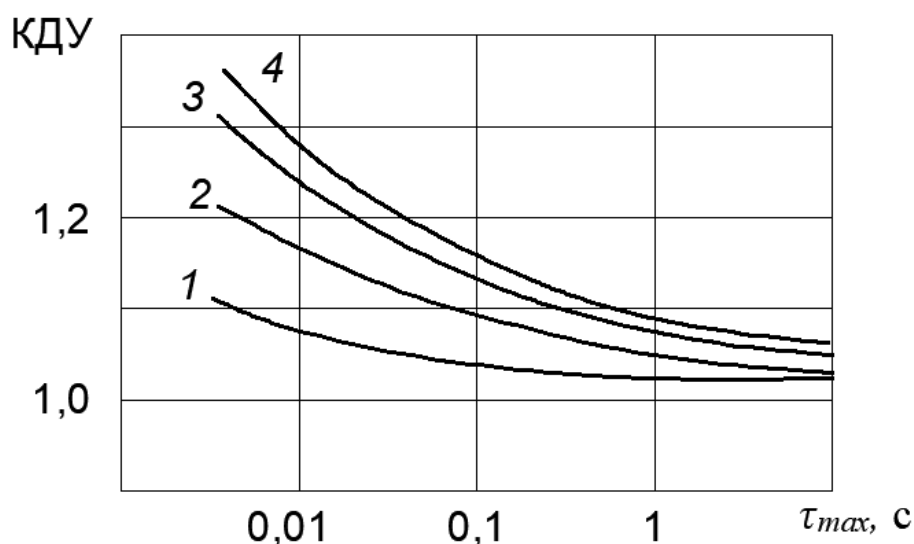


Рисунок 1.19 - Зависимость модуля деформации от времени нагружения при разных  $\sigma/R$ : 1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 0,9; 4 - зависимость КДУ (для сравнения) [160,210]

Большое количество исследований было проведено с целью выявления влияния структурных факторов на динамические свойства бетона. Согласно [210] бетоны, обладающие небольшим количеством дефектов, высокой плотностью и однородностью, хорошим сцеплением между заполнителем и цементным камнем, повышенным отношением статической прочности на растяжение к статической площади на сжатие  $R_p/R_{сж}$  и пластичности, обладают наибольшим сопротивлением к динамическому воздействию.

В таблице 1.1 показано качественное влияние некоторых факторов на КДУ [160,210].

Таблица 1.1 - Влияние различных факторов на КДУ бетона [160,210]

| Характеристика       | Возможное влияние на КДУ  |
|----------------------|---|
| Марка бетона         | Повышение марки бетона может увеличить КДУ  |
| Качество цемента     | Белитовые или пластифицированные цементы или цементы с микрозаполнителем повышают КДУ                               |
| Качество заполнителя | Чистые заполнители, обладающие повышенным сцеплением с цементным камнем, например известняковые. Могут повысить КДУ |
| Условие твердения    | КДУ может снизиться при пропаривании бетона, особенно при недостатке влаги  |
| Влажность            | КДУ увеличивается с повышением влажности бетона   |
| Возраст              | КДУ может уменьшаться с увеличением возраста бетона   |

В работе [204], авторы, исследуя влияние структурных факторов на КДУ бетона, отметили, что значительно влияние оказывает только марка (класс) бетона (статическая прочность на сжатие), а все остальные факторы, такие как условия твердения, качество заполнителя, влажность и возраст являются второстепенными факторами, оказывающие нестабильно влияние на КДУ.

С помощью метода Кольского и его модификаций авторы работ [211-213] определяли влияние заполнителя, а именно его крупности, шероховатости, прочности, на динамическое поведение бетонов. В [213] сделан вывод о росте прочности бетона при неизменяющейся скорости деформации с ростом крупности заполнителя; в [211] отмечается, что более прочный заполнитель увеличивает положительную чувствительность бетона к скорости деформации; в [212] авторы показали, что предел прочности при сжатии и растяжении можно повысить до 30% и 15% соответственно, если использовать заполнитель с более шероховато поверхностью.

В исследовании [210] авторами также был проведен анализ влияние влажности на динамическую прочность бетона. Для этого часть образцов до испытания хранили в воде, а другую часть в течении двух суток высушивали при температуре 1000°С. Большое количество влаги в водонасыщенных образцах привело к увеличению динамической прочности бетона, но в это же время уменьшив статическую прочность. Авторы в своей работе приводят рисунок (рис. 1.20), на котором видно, что в некоторой точке две кривые (для сухого и водонасыщенного образца) пересекаются, что говорит о совпадении прочности при данной скорости нагружения. При этом в случае увеличения скорости нагружения влага уже не будет успевать проникать в трещины, следовательно, не сможет ускорить деформирование и разрушение образца.

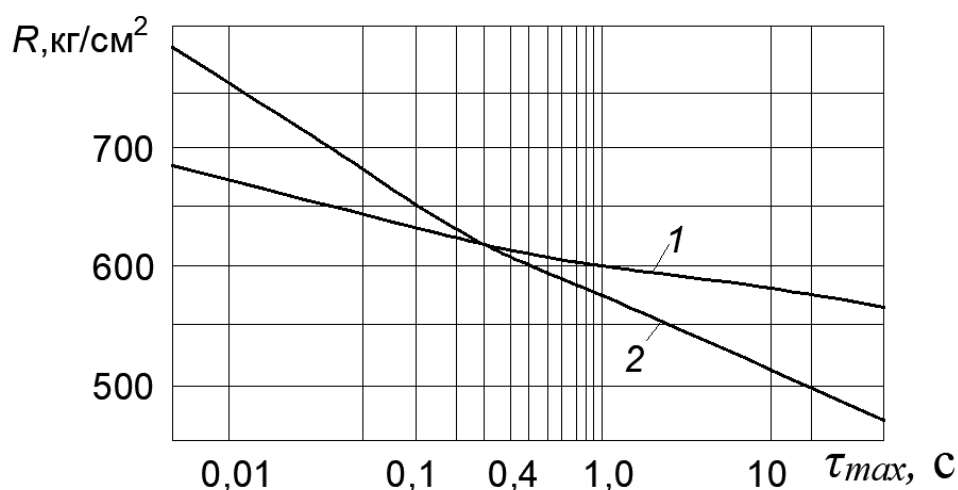


Рисунок 1.20 - Влияние влажности при статическом и динамическом нагружении на прочность бетона: 1 – сухого, 2 – водонасыщенного [160,210].

В работе [214,215] исследуется влияние влажности на квазистатическую прочность бетона. В результате авторами работы получены следующие значения квазистатической прочности при сжатии и растяжении: для сухих образцов 56 и 5 МПа соответственно; для

водонасыщенных образцов – 42 и 4 МПа соответственно. Следовательно, чувствительность к скорости деформации для сухого образца и образца, насыщенного водой, практически одинаковая. В то время как величина КДУ у водонасыщенного образца получилась выше из-за более низкого значения квазистатической прочности.

Авторы работы [210] в своем исследовании также изучали влияние температуры нагрева бетона на КДУ. Так, например, при нагревании бетона до 100°C приводит к появлению в структуре бетона дефектов, что сказывается на ухудшении прочности. В статье бетонные образцы нагревались до температуры 500°C в течении 6 часов, что привело к резкому снижению прочности бетона, в особенности его динамической прочности, которая приблизилась к значениям статической прочности, а в некоторых случаях оказывалась меньше. В случае замораживания бетона при образовании в нем льда, происходит уменьшение доли жидкой фазы в нем и появление внутренних напряжений, что в свою очередь ведет к уменьшению КДУ. Результаты, описанные в [210] подтвердили, что замораживание бетона ухудшает его способность воспринимать динамические нагрузки. В свою очередь, в некоторых случаях замораживание может повысить статическую прочность, что в некоторой степени компенсирует снижение КДУ. Попеременное замораживание и оттаивание снижает КДУ бетона, согласно опытам, проведенным в [210], так как в контактной зоне возникают дефекты, ведущие к понижению прочности. При этом динамическая прочность понижается существенно статической.

Также в работе [210] был проведен анализ влияния размеров образцов на динамическую прочность бетона. Что касается статической прочности, то из-за влияния масштабного фактора призматическая прочность бетона меньше, чем кубиковая прочность. В результате испытаний на динамическую нагрузку, авторы выявили, что переходный коэффициент от предела прочности при сжатии коротких образцов к пределу прочности более длинных образцов при статическом и динамическом нагружении приблизительно равны.

Коллективом авторов из научно-исследовательского института механики при ННГУ им. Н.И. Лобачевского под руководством А.М. Брагова было проведено еще большое количество работ с испытаниями на динамическое нагружение.

Например, в [181] А.М. Брагов, А.Ю. Константинов и М.В. Медведкина пишут, что из-за того, что мерные стержни обладают конечным радиусом, при испытании хрупких материалов на растяжение в опорном стержне могут возникнуть импульсы малой длительности, форма которых может изменяться при их движении по стержню. Хотя в стандартной методике Кольского предполагается, что упругие волны распространяются по мерным стержням без искажения, что в свою очередь позволяет использовать результаты с тензодатчиков, установленных на некотором удалении от образца, чтобы определить смещение торцов образца и действующих на

него сил. Согласно работе [181] использование одномерной теории распространения упругих волн в данном случае может привести к ошибкам при обработке экспериментальных данных. В своем исследовании авторы провели анализ экспериментальной схемы для определения предела прочности при растяжении хрупких материалов на примере численного моделирования, предложив методику восстановления истинных силовых и временных характеристик процесса разрушения образца по показаниям тензодатчиков, которые располагаются на значительном расстоянии от него. Также коллективом создана программа, позволяющая путем численного решения частотного уравнения определять дисперсионное соотношение для заданных характеристик стержня.

Также вышеупомянутым коллективом Коллектив ННГУ им. Н.И. Лобачевского был проведен ряд исследований [216-222], посвященных анализу динамических свойств фибробетона с применением методики Кольского и ее модификации [223,224]. В своей работе они обратили внимание на проблему моделирования динамических прочностных характеристик материалов, которая связана с влиянием истории и способа нагружения на предельные свойства. Авторы отмечают, что при изменении параметров воздействия, а именно продолжительности действия нагрузки, амплитуды, скорости нарастания внешнего воздействия и других факторов предельные значения динамических свойств могут колебаться в широком диапазоне, достигая от 100 до 1000%. Таким образом, экспериментальное определение критических значений характеристик в динамике оказываются очень неустойчивыми по сравнению со статическими, которые представляют собой постоянные параметры материала и изменяются незначительно в пределах десяти процентов. В своем исследовании авторы рассчитывают прочность фибробетона от времени при сжатии и растяжении, используя критерий инкубационного времени, и приходят к выводу, что полученные зависимости прочности материала от времени хорошо соотносятся с экспериментальными данными.

В работе [225] А.М. Брагов, С.П. Горбиков и А.К. Ломунов исследуют возможность использования в качестве демпфирующего материала древесину различных пород. Данный материал может быть полезен при гашении динамических воздействий при транспортировке контейнеров с радиоактивными веществами, отработавшим топливом, компонентами боеприпасов и т.п. Так как древесина считается анизотропным материалом, свойства которой зависят от угла приложения силы к волокнам, то авторами было принято решение исследовать зависимость получаемых свойств от угла между направлением приложения нагрузки и направлением расположения волокон. Детальные исследования были проведены при углах  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$  для образцов из сосны, березы и осины. Также исследования проводились при различных температурах: комнатной температуре, при температурах  $+60^\circ\text{C}$  и  $-40^\circ\text{C}$ , так как перевозка контейнеров происходит в различных климатических условиях. Испытания на сжатие

проводилось с помощью установки, реализующей метод Кольского и разрезной стержень Гопкинсона. Одним из результатов исследования стал вывод о том, что древесина березы имеет более высокие прочностные характеристики при нагружении вдоль и поперек волокон, а также для всех пород древесины пределы динамической прочности для испытаний вдоль волокон выше, чем при испытаниях поперек волокон.

Все методы, указанные в вышеперечисленных работах, используются для получения большого количества различных динамических свойств материалов, которые необходимы для проведения сложных расчетов при проектировании инженерных сооружений, испытывающих в процессе эксплуатации интенсивные динамические нагрузки, а также для исследований новых материалов. Тем не менее, в определенных ситуациях инженеру требуется определить значение конкретной характеристики материала, например, такой как динамический модуль упругости или коэффициент неупругой работы, без проведения дорогостоящих испытаний в специализированных лабораториях.

### **1.3.5. Анализ собственных колебаний тонкостенных оболочек как метод исследования процессов деформирования**

Трубобетонные конструкции играют важную роль в современной инфраструктуре, обеспечивая транспортировку воды, нефти, газа и других жидкостей, а также обеспечивая прочность и устойчивость различных инженерных сооружений, таких как мосты, дамбы и туннели. В связи с этим вопросы, связанные с их динамикой, становятся предметом повышенного интереса для инженеров и исследователей.

Динамика трубобетонных конструкций представляет собой область исследований, посвященную изучению их поведения под воздействием различных динамических нагрузок. Это включает в себя анализ поведения таких конструкций при вибрациях, резонансные явления, динамические нагрузки и их воздействие на прочность и долговечность конструкций. Понимание действительной работы трубобетонных конструкций в процессе всего жизненного цикла имеет решающее значение для обеспечения безопасности, эффективности и надежности трубобетонных сооружений в условиях разнообразных эксплуатационных и окружающих условий.

В статье [226] авторами с помощью модели, построенной методом конечных элементов, решается задача о расчете прочности сталебетонных колонн при повторном продольном ударе и подрыве на одной из ее боковых поверхностей цилиндрического заряда открытого взрывчатого вещества. В исследовании «повторного удара» при первом ударе разрушение колонны не случилось, при втором ударе в колонне произошел изгиб колонны. При этом в нижней части колонны произошел разрыв стальной оболочки, по всему телу колонны образовались трещины,

при этом фрагментация бетона произошла только в трех местах: у верхнего и нижнего торцов, а также вблизи центра колонны. При все при этом колонны сохраняет свою частичную несущую способность.

Продолжая свои исследования, коллектив авторов под руководством Белова Н.Н. в работе [227] анализирует результаты испытаний стальных трубобетонных колонн на неоднократные торцевые удары падающего груза на копровой установке. Полученные результаты сравниваются с данными, полученными методом компьютерного моделирования поведения конструкционных материалов в условиях ударного нагружения. Всего было проведено три удара. Первое ударное воздействие вызывает небольшой изгиб колонны и появление микротрещин, достигающих критических значений практически во всем бетонном теле, однако макроразрушение не наступает из-за недостаточных условий для фрагментации. Второй удар приводит к дополнительному изгибу трубы и появлению небольшого вздутия в верхней части, начинается процесс трещинообразования в бетоне, но макроразрушение не происходит. Третий удар приводит к разделению стальной и бетонной частей колонны, при этом бетонное тело отходит от стальной трубы. Объединение результатов экспериментальных исследований с компьютерным моделированием позволяет более глубоко понять процессы при ударном нагружении колонны и правильно интерпретировать результаты эксперимента.

В своем исследовании Jun W., Yu C., Kai W. [228] рассмотрели, как изменяется способность несения нагрузки образцов трубчатых колонн при местном повреждении, вызванном ударным воздействием, направленным перпендикулярно трубе. Это повреждение приводило к небольшому местному деформированию стенки. Затем образец подвергался сжатию до тех пор, пока не потерял устойчивость. При увеличении энергии удара боковая пластичная деформация увеличивалась, а остаточная осевая прочность снижалась. Было установлено, что такие воздействия приводят к потере осевой прочности на более чем 40%. Результаты также показали, что место удара оказывает существенное влияние на осевую несущую способность стержней, при этом образцы большей толщины обладают большей несущей способностью.

Некоторое количество работ [229, 230-232] посвящено изучению работы трубобетонных колонн при сейсмических нагрузках. В работе [230-232] с помощью натуральных и численных экспериментов исследуются динамические характеристики бетононаполненных стальных трубчатых колонн при различных осевых сжимающих нагрузках. Результаты испытаний показали, что при одинаковом соотношении ширины к толщине ( $B/t$ ) и составляющих материалах, прочность на сдвиг и способность к деформации уменьшаются при увеличении осевого сжатия. К тому же более высокое осевое сжатие приводило к более раннему локальному изгибу стальной трубы, особенно в случае с минимальной толщиной стенок из исследуемых вариантов.

Исследование зависимости частоты собственных колебаний трубобетонной колонны от величины сжимающей силы приводится в работе [233]. На рисунке 1.21 демонстрируется кривая зависимости частоты от величины продольной силы. После нагрузки равной 60 кН общая кривая разделяется на две. Это происходит из-за возникновения двух частот, в следствии отделения бетонного ядра от стальной оболочки. Согласно диаграмме при увеличении продольной силы происходит рост частот собственных колебаний (кроме последнего этапа нагружения). Такая зависимость противоречит общепринятым аналитическим зависимостям, согласно которых частота собственных колебаний колонны с увеличением сжимающей силы должна снижаться линейно. Что требует проведения дополнительных экспериментальных исследований для обоснования роста частоты, в которых необходимо будет учесть изменяющиеся в процессе нагружения физико-механические свойства материалов.

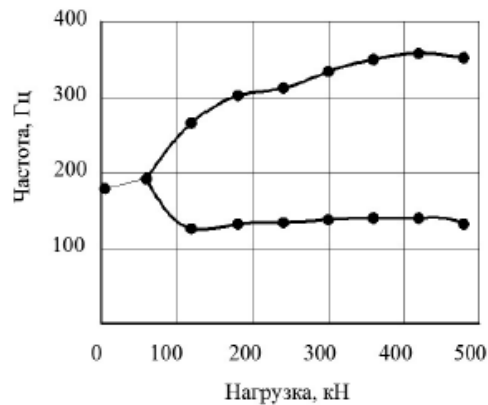


Рисунок 1.21 - Зависимость частоты собственных колебаний колонны от уровня осевой сжимающей силы [233]

На данный момент исследований, посвященных вопросу динамического поведения трубобетона в различных условиях, недостаточно, что является ограничивающим фактором для его развития и применения, несмотря на его потенциал и преимущества в инженерных конструкциях. Более глубокое изучение этого материала поможет раскрыть его возможности и способы оптимизации его использования.

## Выводы по главе 1

На основе проведенного анализа работ известных отечественных и зарубежных авторов можно сделать следующие выводы:

1. Актуальность исследований динамических процессов обусловлена ростом требований к надёжности, долговечности и энергоэффективности подъёмно-транспортных и путевых конструкций, работающих в условиях интенсивных динамических нагрузок. Существующие методы расчёта зачастую носят эмпирический характер и не в полной мере учитывают реальные условия эксплуатации, такие как перекося мостовых кранов, взаимодействие с гибкими опорами, волновые эффекты и нестационарные нагрузки.

2. Научная новизна и методологический пробел заключаются в отсутствии комплексных методов анализа демпфирующих свойств композитных систем, в частности трубобетона, при динамических воздействиях. Существующие методы расчёта не учитывают пространственную работу, контактное взаимодействие стали и бетона, а также влияние предварительного напряжённого состояния и динамических нагрузок (удар, вибрация) на амплитудно-частотные характеристики конструкций. Это открывает возможность для разработки новых экспериментальных и численных методик в рамках механики деформируемого твёрдого тела.

3. Перспективным направлением является исследование влияния осевых сжимающих нагрузок на динамические характеристики стержневых систем. Обнаружены противоречия между общепринятыми аналитическими зависимостями (снижение частоты с ростом силы) и экспериментальными данными, показывающими в некоторых случаях её рост, что требует разработки новых уточнённых методов анализа.

4. Требуются усовершенствованные методы испытаний для определения динамических характеристик материалов (модуль упругости, демпфирование, приведённый коэффициент упругой работы) без дорогостоящих натурных экспериментов на сложных установках типа разрезного стержня Гопкинсона. Разработка косвенных методов, основанных на анализе собственных и вынужденных колебаний образцов и моделей, является актуальной задачей.

5. Высокий потенциал применения имеют трубобетонные конструкции благодаря их высокой несущей способности, устойчивости к огню и динамическим воздействиям. Однако их широкое использование сдерживается отсутствием единых методов моделирования их напряжённо-деформированного состояния с помощью стержневых конечных элементов и достоверных данных об их демпфирующей способности в различных частотных диапазонах.

Разработка методов назначения эффективных деформационно-прочностных характеристик для таких моделей является актуальной научно-практической задачей.

б. Обнаружена необходимость в комплексном подходе к моделированию и рациональному проектированию конструкций, сочетающем: МКЭ-моделирование с учётом контактных взаимодействий и физической нелинейности; экспериментальную верификацию на моделях; учёт реальных режимов нагружения и влияния конструктивных решений узлов на общую динамику системы.

## ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ПРИ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ

### 2.1. Классификация и параметры колебательных процессов

Колебания – это повторяющиеся изменения величины или состояния системы вокруг некоторого равновесного значения. Эти изменения могут происходить во времени, пространстве или любом другом измерении и характеризуются периодическими или непериодическими колебательными движениями. В контексте физики, колебания описываются как процессы, в которых энергия переходит между различными формами, такими как кинетическая, потенциальная или электромагнитная энергия. Колебания встречаются повсеместно в природе, начиная от механических систем, таких как маятники и пружины, до электрических контуров, звуковых волн и квантовых осцилляций.

Основные определения в теории колебаний включают в себя следующие термины:

Амплитуда – максимальное отклонение системы от её равновесного состояния во время колебаний,  $A$ , измеряется в единицах длины или угла.

Период – это время, за которое система завершает один полный цикл колебаний,  $T = [с]$ .

Частота – это количество полных циклов колебаний, завершаемых системой за единицу времени,  $f = [Гц, с^{-1}]$ .

Фаза – это положение колебательной системы в определенный момент времени относительно своего равновесного положения, может быть выражена в виде угла или в виде доли периода,  $\varphi$ .

Фазовая разность – это разница в фазе между двумя колебательными системами, в зависимости от смещения фаз относительно друг друга может быть положительной, отрицательной или нулевой.

Затухание – это уменьшение амплитуды колебаний со временем из-за воздействия сил трения или потери энергии в системе.

Резонанс – это явление увеличения амплитуды колебаний при совпадении или близости собственных частот системы с частотами внешнего воздействия, приводящее к увеличению амплитуды колебаний.

Демпфирование - процесс снижения амплитуды колебаний системы с течением времени из-за потерь энергии.

Собственная частота - частота свободных колебаний системы при отсутствии внешних воздействий,  $\omega$ .

Закон колебаний для определенной координаты (линейной или угловой) представляет собой функцию  $y = y(t)$ , которая описывает изменение этой координаты  $y$  от времени  $t$ . Аналогично, данное уравнение может описывать колебания других кинематических величин, таких как скорость, ускорение, деформация, скорость деформации, а также динамических величин, таких как внешняя сила, внутреннее усилие, опорная реакция и напряжение.

Колебания, описываемые синусоидальной функцией, называются гармоническими колебаниями. Этот тип колебаний является наиболее простым и широко распространенным. Уравнение гармонических колебаний в амплитудной форме имеет вид:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2.1)$$

где  $A$  – амплитуда колебаний, максимальное отклонение от равновесного положения;

$\omega$  – круговая частота (циклическая или угловая), определяющая скорость изменения фазы колебаний;

$t$  – время;

$\varphi_0$  – начальная фаза, положение колебательной системы в определенный момент времени.

График гармонических колебаний показан на рисунке 2.1 и представляет собой косинусоиду (синусоиду).

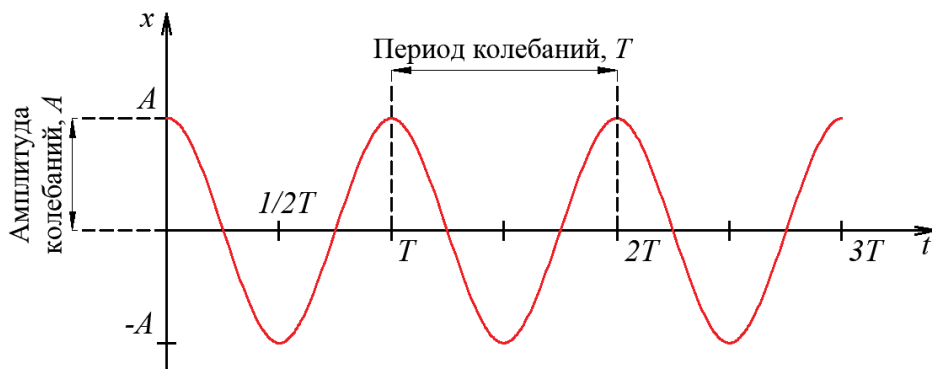


Рисунок 2.1 – График зависимости смещения от времени

Состояние колебательной системы повторяется за промежуток времени, называемый периодом колебаний  $T$ , за который фаза колебаний получает приращение  $2\pi$ , то есть

$$\omega(t + T) + \varphi_0 = (\omega t + \varphi_0) + 2\pi, \quad (2.2)$$

откуда после математических преобразований следует формула для периода колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.3)$$

Величина обратная периоду колебаний, а именно число полных колебаний, совершаемых за единицу времени, называется частотой колебаний.

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.4)$$

Угловая частота ( $\omega$ ) связана с периодом ( $T$ ) и частотой колебаний ( $f$ ) следующим образом:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T \quad (2.5)$$

где  $2\pi$  – это число радиан в одном полном колебании.

При гармонических колебаниях функции скорости и ускорения записываются в следующем виде:

$$\dot{y} = A\omega \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2.6)$$

$$\ddot{y} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2.7)$$

где  $A\omega$  – амплитуда скорости;

–  $A\omega^2$  – амплитуда ускорения.

В процессах колебаний на систему воздействуют различные силы, разнообразные по своей природе и значению. При силовом возбуждении к системе прикладывается переменная внешняя сила, зависящая от времени  $P = P(t)$ , которая является некоторой заданной функцией (часто, периодической) времени и вызывает вынужденные колебания механической системы, на которую эта сила действует.

В зависимости от того, как приложена возмущающая сила, колебания делятся на свободные и вынужденные.

Вынужденные колебания - это такие колебания, которые возникают в системе под действием внешних сил или воздействий, вызывающие ее колебания. Внешняя сила или воздействие создают колебания в системе с определенной частотой и амплитудой, которые могут быть отличными от собственных колебаний системы.

Свободные колебания - это колебания, которые возникают в системе без внешнего воздействия или воздействия внешних сил. Они инициируются начальными возмущениями системы и продолжаются в отсутствие дальнейших внешних воздействий. Характеристики свободных колебаний определяются внутренними параметрами системы, такими как масса, жесткость и демпфирование.

Математическое описание колебаний играет ключевую роль, позволяя анализировать и предсказывать их характеристики и поведение. Это фундаментальное основание для изучения разнообразных аспектов колебательных систем и их применения в научных и технических областях.

## **2.2. Влияние композитной природы трубобетона на его демпфирующие свойства**

В современном строительстве и машиностроении колебания являются неизбежным явлением, которое может возникать под воздействием различных факторов, таких как внешние нагрузки, атмосферные условия, изменения температуры и другие внешние воздействия. Эти колебания могут оказывать негативное влияние на работу конструкций и механических систем, проявляясь в виде ухудшения их производительности, риска разрушения или сокращения срока

службы. В связи с этим ученые и инженеры стремятся разработать эффективные методы их подавления и контроля.

Один из способов сокращения колебаний заключается в применении демпфирующих материалов, которые преобразуют кинетическую энергию колебаний в другие формы энергии, такие как тепловая энергия. Турбобетон является одним из таких материалов, обладающих способностью гасить колебания и вибрации за счет своих уникальных свойств.

Трубобетон представляет собой композитный материал, объединяющий характеристики бетона и стали, что делает его востребованным для создания конструкций с высокой устойчивостью к вибрациям.

Бетон обладает значительной прочностью, стойкостью к огню и долговечностью, что делает его превосходным материалом для строительства. Бетон также известен своей способностью к демпфированию колебаний. Однако его значительная масса может вызывать дополнительные затраты на транспортировку и усложнять строительные процессы. Кроме того, бетон склонен к образованию трещин, что сокращает срок его службы и требует регулярного технического обслуживания.

При сравнении с бетоном, сталь обладает большей прочностью и легкостью при меньшей площади сечения. Кроме того, стальные конструкции обычно не подвержены образованию трещин. Однако, как и любой материал, сталь имеет свои недостатки, включая подверженность коррозии, высокую теплопроводность и ограниченную способность к демпфированию колебаний.

В трубобетонных конструкциях бетон и сталь используются в сочетании, что позволяет компенсировать их недостатки и обеспечивает оптимальные характеристики всей конструкции.

Трубобетон представляет собой комплексную систему, включающую оболочку из металлической трубы, заполненную бетоном и образующую внутреннее ядро. [234-239]. В такой комбинированной конструкции максимально используются уникальные свойства обоих материалов, что приводит к существенной экономии стали и бетона, а также уменьшению массы и объема всей конструкции, что в свою очередь снижает общие затраты на строительство.

Труба-оболочка, выполняющая функции как продольного, так и поперечного армирования, способна эффективно передавать усилия во всех направлениях и под разными углами [240]. Бетон, находящийся в изоляции, имеет тенденцию увеличивать свои размеры в радиальном направлении из-за коэффициента Пуассона. Тем не менее, боковое давление, создаваемое трубой, препятствует образованию микротрещин разрыва в бетоне, что способствует увеличению несущей способности всего массива. Прочность бетона при сжатии может увеличиться примерно на 50-80% [235,241], что объясняется его трехосным напряженным состоянием [237]. В то же время стальная труба остается защищенной от потери как местной, так и общей устойчивости [235,A10,A14] (рис. 2.2).

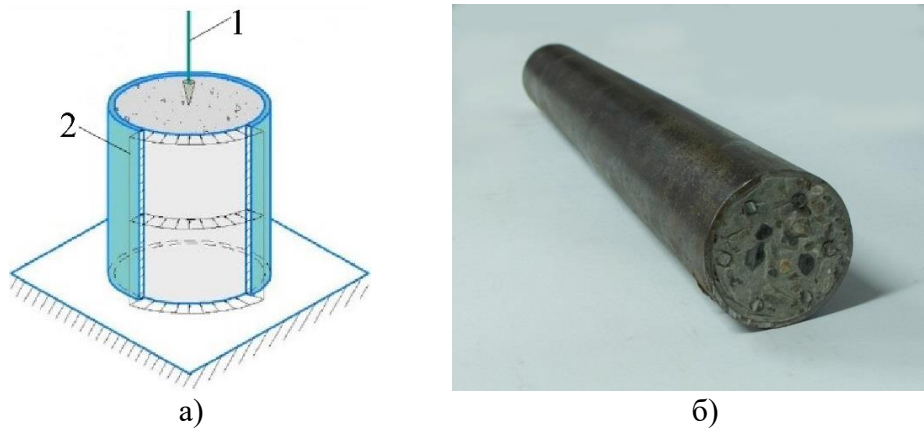


Рисунок 2.2 - а) Схема трехосного сжатия в трубобетонном образце: 1 – внешняя нагрузка; 2 – давление трубы на сердечник; б) Трубобетонный образец для проведения испытаний

Исследованию работы трубобетонных конструкций, их деформации и процессов потери устойчивости посвящено значительное количество работ как отечественных [234-236,238,240-242], так и зарубежных [243-249, A4] исследователей.

### 2.3. Теоретические основы свободных колебаний трубобетонных стержней

Свободные колебания трубобетонных стержней представляют собой важный аспект в исследовании и проектировании инженерных конструкций. Эти колебания возникают в стержнях под воздействием внешних сил или возмущений и характеризуются основными собственными частотами и формами колебаний. Понимание свободных колебаний трубобетонных стержней играет ключевую роль в оценке их динамической устойчивости, поведения при различных нагрузках и прогнозировании возможных режимов разрушения или деформаций. Это имеет важное значение для обеспечения безопасности и долговечности инженерных сооружений, где используются трубобетонные элементы.

Свободные колебания в трубобетонном стержне могут возникать в результате однократного удара по стержню. После воздействия импульса колебания можно описать уравнением движения, отражающим закон затухающих колебаний:

$$x = A \cdot e^{-\varepsilon t} \cdot \cos(\omega t), \quad (2.8)$$

где  $A$  – начальная амплитуда колебаний, м;

$\varepsilon$  – коэффициент затухания,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\omega$  – круговая частота, рад/с;

$t$  – время, с.

График движения затухающих колебаний показан на рисунке 2.3.

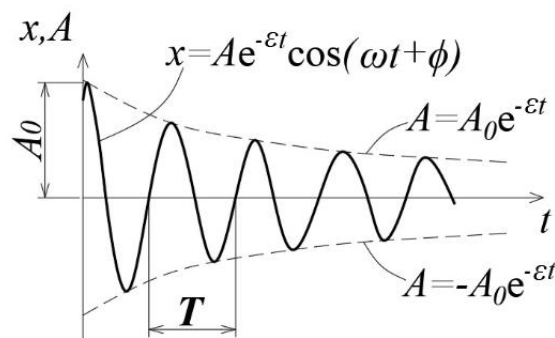


Рисунок 2.3 - График свободных затухающих колебаний

$\varepsilon = const$  – коэффициент затухания;  $A = A_0e^{-\varepsilon t}$  – амплитуда затухающих колебаний;  $A_0$  – начальная амплитуда;  $T$  – период затухающих колебаний

Логарифмический декремент колебаний  $\varepsilon$  в уравнении (2.8) можно вычислить как среднее из нескольких логарифмических декрементов колебаний:

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{0,2}{T} \ln \frac{x_j}{x_{j+5}} \right)_i, \quad (2.9)$$

где  $x_j$  – текущее пиковое значение перемещения, м;

$x_{j+5}$  – пятое по счету пиковое значение перемещения, отсчитываемое от  $x_j$ , м;

$n$  – количество пиковых значений перемещений, взятых для определения коэффициента затухания;

$T$  – период, с.

При вычислении коэффициента затухания для нивелирования локальных погрешностей рекомендуется учитывать отношение колебаний, измеренных в нескольких фазах относительно друг друга. Таким образом, если амплитуды измерены с интервалом в пять периодов, то в формуле (2.9) следует использовать коэффициент, равный 0,2.

При наличии значения декремента колебаний возможно вычислить коэффициент неупругой работы материала, который оказывает существенное влияние на поведение системы в околорезонансных зонах:

$$\gamma = \frac{2\varepsilon}{\omega} = \frac{\varepsilon T}{\pi}, \quad (2.10)$$

Данный коэффициент является константой материала и не должен зависеть от внутреннего напряжения в системе (рис. 2.4).

Имея значения коэффициента неупругой работы, можно определить динамический коэффициент гармонической нагрузки, показывающий во сколько раз ее динамическое действие превышает статическое действие ее амплитуды:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \gamma^2 \lambda^2}}, \quad (2.11)$$

где  $\lambda = \frac{\theta}{\omega}$  – отношение круговой частоты нагрузки и собственной круговой частоты.

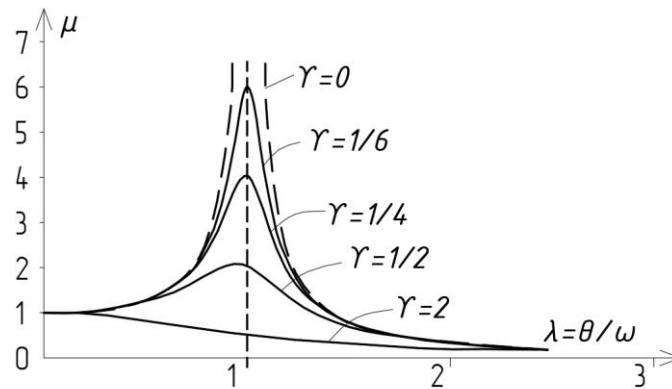


Рисунок 2.4 - График зависимости коэффициента неупругой работы материала.

### 2.3.1. Методика определения динамических характеристик материала при свободных колебаниях

Для проведения сложных расчетов напряженно-деформированного состояния и прочности конструкций, подвергаемых сильным динамическим воздействиям, часто используют различные программно-вычислительные комплексы, такие как *ANSYS*, *ABAQUS*, *LS-DYNA* и другие. Точность и достоверность результатов этих вычислений зависят от критериев разрушения материалов и конструкций, а также от материальных функций, которые отражают реальное поведение исследуемых объектов при учете различных факторов, таких как скорость деформации и деформационное упрочнение. При условии открытия и получения новых материалов и сплавов, свойства которых плохо изучены, для получения достоверных результатов необходимо расширение базы данных программно-вычислительных комплексов. Это требует проведения реальных натурных экспериментов и внесения их результатов в базу данных. Все это

подчеркивает важность разработки новых экспериментальных методов для сбора необходимых параметров и актуальность исследований, представленных в данном исследовании.

Все известные ныне способы определения прочностных и деформационных свойств материалов, такие как метод копровых испытаний на растяжение или сжатие, кулачковый пластометр, методы Кольского и Тейлора являются сложно реализуемыми. В то время как в некоторых случаях инженеру необходимо определить значение конкретной характеристики материала, например, его динамического модуля упругости, без использования дорогостоящего оборудования и проведения испытаний в специализированных лабораториях.

Для определения динамических параметров материалов, таких как динамический модуль упругости и коэффициент затухания, в условиях свободных колебаний предлагается использовать упрощенный метод, основанный на возбуждении поперечных колебаний шарнирно опертой балки ударным импульсом и регистрации ее отклика с помощью акселерометра [A5,A19], подробно описанный в работах [A11,A20] и в диссертации [250]. Динамический модуль упругости ( $E_d$ ), определяемый по данной методике, учитывает влияние скорости нагружения и отличается от статического. Он рассчитывается через круговую частоту собственных колебаний системы ( $\omega$ ) по формуле:

$$E_d = \frac{\omega^2 \cdot m_l \cdot l^4}{\pi^4 \cdot J} \quad (2.12)$$

где  $m_l$  – погонная масса, т/м;

$l$  – пролет балки, м

$J$  – момент инерции, м<sup>4</sup>.

### **2.3.2. Экспериментальная методика определения предварительно сжимающих напряжений на собственные колебания трубобетонных стержней**

При поперечных динамических воздействиях, вызывающих вибрации, в конструкциях возникают гармонические колебания. Частота свободных колебаний, являющаяся ключевым параметром динамического отклика, существенно зависит от продольной силы, действующей на конструкцию. Наличие продольной силы вызывает изменения в напряжениях, деформациях и поведении конструкций под действием динамических нагрузок. Сила сжатия оказывает влияние на динамическую устойчивость, динамическую амортизацию и распространение ударных волн в конструкции.

Понимание влияния продольной силы на динамические отклики трубобетонных конструкций является важным аспектом проектирования и эксплуатации сооружений, машин, технических устройств и других объектов, в которых в качестве элементов используют композитный материал.

Хотя существует множество работ, посвященных изучению сопротивления динамическим воздействиям, основное внимание в них уделяется железобетонным и стальным конструкциям [251-258]. Одновременно, исследования, посвященные сталебетонным элементам, оставляют много вопросов открытыми [259, 260].

В настоящем исследовании методика, описанная в параграфе выше, применена для изучения влияния продольной сжимающей силы на динамические характеристики трубобетонных стержней [А1,А18].

Для определения динамических параметров трубобетонных стержней при воздействии однократного импульса была проведена серия экспериментов с использованием установки, представленной на рисунке 2.5.

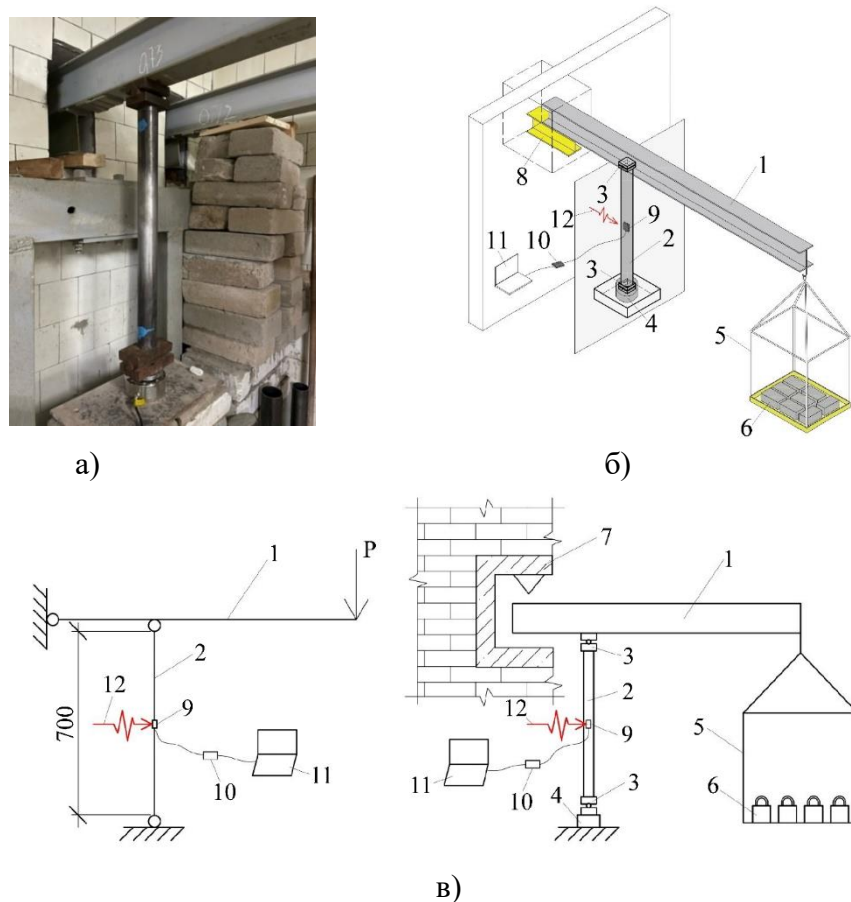


Рисунок 2.5 - Испытания центрально сжатых образцов на определение собственных колебаний:  
 а) общий вид; б) аксонометрическая схема экспериментальной установки; в) плоская схема и расчетная модель: 1 – загружающий рычаг; 2 – испытуемый образец; 3 – цилиндрический опорный шарнир; 4 – силомер; 5 – корзина; 6 – гири; 7 – усиленный ж/б пояс; 8 – страховочная конструкция; 9 – блок акселерометра; 10 – модуль обработки сигнала акселерометра; 11 – ноутбук для регистрации осциллограмм и результатов измерений вибрации; 12 - импульсное воздействие с помощью ударника

В используемой установке образец 2 шарнирно закреплялся с двух концов. Нагрузка на образец подавалась с помощью загружающего рычага, представляющего собой двутавровую балку 1, шарнирно закрепленную в углублении стены через специальную железобетонную опорную конструкцию. К свободному концу балки подвешивалась корзина 5. Испытания проводились при различных значениях продольных сжимающих сил (табл. 2.1). Нагрузка на образец создавалась путем укладки гирь  $b$  в корзину. Измерение динамических параметров образца проводилось с шагом 200 кг.

Таблица 2.1 - Значение сжимающей силы на образец

| Сжимающая нагрузка, кг  | Фактическая продольная сила на образце $N_{\text{факт.}}$ , кН |
|---|--|
| 200   | 6,8  |
| 400   | 12,8   |
| 600   | 18,7   |
| 800   | 24,6   |
| 1000  | 30,6   |
| 1200  | 36,5   |
| Примечание: фактическая нагрузка определена с учетом собственного веса корзины и загружающего рычага. |  |

Испытуемый трубобетонный образец состоит из ядра, изготовленного из бетона марки В12,5, и обоймы, представляющей собой стальную прямошовную электросварную трубу 09Г2С. Общая длина образца составляет 700 мм, а диаметр равен 76 мм.

На протяжении испытаний суммарная нагрузка, регистрируемая тензодатчиком 4, установленным под образцом, не превышала его несущей способности, определенной при статических испытаниях [А2].

На каждом этапе загрузки возбуждение поперечных колебаний образца проводилось с помощью пружинного ударника 12. После удара акселерометр 9, датчик которого закреплен на середине образца, фиксировал проекции кажущегося ускорения. В данном исследовании применялся трехосный акселерометр ТБА, масса которого составляла около 50 г, что не оказало влияния на чистоту эксперимента.

На рисунке 2.6 приведены осциллограммы затухающих колебаний, полученные в ходе испытаний.

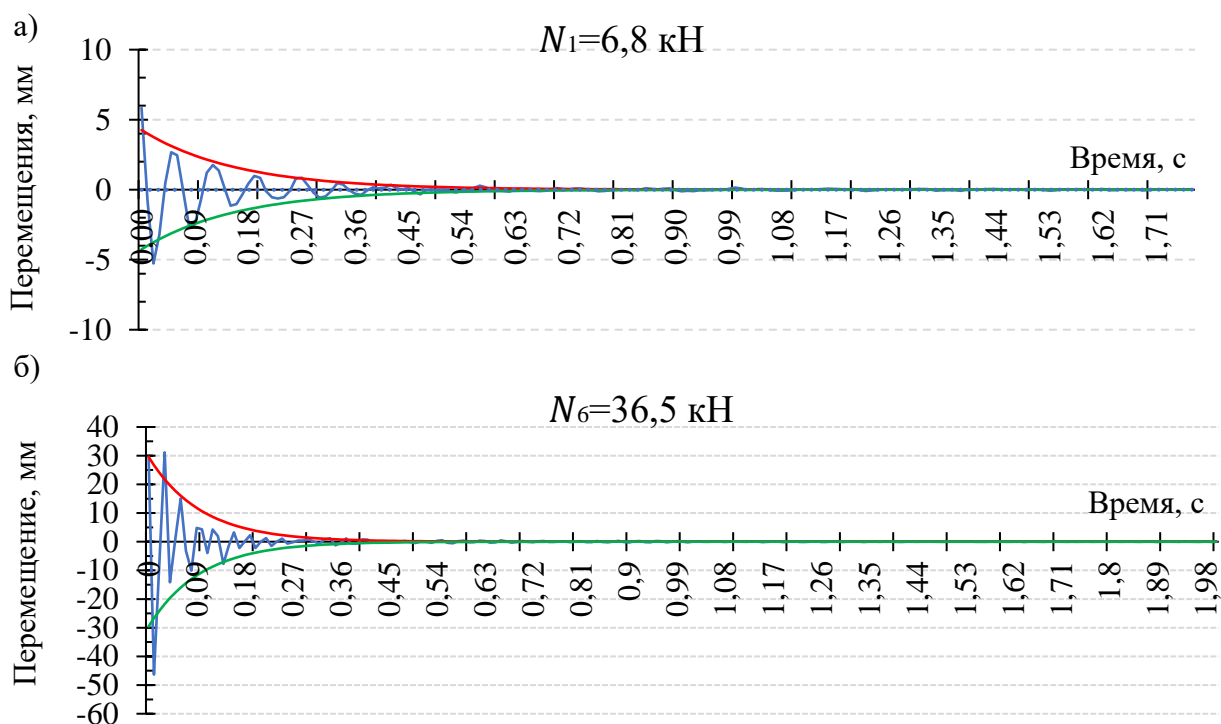


Рисунок 2.6 - График перемещений образца при ударе, нагруженного: а) сжимающей силой  $N_1=6,8 \text{ кН}$ ; б) сжимающей силой  $N_6=36,5 \text{ кН}$ ;

На рисунке 2.7 представлен график зависимости частоты свободных колебаний от осевой нагрузки.

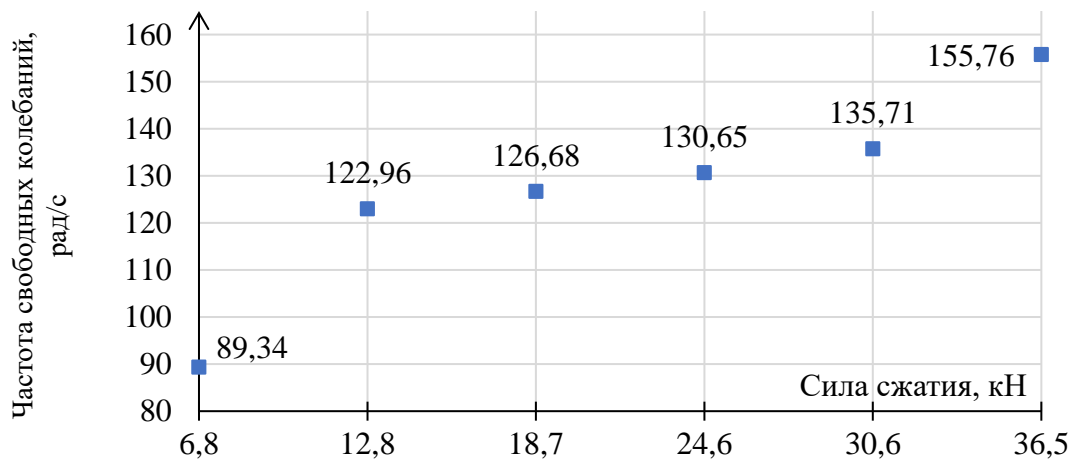


Рисунок 2.7 - График зависимости частоты свободных колебаний от осевой нагрузки

По результатам, представленным на рисунке 2.7 видно, что увеличение продольной силы приводит к увеличению собственной частоты, и, как следствие, к увеличению упругих свойств системы. А значит подобно определению динамического модуля упругости, формулу 2.12, при известной в ходе эксперимента собственной частоте колебаний, можно использовать для определения приведенного коэффициента  $E_N$ , который будет учитывать изменение упругих свойств в системе, вызванное действием продольной силой сжатия:

$$E_N = \frac{\omega^2 \cdot m_l \cdot l^4}{\pi^4 \cdot J} \quad (2.13)$$

При этом исключив действие продольной силы на испытываемый образец, приведенный коэффициент может являться величиной, подобной усредненному динамическому модулю упругости  $E_d$ , отражающей упругие свойства материала, что подтверждается результатами, полученными в [250, А11].

При распределенной массе образца  $m_l = 0,01$  т/м и моменте инерции  $J = \frac{\pi D^4}{64} = 6,36 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$ , были получены следующие значения приведенного коэффициента  $E_N$  (рис. 2.8).

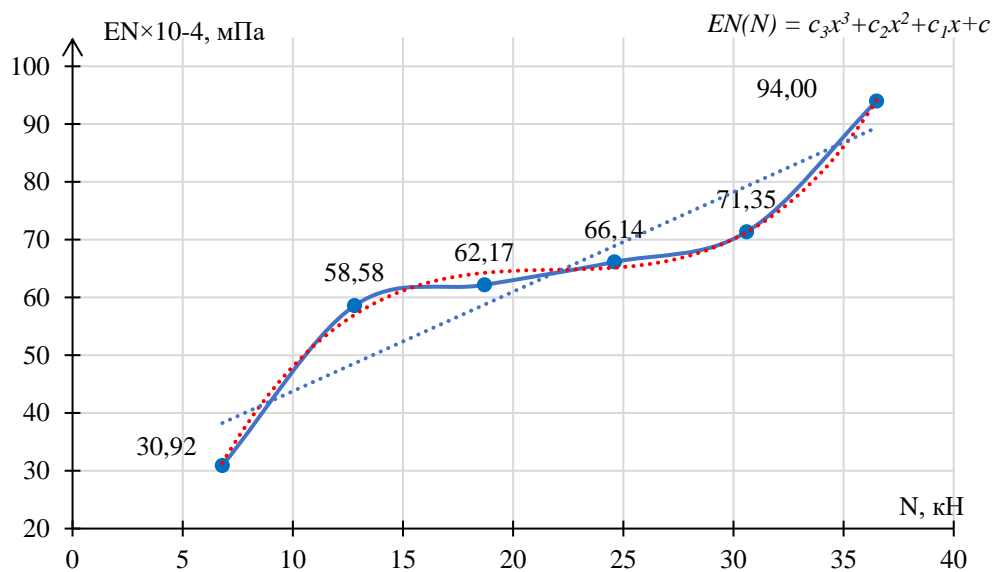


Рисунок 2.8 - График приведенного коэффициента в зависимости от осевой нагрузки с аппроксимирующей монотонной функцией  $E_N(N)$

Воспользовавшись формулами (2.10) и (2.11) получены следующие значения декремента колебаний и коэффициента неупругой работы для наименьшей и наибольшей осевой сжимающей силы при однократном ударе по образцу (табл. 2.2).

Таблица 2.2 - Показатели динамических характеристик трубобетонного образца

| Сжимающая сила, ед. изм.               | $N_1=6,8$ кН | $N_6=36,5$ кН |
|--|--------------|---------------|
| Декремент колебаний, $\varepsilon$     | 6,20         | 10,10         |
| Коэффициент неупругой работы, $\gamma$ | 0,139        | 0,129         |

Из полученных характеристик видно, что вычисленный коэффициент затухания колебаний  $\varepsilon$  нелинейно возрастает при увеличении продольной сжимающей силы. Так, при изменении силы от 6,8 до 36,5 кН (рост в 5,37 раза) коэффициент затухания увеличивается на 63%. Разница между коэффициентами неупругой работы для двух значений сжимающей силы составляет не более 7,5%, превышая аналогичные значения для железобетона ( $\gamma_{жб} = 0,1$ ) на 30-

40% и значительно (в 4–5 раз) превышает показатель для стали, при  $\gamma_c = 0,025$  (рис. 2.9). Такие значения коэффициентов приводят к более пологой форме резонансных кривых для исследуемого материала [A2].

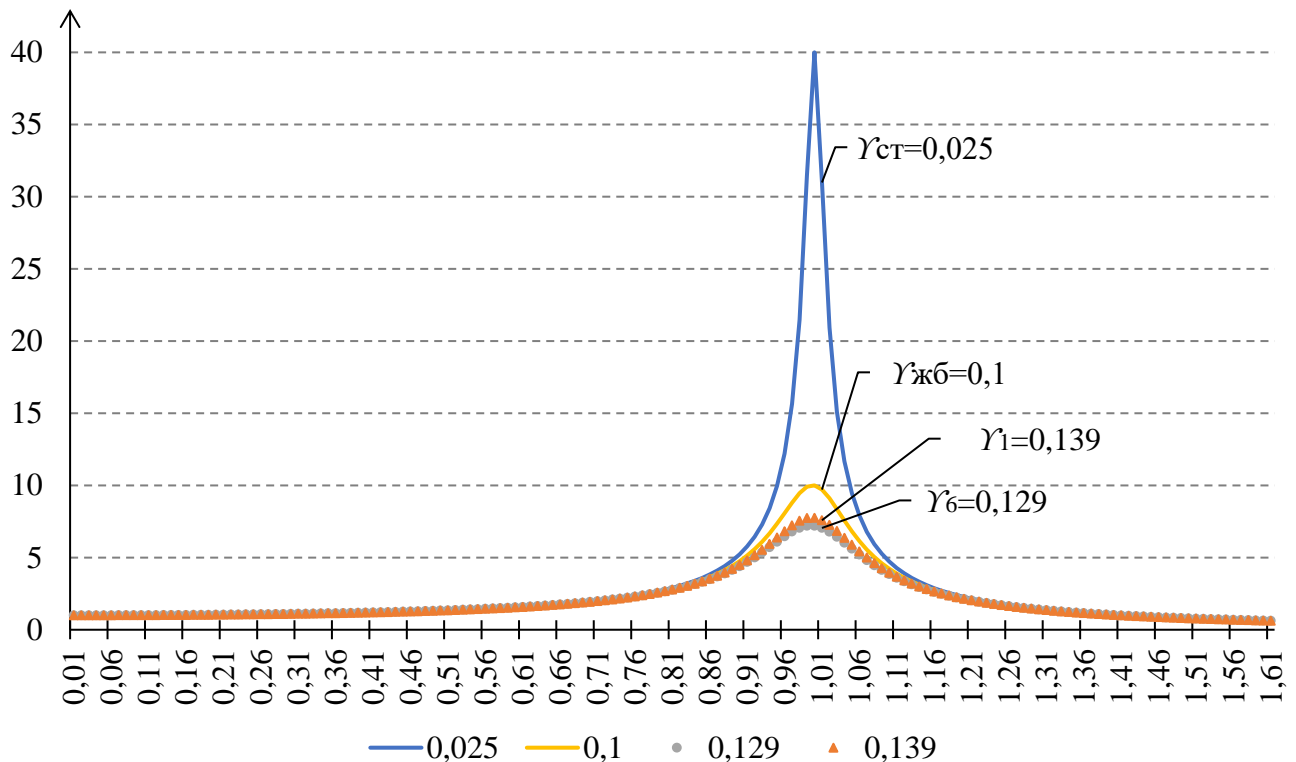


Рисунок 2.9 - График резонансных кривых различных материалов:  $\gamma_{жб}$  – коэффициент неупругой работы железобетона,  $\gamma_c$  - коэффициент неупругой работы стали,  $\gamma_1, \gamma_6$  - коэффициент неупругой работы трубобетона.

#### 2.4. Методика исследования демпфирующих свойств трубобетона при вынужденных колебаниях в различных частотных диапазонах

В процессе эксплуатации трубобетонные элементы конструкций и систем могут подвергаться воздействию различных внешних факторов, таких как землетрясения, динамические нагрузки, атмосферные воздействия и т.д. Эти внешние воздействия могут вызывать вынужденные колебания в трубобетоне, что может привести к серьезным последствиям, включая разрушение конструкций и угрозу жизни и здоровью людей.

Исследование вынужденных колебаний трубобетонных стержней является важным для гарантирования безопасности инженерных конструкций и разработки эффективных методов защиты от динамических нагрузок. Поэтому анализ колебаний, обусловленных динамическими возмущениями, всегда привлекал особое внимание исследователей.

Несмотря на значительные исследования в данной сфере, все еще остаются нерешенные вопросы, которые требуют дальнейшего изучения и более глубокого анализа.

В данном параграфе рассматриваются вынужденных колебаний трубобетонных стержней с акцентом на их динамическом поведении при действии гармонической нагрузки различной мощности с учетом поэтапно увеличивающейся продольной сжимающей силы [А8].

Для оценки влияния продольной силы на демпфирующие свойства трубобетона при воздействии на образец многократных импульсов разной мощности использовалась установка, схема которой представлена на рисунке 2.10.

В данной установке сжимающая нагрузка на образец 2 подавалась поэтапно путем прибавления количества гирь 6, укладываемых на корзину 5, подвешенную к концу двутавровой балки 1. На образец оказывалось поперечное воздействие с помощью электродвигателя с эксцентричным диском 4 с различной мощностью (80, 100, 120 Вт). После возмущения колебаний акселерометр 9, датчик которого прикреплен к середине стержня, регистрировал проекции кажущегося ускорения. В данном исследовании использовался трехосный акселерометр ТБА с массой около 50 г, что не оказало влияния на чистоту эксперимента.

а)



б)

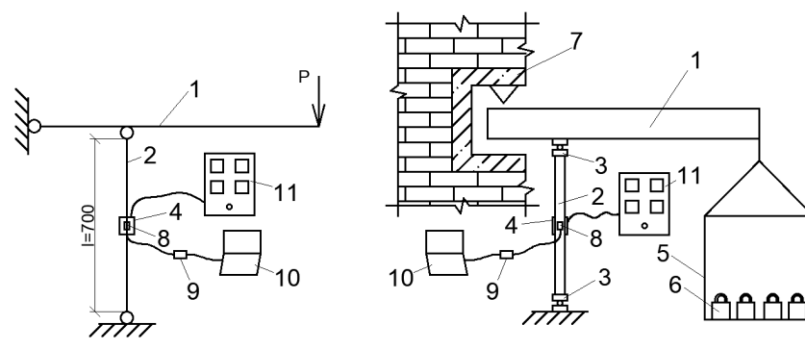


Рисунок 2.10 - Испытания сжатых образцов на определение собственных колебаний при изменении величины продольной силы: а) общий вид установки; б) плоская схема и расчетная модель: 1 – загружающий рычаг; 2 – испытуемый образец; 3 – цилиндрический опорный шарнир; 4 – электродвигатель с эксцентричным диском; 5 – корзина; 6 – гири; 7 – усиленный ж/б пояс; 8 – блок акселерометра; 9 – модуль обработки сигнала акселерометра; 10 – ноутбук для регистрации осциллограмм и результатов измерений вибрации; 11 – распределительный щит с вольтметром.

В качестве испытуемых образцов были использованы трубобетонные стержни длиной 700 мм и диаметрами 60, 76 и 102 мм. Сердечники образцов были изготовлены из бетона марки В17,5, а обойма представляла собой стальную прямошовную электросварную трубу из стали 09Г2С с толщиной стенки 2 мм.

В соответствии с программой эксперимента сжимающая нагрузка, приложенная к образцу, изменялась в диапазоне от 0 до 1000 кг. Измерения начинались с продольной силы равной собственному весу корзинки 5, в каждом последующем измерении масса корзинки увеличивалась на 200 кг, что соответствует одному ряду гирь (табл. 2.3).

Таблица 2.3 - Значение сжимающей сила на образец

| Сжимающая нагрузка, кг  | Фактическая продольная сила на образце $N_{\text{факт.}}$ , кН |
|---|--|
| собственный вес корзинки с рычагом (около 17 кг)  | 1,3  |
| 200   | 6,8  |
| 400   | 12,8   |
| 600   | 18,7   |
| 800   | 24,6   |
| 1000  | 30,6   |
| Примечание: фактическая нагрузка определена с учетом собственного веса корзины и загружающего рычага. |  |

Под действием поперечной внешней силы  $F_0 \cos \omega t$  образец начинает испытывать вынужденные колебания. При этом смещение колеблющейся точки после возбуждения описывается уравнением:

$$x = A \cdot \cos(\omega t + \beta), \quad (2.14)$$

где  $A$  — начальная амплитуда колебаний, м;

$\omega$  — круговая частота, рад/с;

$t$  — время, с;

$\beta$  — сдвиг фазы колебаний.

В данном случае амплитуда колебаний вычисляется по формуле:

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \alpha^2 \omega^2}}, \quad (2.15)$$

где  $\omega_0$  — собственная круговая частота колебаний, рад/с;

$\alpha$  — коэффициент сопротивления среды.

Сдвиг фазы колебаний удовлетворяет уравнению:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\alpha \omega}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (2.16)$$

где  $m$  — масса тела, кг.

Из формулы (2.15) следует, что амплитуда колебаний  $A$  зависит от частоты колебаний  $\omega$  следующим образом: при значениях  $\omega < \omega_0$  амплитуда увеличивается при увеличении  $\omega$ , при  $\omega = \omega_0$  достигает максимума и далее уменьшается. Острота резонанса будет тем более выраженной, чем меньше коэффициент сопротивления среды  $\alpha$ . При малом значении коэффициента трения резонанс разрушает систему: при  $\alpha = 0$  амплитуда колебаний на резонансной частоте стремится к бесконечности.

### Трубобетонный образец с диаметром 60 мм

Результаты исследования влияния мощности возмущающего колебания воздействия на частоту колебаний трубобетонного образца с диаметром 60 мм представлены на рисунке 2.11

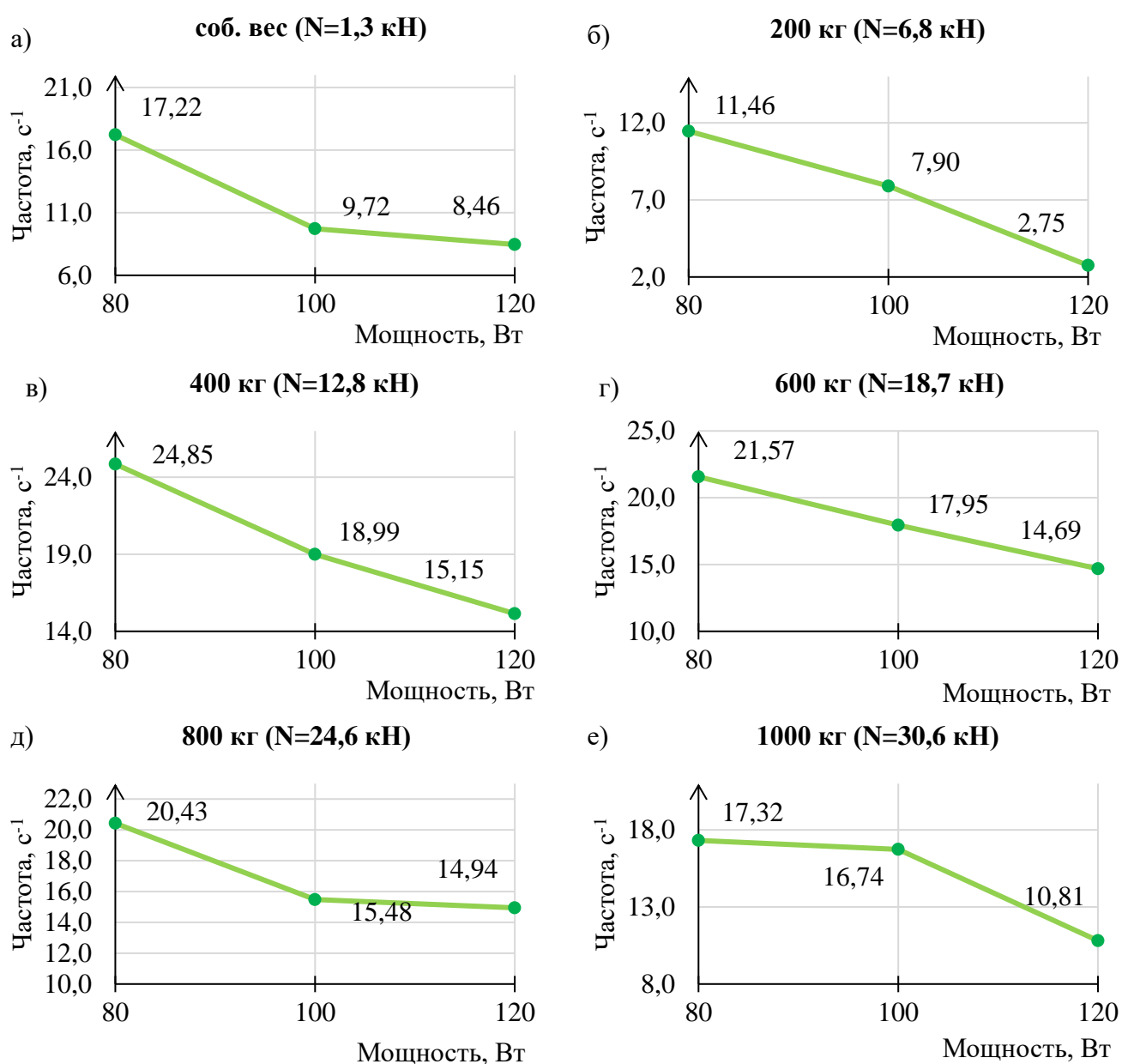


Рисунок 2.11 - Графики зависимости частоты колебаний образца диаметром 60 мм от мощности возмущающего воздействия

Как видно из рисунка 2.11, при разных значениях продольной сжимающей силы частота колебаний уменьшается с увеличением мощности возмущающего воздействия.

На рисунке 2.12 представлены графики зависимости частоты вынужденных колебаний от величины осевой сжимающей силы при различной мощности возмущающего воздействия.

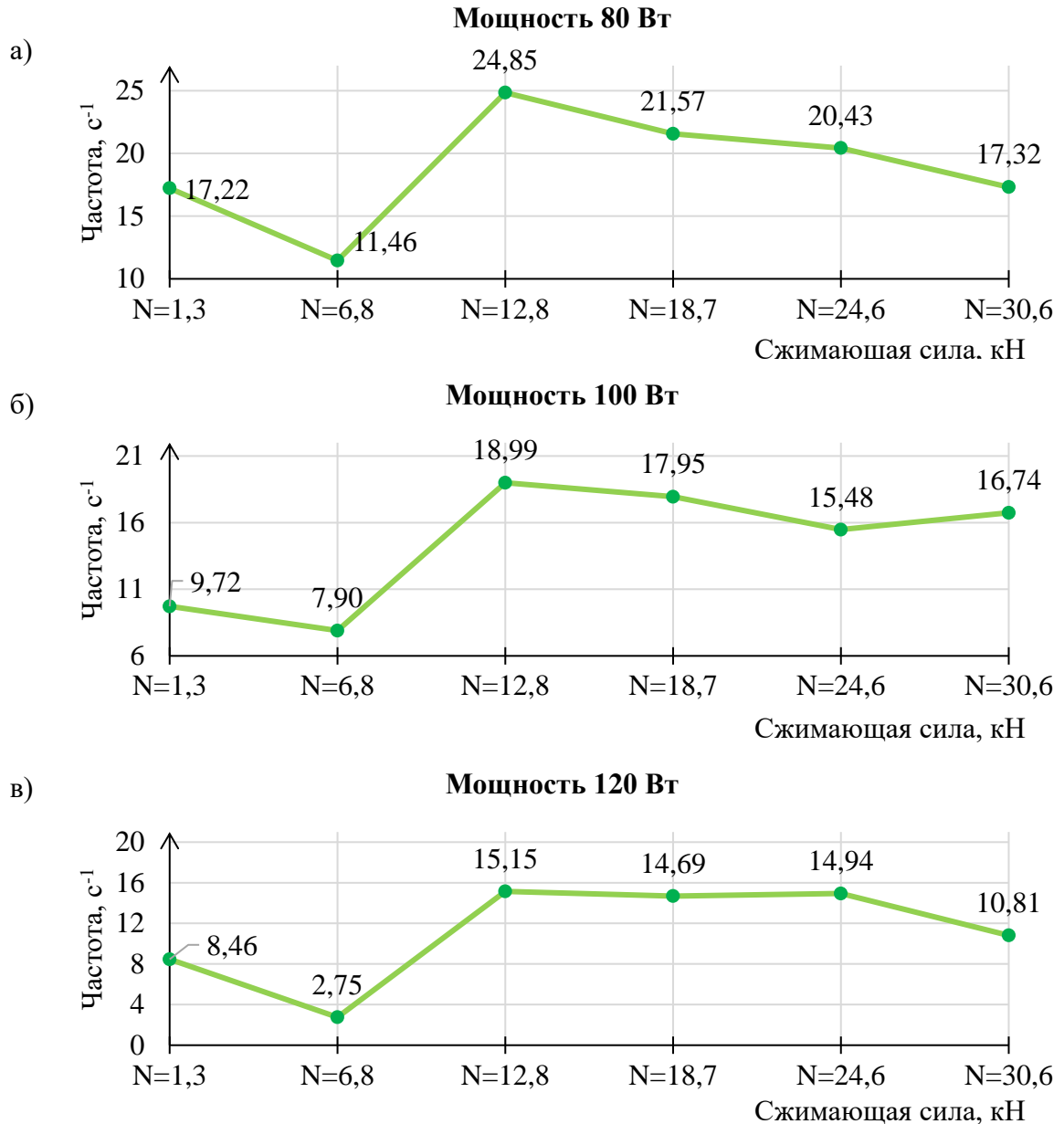


Рисунок 2.12 - Графики зависимости частоты колебаний образца диаметром 60 мм от величины сжимающей силы

Согласно рисунку 2.12 наибольшая частота колебаний достигается при сжимающей нагрузке равной  $N = 12,8$  кН. Это может свидетельствовать о возможном наступлении явления резонанса в исследуемой системе при таком уровне сжимающей продольной силы. Наименьшее значения частоты колебаний при трех исследуемых мощностях возмущающего воздействия достигается при продольной силе  $N = 6,8$  кН. После достижения пикового значения частоты

колебаний, дальнейшее увеличение силы сжатия приводит к незначительному снижению частоты колебаний образца, при этом график имеет пологий характер.

На рисунке 2.13 представлен общий график зависимости частоты колебаний от мощности возмущающего воздействия для всех значений сжимающей продольной силы.

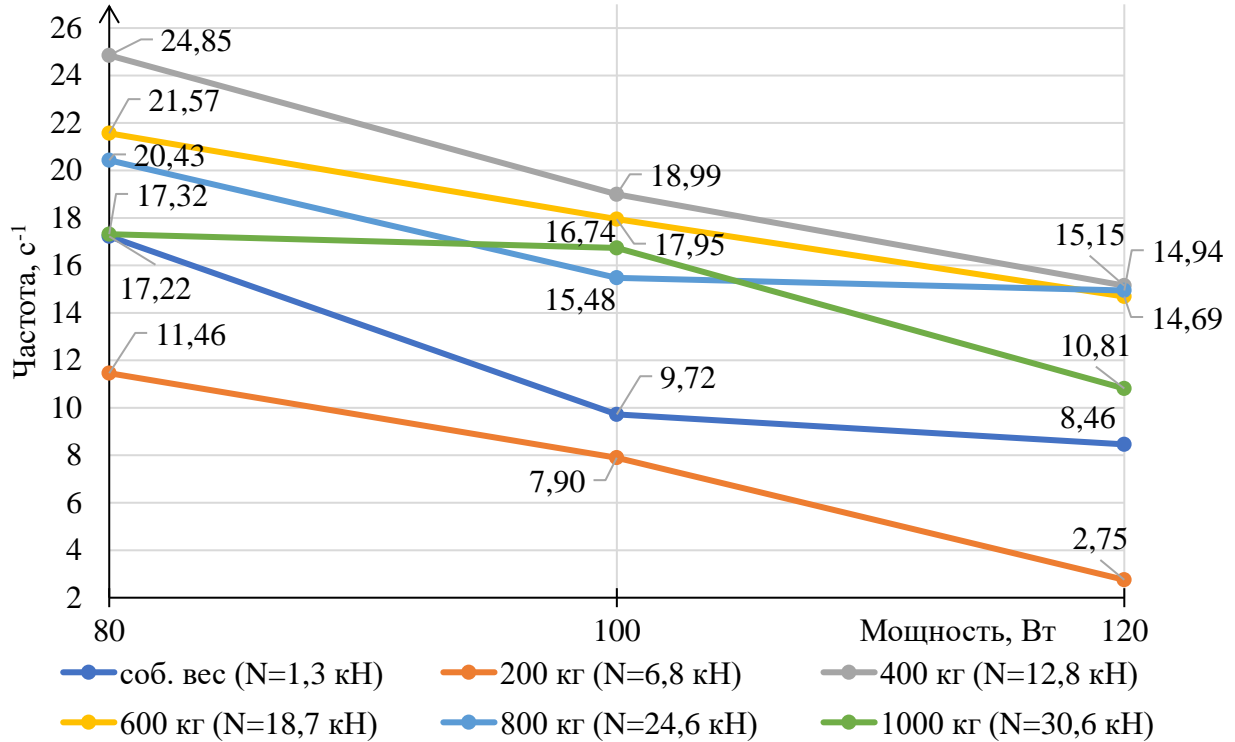


Рисунок 2.13 - Графики зависимости частоты колебаний образца диаметром 60 мм при различной осевой нагрузке от мощности возмущающего воздействия

### Трубобетонный образец с диаметром 76 мм

Результаты исследования влияния мощности возмущающего колебания воздействия на частоту колебаний трубобетонного образца с диаметром 76 мм представлены на рисунке 2.14.

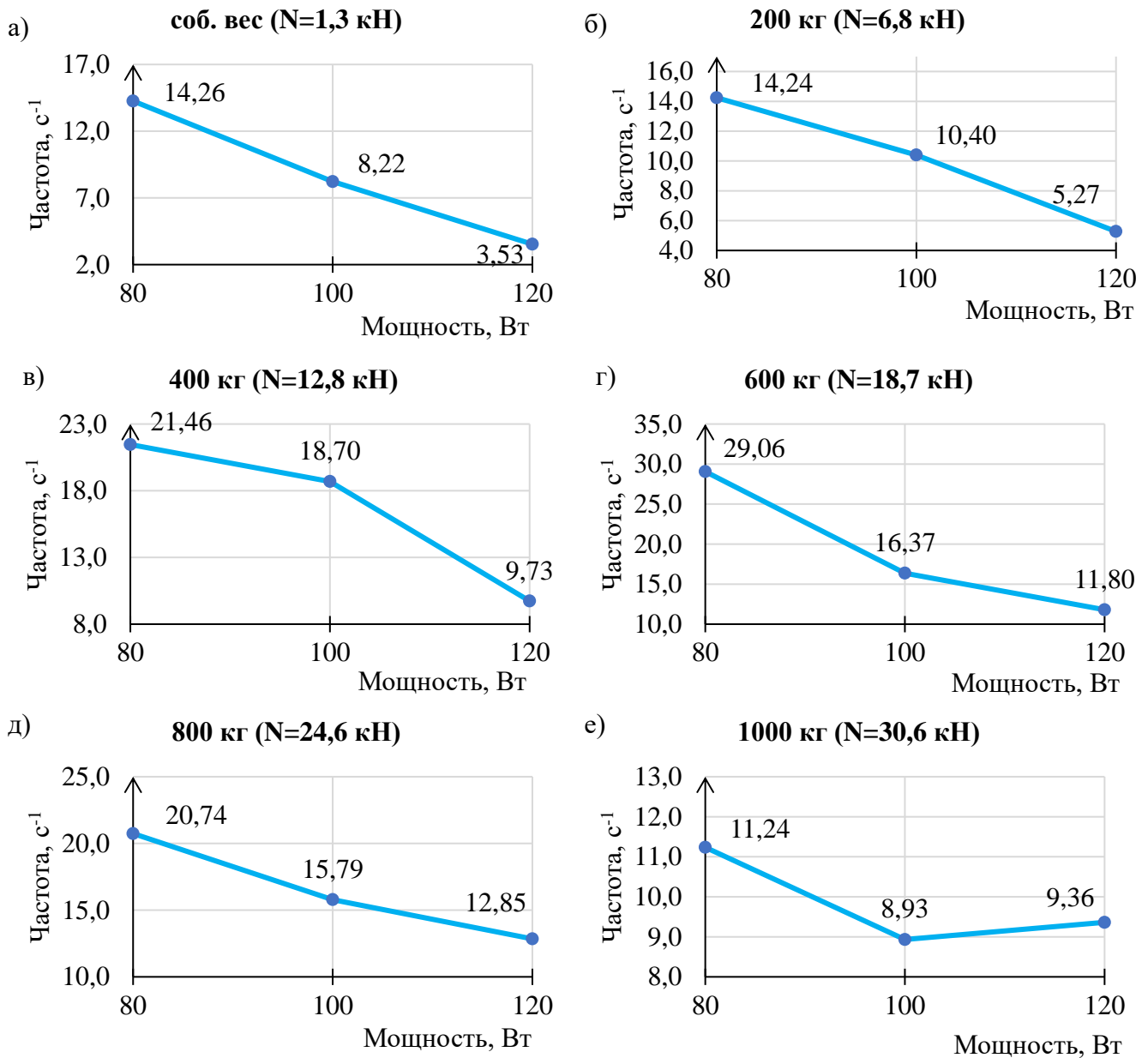


Рисунок 2.14 - Графики зависимости частоты колебаний образца диаметром 76 мм от мощности возмущающего воздействия

Как видно из рисунка 2.14, при разных значениях продольной сжимающей силы частота колебаний уменьшается с увеличением мощности возмущающего воздействия.

На рисунке 2.15 представлены графики зависимости частоты вынужденных колебаний от величины осевой сжимающей силы при различной мощности возмущающего воздействия.

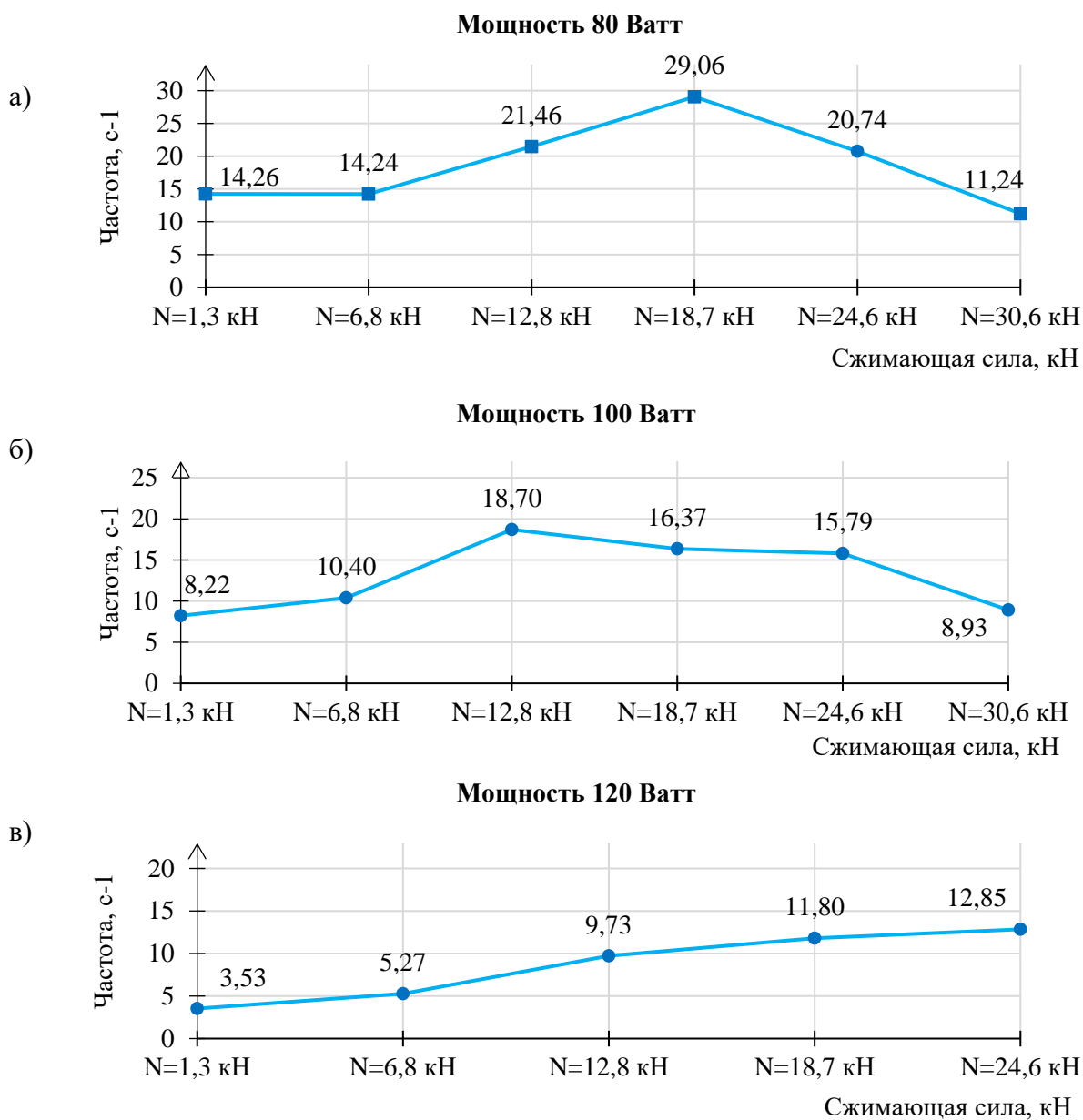


Рисунок 2.15 - Графики зависимости частоты колебаний образца диаметром 76 мм от величины сжимающей силы

Согласно представленным данным на рисунке 2.15 при мощности возмущающего воздействия 80 Вт максимальная частота колебаний образца достигается при осевой нагрузке  $N = 18,7$  кН. После достижения пикового значения частота колебаний уменьшается при увеличении величины осевой нагрузки. При мощности 100 Вт пиковое значение частоты достигается при продольной силе  $N = 12,8$  кН. При мощности возмущающего воздействия 120 Вт график частоты колебаний не имеет пика, линейно возрастая при увеличении сжимающей силы.

На рисунке 2.16 представлен общий график зависимости частоты колебаний от мощности возмущающего воздействия для всех значений сжимающей продольной силы. По графику видно, что колебания с наибольшей частотой возникают при сжимающей осевой нагрузке равной 12,8 – 18,7 кН.

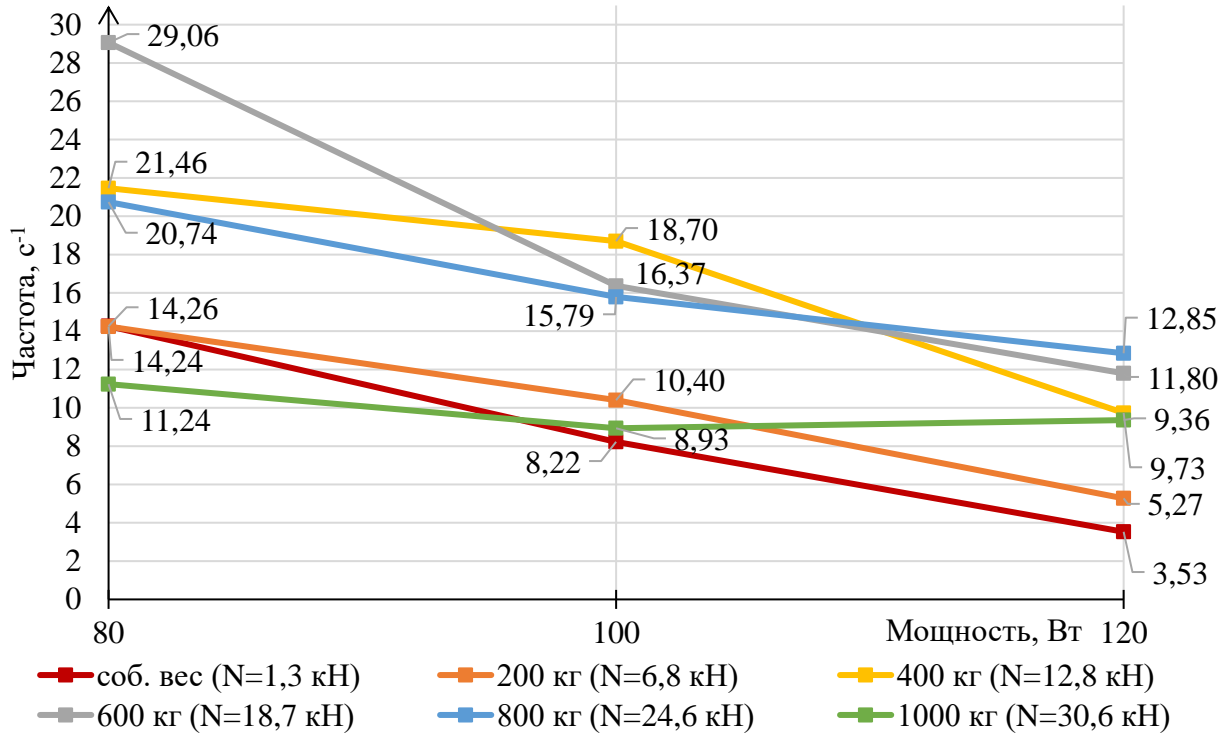
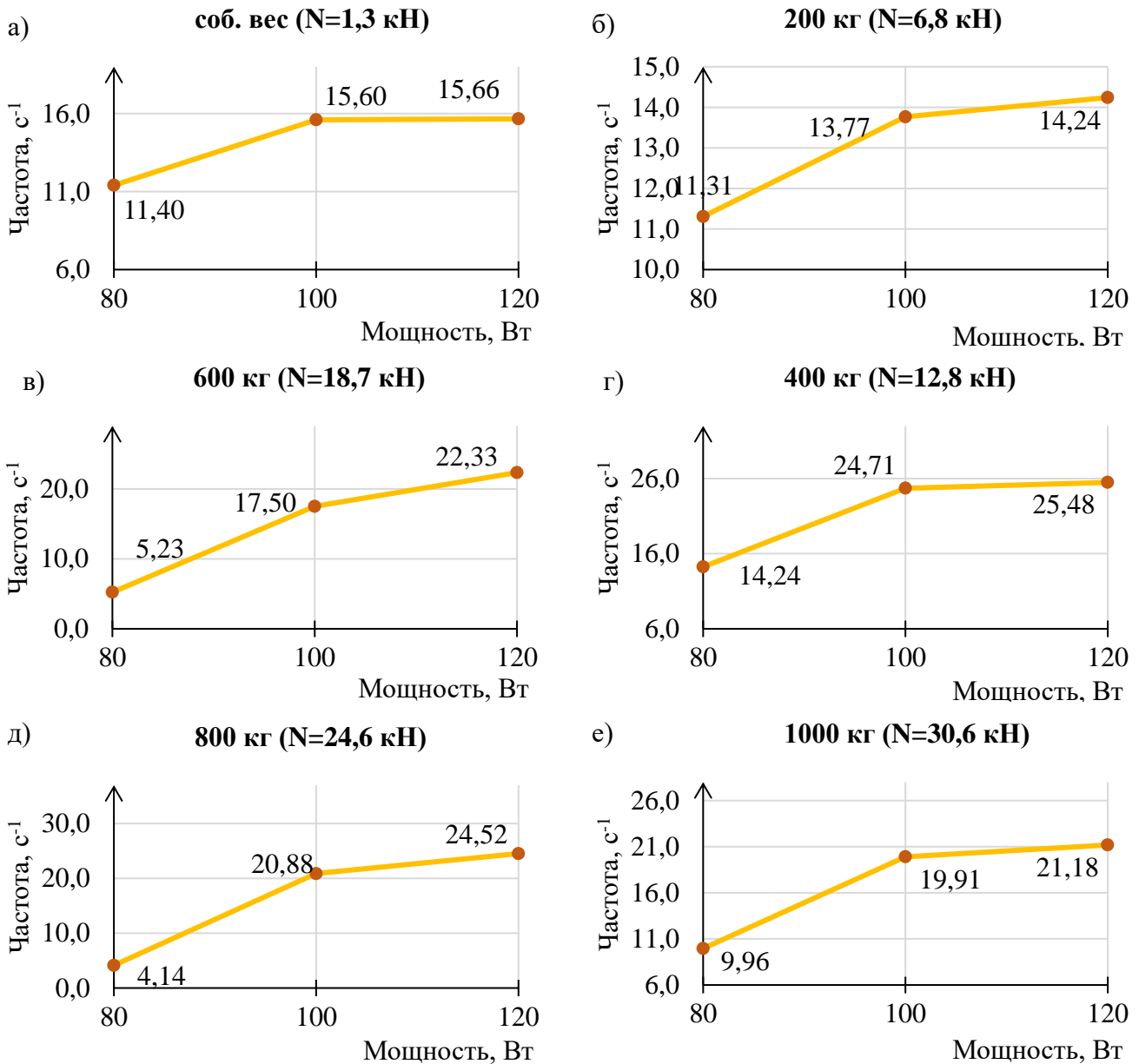


Рисунок 2.16 - Графики зависимости частоты колебаний образца диаметром 76 мм при различной осевой нагрузке от мощности возмущающего воздействия

### Трубобетонный образец с диаметром 120 мм

Результаты исследования влияния мощности возмущающего колебания воздействия на частоту колебаний трубобетонного образца с диаметром 76 мм представлены на рисунке 2.17.

Рисунок 2.17 - Графики зависимости частоты колебаний образца диаметром 120 мм от мощности возмущающего воздействия



Как видно из рисунка 2.17 при различных значениях продольной сжимающей силы частота колебаний возрастает при увеличении мощности возмущающего воздействия.

На рисунке 2.18 представлены графики зависимости частоты вынужденных колебаний от величины осевой сжимающей силы при различной мощности возмущающего воздействия.

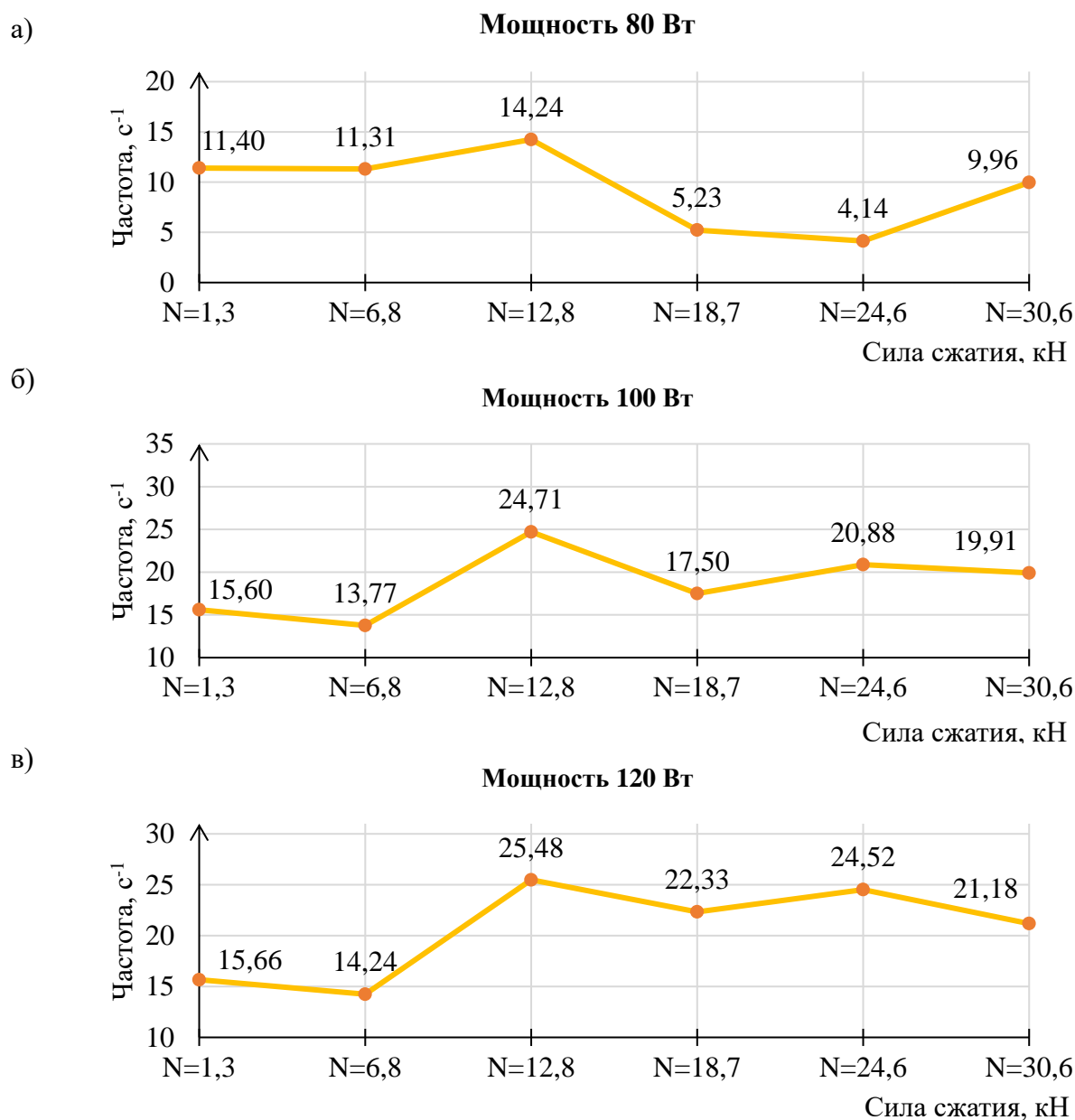


Рисунок 2.18 - Графики зависимости частоты колебаний образца диаметром 120 мм от величины сжимающей силы

Согласно представленным данным на рисунке 2.18 для образца диаметром 120 мм пиковая частота колебаний достигается при сжимающей силе  $N = 12,8$  кН. При увеличении силы сжатия колебания плавно уменьшаются. При этом значения частоты колебаний для случаев, когда мощность возбуждаемого воздействия равняется 100 и 120 Вт, практически идентичны.

На рисунке 2.19 представлен общий график зависимости частоты колебаний от мощности возмущающего воздействия для всех значений сжимающей продольной силы. По графику видно, что колебания с наибольшей частотой возникают при сжимающей осевой нагрузке равной 12,8 кН

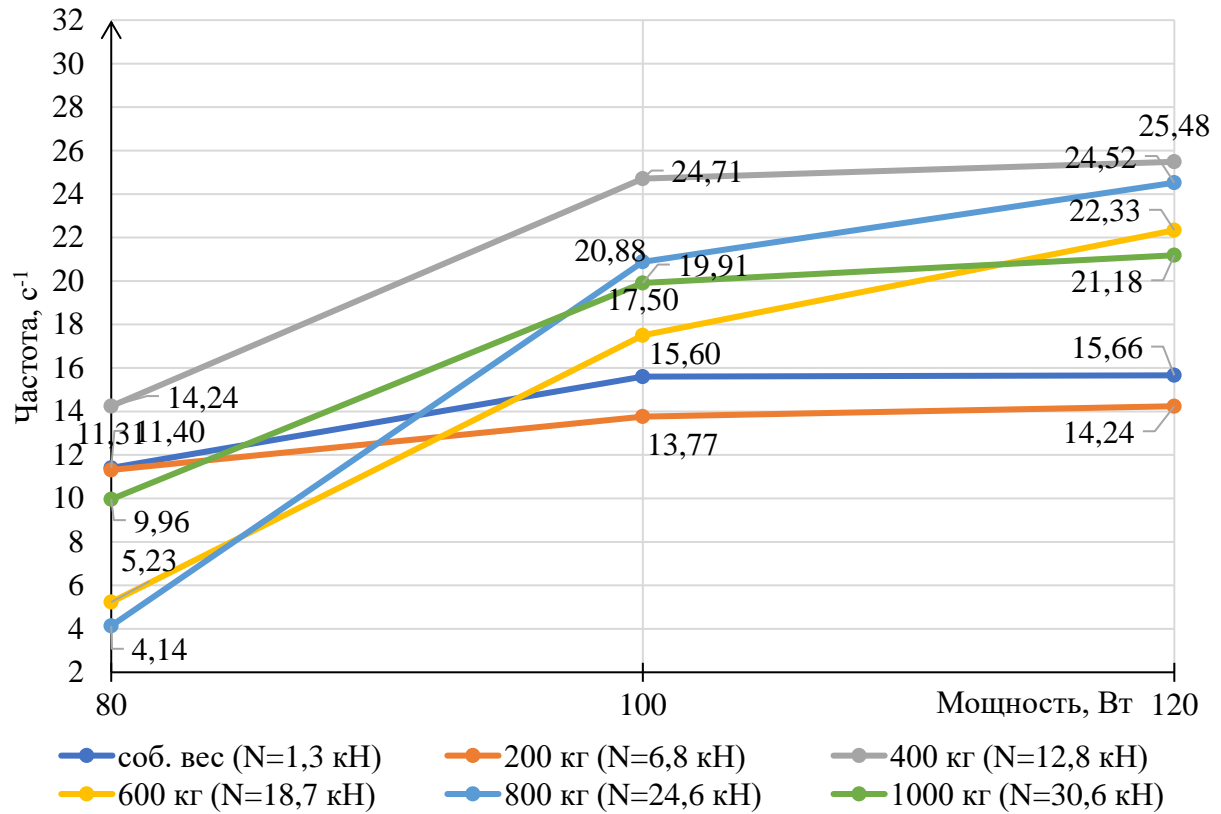


Рисунок 2.19 - Графики зависимости частоты колебаний образца диаметром 120 мм при различной осевой нагрузке от мощности возмущающего воздействия

### Сравнение результатов исследования для образцов разного диаметра

На рисунке 2.20 представлены графики зависимости колебаний образцов трех диаметров от мощности возмущающего воздействия при различных значениях осевой сжимающей силы.

На рисунке 2.21 приведены графики зависимости частоты вынужденных колебаний от величины осевой сжимающей силы при различной мощности возмущающего воздействия для образцов трех диаметров.

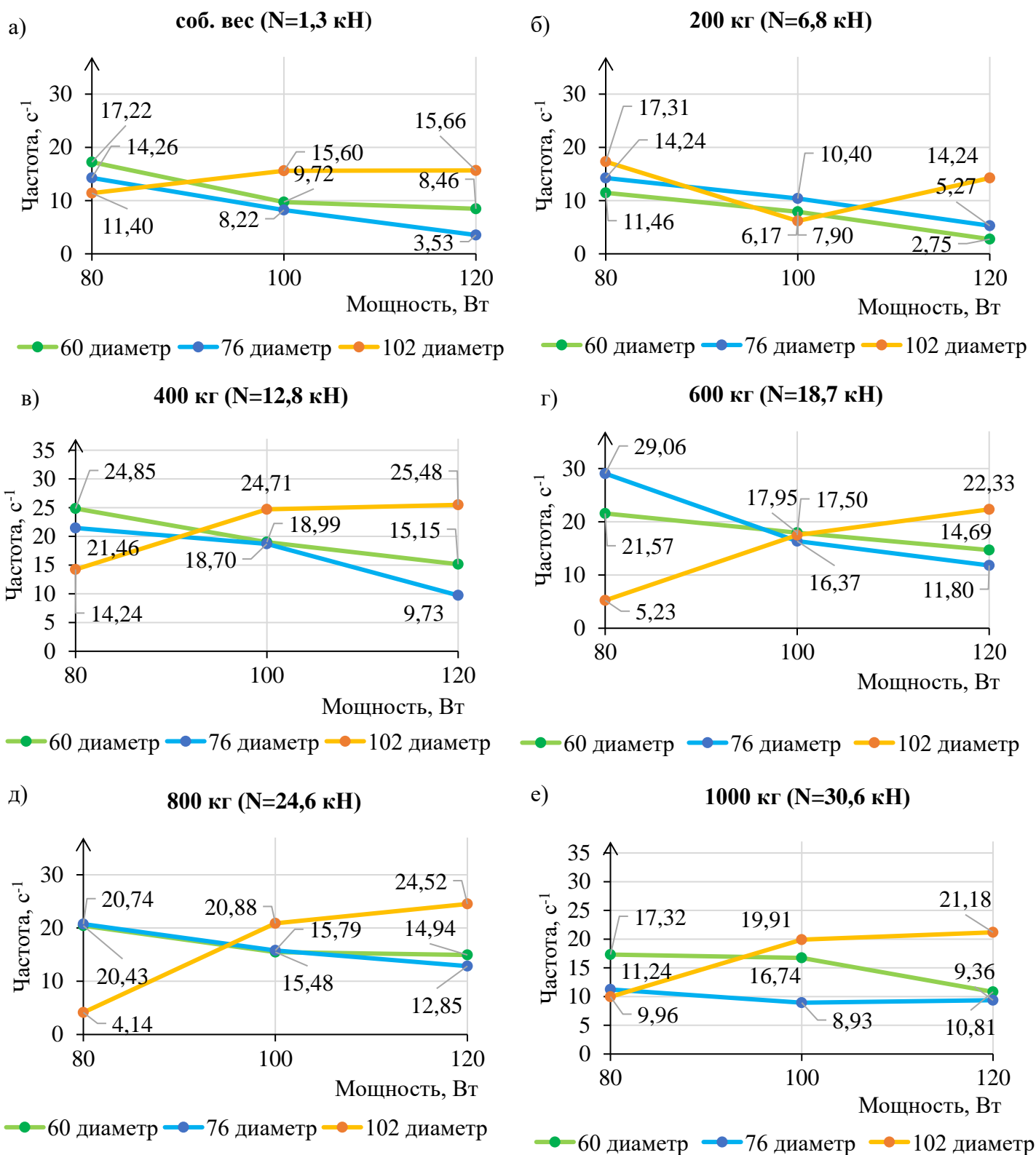


Рисунок 2.20 - Графики зависимости частоты колебаний образцов от мощности возмущающего воздействия

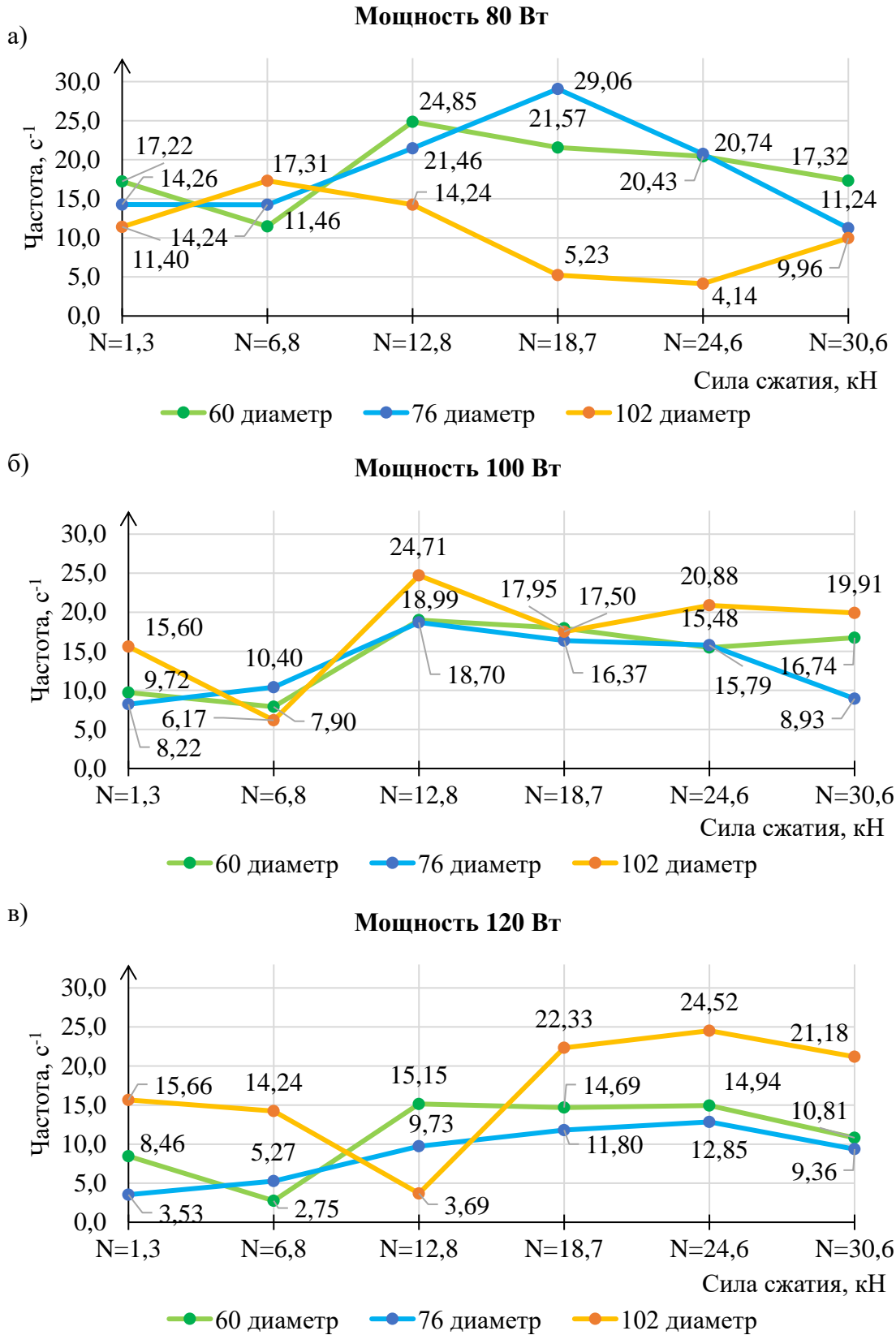


Рисунок 2.21 - Графики зависимости частоты колебаний образцов от величины сжимающей силы

**Выводы по главе 2**

1. **Разработана и апробирована экспериментальная методика определения динамических характеристик трубобетона.** В отличие от известных методов, предложенный подход позволяет комплексно определять приведенный коэффициент ( $E_N$ ) и коэффициент затухания ( $\epsilon$ ) для предварительно напряженных стержневых систем при свободных колебаниях.
2. **Экспериментально установлено влияние уровня осевого сжатия на амплитудно-частотные характеристики композитного стержня.** Показано, что увеличение продольной силы от 6,8 кН до 36,5 кН приводит к нелинейному росту собственной частоты (на 74,4%) и коэффициента затухания, что свидетельствует о значительном повышении жесткости системы. При этом коэффициент неупругой работы материала ( $\gamma$ ) демонстрирует стабильность (вариация  $\leq 7,5\%$ ), что подтверждает устойчивость его демпфирующих свойств при изменении напряженного состояния.
3. **Получена и аппроксимирована полиномиальная зависимость влияния осевой нагрузки на приведенный коэффициент  $E_N$ .** Установленная математическая зависимость третьей степени количественно описывает совместное влияние собственной упругости материала и продольной силы на эффективную жесткость системы.
4. **Выявлены и систематизированы закономерности динамического отклика трубобетонных стержней при вынужденных колебаниях.** Установлено, что резонансные явления наиболее выражены в диапазоне сжимающих сил 12,8–18,7 кН для образцов диаметром 60–76 мм. Показано, что рост мощности возмущающего воздействия для образцов диаметром 60 и 76 мм приводит к снижению частоты колебаний на 15–50%.
5. **Определены преимущественные демпфирующие свойства трубобетона в сравнении с традиционными материалами.** Установлено, что коэффициент неупругой работы трубобетона ( $\gamma = 0,129 - 0,139$ ) на 30–40% превышает аналогичный показатель для железобетона и значительно (в 4-5 раз) превышает показатель для стали, что обуславливает более пологую форму резонансных кривых и подтверждает его высокую эффективность как материала для динамически нагруженных конструкций.
6. **Полученные результаты развивают экспериментально-теоретические методы исследования динамики механических систем** применительно к композитным стержневым элементам. Установленные закономерности влияния осевого нагружения на частотные и демпфирующие характеристики могут быть использованы при построении и верификации расчетных моделей, а также для оценки динамической надежности элементов машин и конструкций.

Глава 2 подтвердила, что трубобетон сочетает высокую несущую способность с выдающимися демпфирующими свойствами, что делает его перспективным материалом для динамически нагруженных конструкций. Экспериментальные методики, предложенные в исследовании, обеспечивают точность оценок и могут быть адаптированы для других композитных материалов.

### ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ КАРКАСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ СО СКВОЗНЫМИ ТРУБОБЕТОННЫМИ КОЛОННАМИ

#### 3.1. Повышение демпфирующих свойств стальных конструкций подъемно-транспортных машин за счет внедрения бетонного сердечника

Конструкции подъемно-транспортных машин - это сборная система металлических балок и компонентов, предназначенных для поддержки крана и обеспечения его движения вдоль путей. На рисунке 3.1 приведена схема расположения несущих элементов конструкций подъемно-транспортных машин, где стрелками показаны направления возможных движений тележки крана *1* вдоль кран-балки *2* и самого мостового крана по крановым рельсам *3*, установленным на подкрановые балки *4*. Колонны *5* в таких системах могут иметь разнообразные сечения, включая открытые профили, такие как двутавры или швеллеры, а также закрытые формы, например, прямоугольное, квадратное или круглое сечение (рис.3.2).

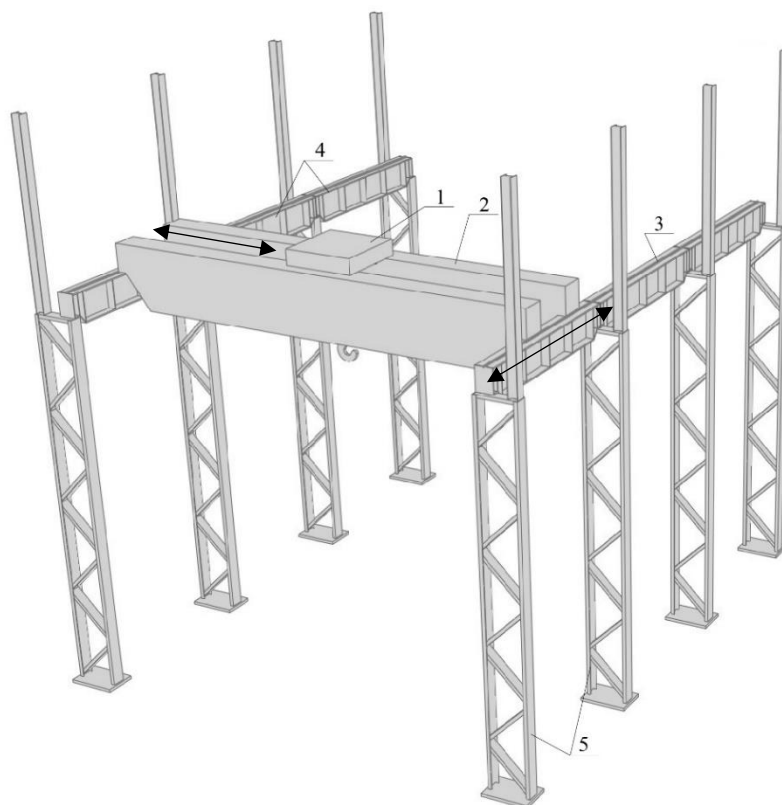


Рисунок 3.1 - Схема расположения несущих элементов конструкции подъемно-транспортных машин: 1 – тележка крана; 2 – мостовой кран (кран-балка); 3 - крановые рельсы; 4 – подкрановая балка; 5 – колонны

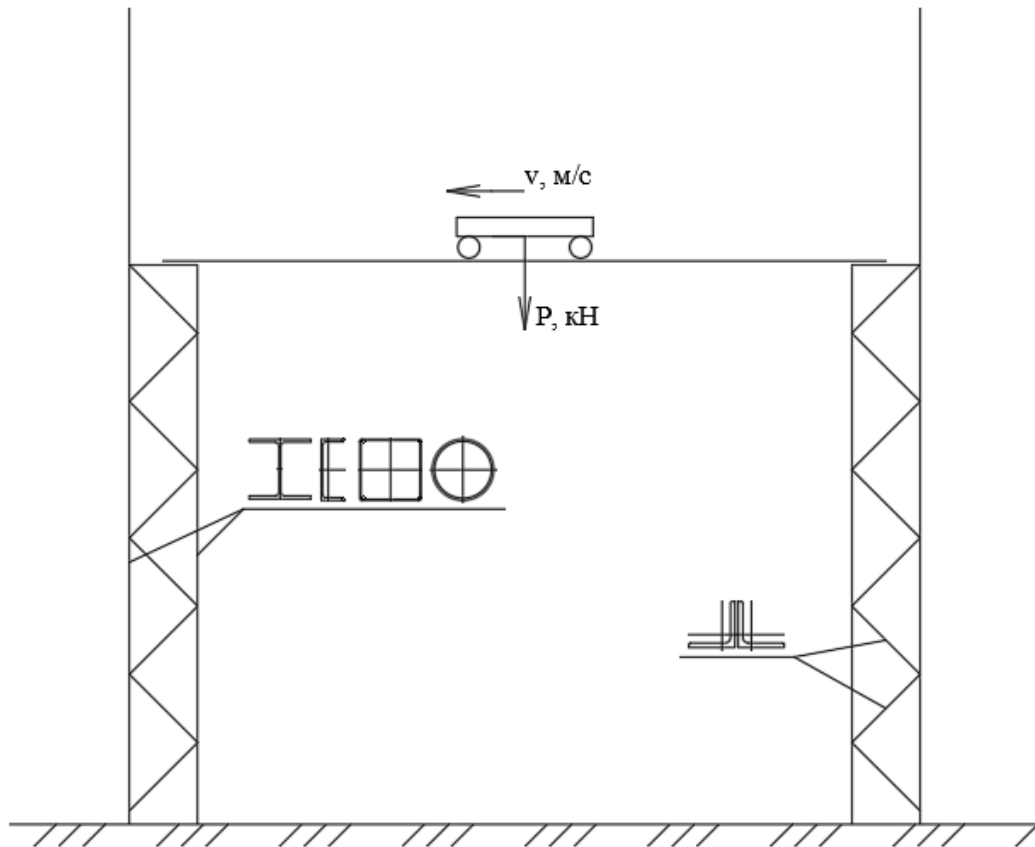


Рисунок 3.2 - Поперечная схема конструкции для эксплуатации подъемно-транспортных машин с возможными вариантами сечений элементов

При эксплуатации в конструкциях подъемно-транспортных машин могут возникать колебания из-за различных факторов, таких как неравномерная нагрузка при подъеме грузов, резкие изменения скорости движения крана, воздействие ветра, неисправности в системе управления, износ материалов, геометрические дефекты и вибрации от соседних машин [3,262].

Для обеспечения безопасности и надежности работы подъемно-транспортной системы необходимо снижать эти колебания. Существует различные технологии, предназначенные для уменьшения амплитуду колебаний и повышения устойчивость конструкции [263-265]. Среди них - использование демпфирующих устройств, адаптивных систем и специальных материалов [266-270].

Для поглощения колебаний могут применяться гидравлические и пневматические амортизаторы [271,272]. Адаптивные системы, такие как активные амортизаторы или системы с обратной связью, способны динамически регулировать параметры в режиме реального времени в зависимости от условий эксплуатации.

Важную роль в предотвращении колебаний играет виброзащита, состоящая из гибких опор и материалов с высоким коэффициентом трения. Также эффективным методом уменьшения вибраций является использование систем с повышенным демпфированием [273-275].

Системы повышенного демпфирования представляют собой комплексные технологические решения, направленные на смягчение и контроль колебаний в различных конструкциях и механизмах. Данные системы могут применяться в транспортных средствах, промышленных механизмах, конструкциях для эксплуатации подъемно-транспортных машин. Эти системы используют специальные материалы и устройства, которые способны уменьшить амплитуду и длительность колебаний. К материалам, применяемым в системах повышенного демпфирования, можно отнести специализированные эластомеры, полимеры с высокой демпфирующей способностью, активные материалы (например, пьезоэлектрические компоненты), виброизоляционные пеноматериалы, трубобетон и др.

Трубобетон вызывает особый интерес среди подобных материалов благодаря своей способности объединять характеристики бетона и стали. Он широко применяется для возведения конструкций с повышенной сопротивляемостью к вибрациям (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 - Общий вид трубобетона: 1 – внешняя оболочка (стальная труба); 2 – внутренний наполнитель (бетон)

Для оценки эффекта введения бетонного сердечника в металлическую оболочку стержневых элементов подкрановых конструкций, были проведены модельные испытания каркаса промышленного здания со сквозными колоннами при динамическом воздействии [A7,A15-A17].

### **3.1.1. Методика масштабного моделирования в экспериментальном исследовании стержневых систем**

Изучение и испытание реальных конструкций представляет собой сложную задачу, поэтому для анализа поведения различных конструкций целесообразно использовать уменьшенные масштабные модели. С их помощью можно сначала проверить статическое и динамическое поведение изучаемых конструкции, а затем перенести полученные теоретические и экспериментальные данные на реальные объекты. Кроме того, масштабные модели позволяют проводить более детальные и глубокие эксперименты по сравнению с испытаниями натуральных

конструкций. Размеры моделей обычно определяются на основе условий геометрического подобия и равенства напряженных состояний модели и реальной конструкции.

Для корректного переноса результатов с масштабной модели на реальный объект необходимо соблюдение законов подобия, включая геометрическое, кинематическое и динамическое подобие, при этом вводится некоторый масштабный фактор  $\lambda$ .

Тогда для того, чтобы учесть геометрическое подобие все линейные размеры масштабной модели должны быть уменьшены в  $\lambda$  раз, площади сечений элементов модели - в  $\lambda^2$ , а объемы - в  $\lambda^3$  раз.

Кинематическое и динамическое подобие учитывается следующим образом.

Временные масштабы изменяются в соответствии с квадратным корнем из масштабного фактора. Это означает, что если период колебаний модели  $T_m$ , то период колебаний реального объекта  $T_r$  будет:

$$T_r = T_m \cdot \sqrt{\lambda}, \quad (3.1)$$

Силы, действующие на модель, должны быть масштабированы с учетом площади сечения и массы. Если на модель действует сила  $F_m$ , то соответствующая сила на реальном объекте  $F_r$  будет:

$$F_r = F_m \cdot \lambda^2, \quad (3.2)$$

Импульс, приложенный к масштабной модели, должен быть масштабирован в соответствии с масштабным фактором. Если на модель приложен импульс  $I_m$ , то импульс на реальном объекте будет соответствовать:

$$I_r = I_m \cdot \lambda^{2,5}, \quad (3.3)$$

Это связано с тем, что импульс зависит от массы и скорости, которые масштабируются как  $\lambda^3$  и  $\sqrt{\lambda}$  соответственно.

Коэффициент затухания в модели должен быть скорректирован с учетом масштабного фактора. Если в модели наблюдается затухание с коэффициентом  $\varepsilon_m$ , то на реальном объекте коэффициент затухания  $\varepsilon_r$  будет:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_m \cdot \sqrt{\lambda}, \quad (3.4)$$

Частоты колебаний модели  $f_m$  должны быть пересчитаны для реального объекта с учетом масштабного фактора:

$$f_r = \frac{f_m}{\sqrt{\lambda}} = \frac{f_m}{\sqrt{6}}, \quad (3.5)$$

При учете масштабного фактора важно учитывать следующие ограничения. Поскольку гравитационное ускорение одинаково для модели и реального объекта, это может привести к некоторым отклонениям в динамическом подобии. Силы трения в подшипниках и сопротивление воздуха могут не масштабироваться линейно, что требует дополнительной корректировки.

Свойства материалов модели должны быть максимально близки к свойствам материалов реального объекта. В противном случае необходимо вводить поправочные коэффициенты.

Для сравнения демпфирующих свойств трубобетона с традиционными материалами, используемыми в конструкциях подъемно-транспортных машин, были изготовлены две масштабные модели каркаса (М1:6, масштабный фактор  $\lambda = 6$ ): одна с полыми стержнями - МКП (модель каркаса полая), и другая со сталебетонными стержнями – МКТ (модель каркаса трубобетонная). В таблице 3.1 указаны коэффициенты масштабного фактора, применяемые при переходе от реальной конструкции к макету.

Таблица 3.1 – Переходе от реальной конструкции к модели

| Геометрическое подобие при масштабном факторе $\lambda = 6$ |                               |                                      |                                 |
|---|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
|   | Геометрическая характеристика | Формула для определения коэффициента | Коэффициент масштабного фактора |
| 1.  | Длина                         | $1/\lambda$                          | 0,167                           |
| 2.  | Площадь                       | $1/\lambda^2$                        | 0,028                           |
| 3.  | Объем                         | $1/\lambda^3$                        | 0,005                           |

Для изготовления сердечника в сталебетонном каркасе применялась растворная смесь специального состава. Учитывая масштабный фактор и гранулометрический состав мелкозернистого бетона с использованием фракции щебня 5-10 мм, было принято решение в масштабной модели использовать сердечник из цементно-песчаного раствора марки М100. Для повышения пластичности и адгезии между металлом обоймы и раствором добавлялся пластификатор, состоящий из цемента, минерального заполнителя, модифицирующих добавок.

Учитывая коэффициенты масштабного фактора при геометрическом подобии (табл. 3.1), в исследуемых макетах стержни двухветвевых колонн каркаса выполнены их хромированных труб 1 диаметром 25 мм. Диагональные связи колонн 2 представляют собой сечение из парных уголков размерами 10x10x1 мм. Крестовые связи 3, соединяющие двухветвевые колонны выполнены из парных уголков размерами 10x10x1 мм. Все элементы конструкции соединялись болтами диаметром 3 мм через фасонки 4, изготовленные из перфорированной металлической ленты шириной 12 мм (рис. 3.4).

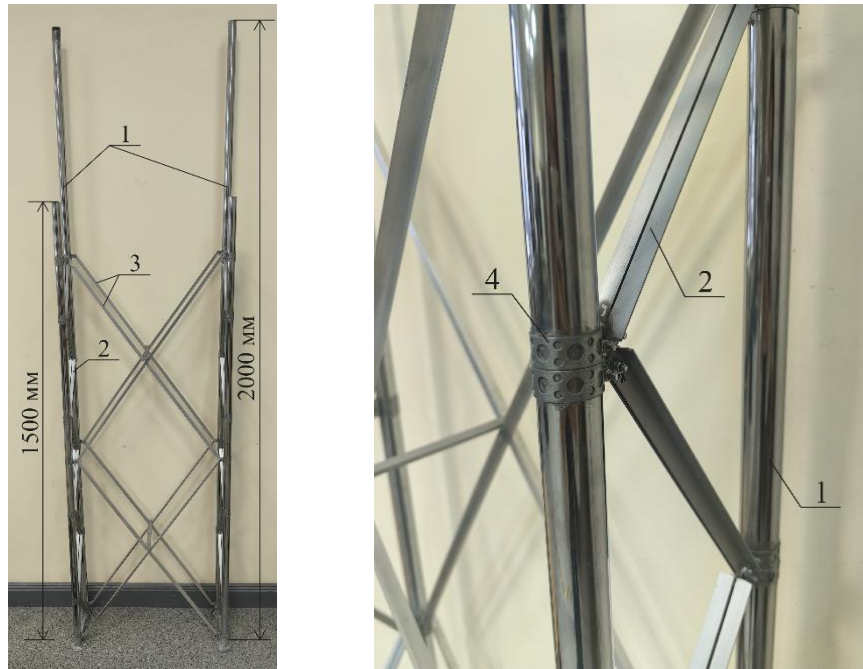


Рисунок 3.4 – Исследуемый макет каркаса: 1 – Стержни колонны из хромированной трубы; 2 – диагональные связи колонны из парных уголков; 3 – крестовые связи каркаса из парных уголков; 4 – фасонки из перфорированной ленты

Для перевода данных полученных в ходе исследования уменьшенных моделей необходимо воспользоваться коэффициентами масштабного фактора, которые учитывают кинематическое и динамическое подобие, указанные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Переходе от модели к реальной конструкции

| Кинематическое и динамическое подобие при масштабном факторе $\lambda = 6$ |                               |                                      |                                 |
|--|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
|  | Геометрическая характеристика | Формула для определения коэффициента | Коэффициент масштабного фактора |
| 1.   | Период колебаний              | $T_m \cdot \sqrt{\lambda}$           | 2,45                            |
| 2.   | Силы, действующие на модель   | $F_m \cdot \lambda^2$                | 36                              |
| 3.   | Начальный импульс             | $I_m \cdot \lambda^{2,5}$            | 88,18                           |
| 4.   | Коэффициент затухания         | $\varepsilon_m \cdot \sqrt{\lambda}$ | 2,45                            |
| 5.   | Частота колебания             | $\frac{f_m}{\sqrt{\lambda}}$         | 0,408                           |

В рамках данного исследования основное внимание уделялось качественной оценке демпфирующих свойств трубобетонных элементов по сравнению с полыми стальными аналогами. При интерпретации результатов масштабного моделирования следует учитывать, что прямое количественное соотнесение полученных данных с параметрами натуральных конструкций требует отдельной проработки вопроса масштабного перехода с учетом макромасштаба составляющих бетона.

### 3.1.2. Сравнительный анализ повышения демпфирующих свойств стальных подкрановых систем за счет внедрения бетонного сердечника при вынужденных затухающих колебаниях

Установка для проведения динамических испытаний каркаса на вынужденные колебания представлена на рисунке 3.5.

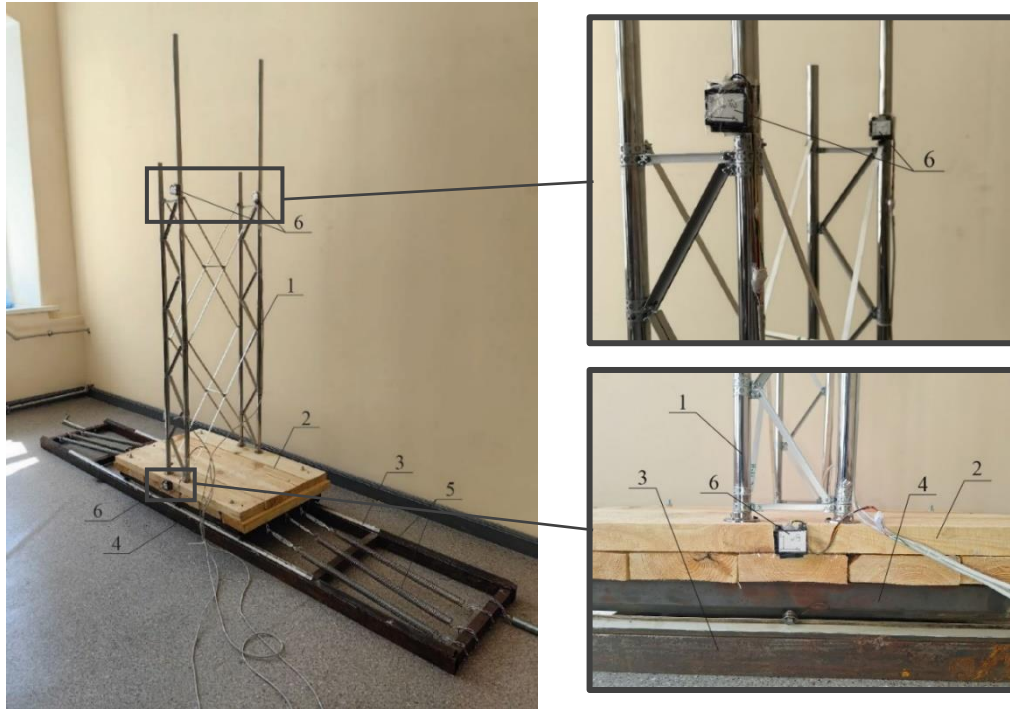


Рисунок 3.5 – Экспериментальная установка для проведения исследования вынужденных колебаний модели каркаса конструкции для эксплуатации подъемно-транспортных машин: 1 – модель каркаса; 2 – деревянная платформа для крепления макета каркаса; 3 – сварная металлическая рама с направляющими треугольного профиля; 4 – сварная металлическая тележка с шестью парными стальными колесами в виде подшипников качения; 5 – пружины для задания жесткости системы; 6 – датчики акселерометра

Возбуждение колебаний макета каркаса проводилось толчком сварной металлической тележки 4, на которую был закреплен деревянный поддон 2 с макетом каркаса 1, вдоль металлической рамы 3. Для регистрации колебаний использовались три трехосный акселерометра 6 типа ТБА с массой около 50 г (незначительная масса акселерометра не повлияла на точность измерений). Один из акселерометров (датчик № 9) крепился к деревянной платформе 2 для фиксации колебаний основания. Два других акселерометра (датчики № 10,11) закреплялись на стержни двухветвевых колонн для того, чтобы фиксировать колебания макета, а также возможные угловые перемещения колонн каркаса относительно друг друга. Сигнал с акселерометра через модуль обработки сигнала (согласующий усилитель и аналого-цифровой преобразователь) поступал в персональный компьютер для регистрации и последующей

обработки результатов измерений. Жесткость системы регулировалась изменением числа пружин 5, соединяющих металлическую раму с тележкой. Для задания дополнительной нагрузки на каркас в рамках исследования использовались гири массой 5 кг каждая, размещаемые в специальной корзине на деревянном основании, установленном на колоннах каркаса. Использование съемной нагрузки обеспечило возможность проведения сравнительных испытаний каркаса как под нагрузкой, так и без нее, что важно для комплексной оценки влияния бетонного заполнения на динамические характеристики конструкции при различных эксплуатационных режимах.

Испытания проводились в условиях динамического воздействия, рассматривая три различных сценария:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . В каждом из них нагрузка была приложена к каркасу под постоянным углом, а изменение угла динамического воздействия на конструкцию достигалось путем изменения расположения макета на деревянной платформе (рис.3.6) [A7].

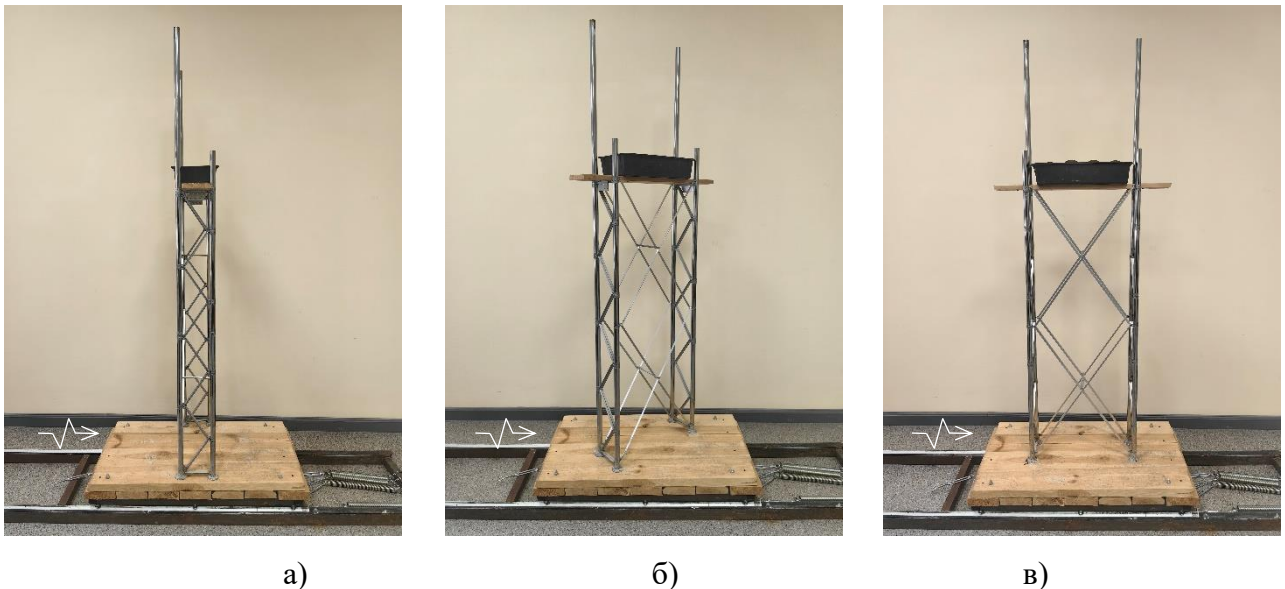


Рисунок 3.6 – Расположение каркаса на деревянном поддоне при расположении макета: под углом  $0^\circ$  (а); под углом  $45^\circ$  (б); под углом  $90^\circ$  (в);

После однократного толчка экспериментальной установки в каркасе возбуждались затухающие колебания. Для расчета параметров колебаний использовались данные проекций кажущегося ускорения, полученные с акселерометров.

Для наглядного представления результатов эксперимента на рисунке 3.7 показаны осциллограммы затухающих колебаний в виде графиков перемещения  $A$  точек каркаса, оборудованных акселерометрами, во времени  $t$ . Эти графики представляют данные одного из измерений, проведенных в ходе исследования.

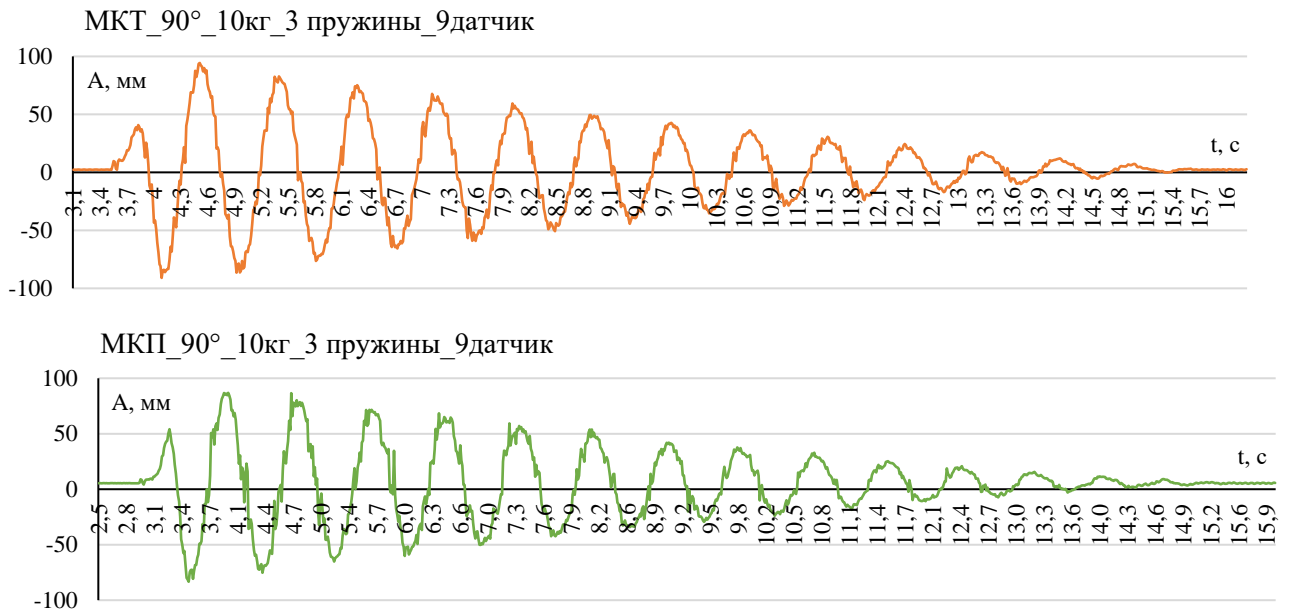


Рисунок 3.7 – Графики колебаний макетов каркаса МКТ и МКП с датчиком акселерометра, установленным на основание

Из анализа осциллограмм видно, что колебания макета каркаса весьма схожи с колебаниями линейных систем с вязким трением. Важной особенностью таких систем является то, что период собственных колебаний  $T$  практически не зависит от амплитуды  $A$ , что указывает на линейный характер динамического поведения исследуемой конструкции в пределах проводимых экспериментов.

Для определения круговой частоты колебаний в каждом эксперименте использовались следующие шаги:

1. На основе полученных осциллограмм фиксировалось количество полных колебаний и измерялось время, прошедшее с момента начального толчка до полного затухания колебаний.

2. По этим данным рассчитывался период колебаний  $T$ , как отношение общего времени к количеству колебаний.

3. Затем вычислялась частота колебаний  $f$  по формуле:

$$f = \frac{1}{T}$$

4. На основе найденной частоты определялась круговая частота  $\omega$  по формуле:

$$\omega = 2\pi f$$

5. Для обеспечения высокой точности измерений каждый эксперимент включал серию из четырех независимых возбуждений колебаний. По результатам этих испытаний определялось среднее значение круговой частоты. В качестве примера в таблице 3.3 представлен расчет средней круговой частоты для одного из замеров (на рисунке 3.7 приведена часть графика, соответствующая замеру полого каркаса). Незначительный разброс значений частоты

(максимальное отклонение от среднего — 0,25%) подтверждает достоверность данных и обоснованность использования усредненного показателя.

Таблица 3.3 - Расчет средней круговой частоты

| МКП_90°_10кг_3<br>пружины_датчи<br>к | Замер | Число колебаний | Время, с | Период, с <sup>-1</sup> | Частота, Гц | Круговая частота, рад/с | Средняя круговая частота, рад/с |
|--------------------------------------|-------|-----------------|----------|-------------------------|-------------|-------------------------|---------------------------------|
|                                      | 1     | 14              | 10,811   | 0,772                   | 1,295       | 8,137                   | 8,13                            |
|                                      | 2     | 14              | 10,833   | 0,774                   | 1,292       | 8,120                   |                                 |
|                                      | 3     | 14              | 10,8     | 0,771                   | 1,296       | 8,145                   |                                 |
|                                      | 4     | 13              | 10,078   | 0,775                   | 1,290       | 8,105                   |                                 |

В таблицах 3.4-3.6 представлены результаты экспериментальных исследований двух типов каркасов - с полыми стержнями (МКП) и трубобетонными элементами (МКТ). В ней представлены расчетные значения средней круговой частоты, полученные при различных углах положения каркаса на платформе (0°, 45° и 90°), также при различной нагрузке, приложенной на каркас.

Таблица 3.4 – Эффект внедрения бетонного сердечника в металлическую обойму при расположении макета под углом 0° (поперек шага колонн)

| Жесткость системы                               | № датчика | Каркас без нагрузки      |      |                                | Каркас с нагрузкой 10 кг |      |                                | Каркас с нагрузкой 20 кг |      |                                |
|---|-----------|--------------------------|------|--------------------------------|--------------------------|------|--------------------------------|--------------------------|------|--------------------------------|
|   |           | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % |
|   |           | МКП                      | МКТ  |                                | МКП                      | МКТ  |                                | МКП                      | МКТ  |                                |
| 4 пружины                                       | 9         | 9,86                     | 9,46 | 4,22                           | 9,89                     | 8,86 | 10,48                          | 8,60                     | 8,46 | 1,61                           |
|   | 10        | 9,87                     | 9,46 | 4,22                           | 9,52                     | 8,89 | 6,62                           | 8,55                     | 8,44 | 1,20                           |
| 3 пружины                                       | 9         | 8,58                     | 8,28 | 3,46                           | 8,23                     | 7,79 | 5,40                           | 7,51                     | 7,28 | 3,08                           |
|   | 10        | 8,59                     | 8,27 | 3,67                           | 8,24                     | 7,81 | 5,19                           | 7,56                     | 7,36 | 2,60                           |
| 2 пружины                                       | 9         | 7,07                     | 6,80 | 3,87                           | 6,92                     | 6,63 | 4,23                           | 6,40                     | 6,21 | 2,90                           |
|   | 10        | 7,07                     | 6,81 | 3,73                           | 6,90                     | 6,64 | 3,70                           | 6,40                     | 6,25 | 2,44                           |
| 1 пружина                                       | 9         | 5,03                     | 4,89 | 2,79                           | 5,20                     | 5,01 | 3,60                           | 4,76                     | 4,57 | 3,89                           |
|   | 10        | 5,05                     | 4,87 | 3,64                           | 5,23                     | 4,98 | 4,82                           | 4,77                     | 4,72 | 1,02                           |
| <b>Максимальный показатель эффективности, %</b> |           |                          |      | <b>4,22</b>                    |                          |      | <b>10,48</b>                   |                          |      | <b>3,89</b>                    |

Таблица 3.5 – Эффект внедрения бетонного сердечника в металлическую обойму при расположении макета под углом 45°

| Жесткость системы                               | № датчика | Каркас без нагрузки      |       |                                | Каркас с нагрузкой 10 кг |      |                                | Каркас с нагрузкой 20 кг |      |                                |
|---|-----------|--------------------------|-------|--------------------------------|--------------------------|------|--------------------------------|--------------------------|------|--------------------------------|
|   |           | Средняя круговая частота |       | Эффект внедрения сердечника, % | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % |
|   |           | МКП                      | МКТ   |                                | МКП                      | МКТ  |                                | МКП                      | МКТ  |                                |
| 4 пружины                                       | 9         | 10,30                    | 9,99  | 3,02                           | 9,26                     | 8,88 | 4,13                           | 8,80                     | 8,33 | 5,36                           |
|   | 10        | 10,30                    | 10,01 | 2,88                           | 9,22                     | 8,91 | 3,43                           | 8,66                     | 8,34 | 3,71                           |
| 3 пружины                                       | 9         | 9,13                     | 8,86  | 2,92                           | 8,22                     | 7,79 | 5,18                           | 7,65                     | 7,41 | 3,13                           |
|   | 10        | 9,14                     | 8,66  | 5,21                           | 8,19                     | 7,83 | 4,44                           | 7,58                     | 7,39 | 2,41                           |
| 2 пружины                                       | 9         | 7,63                     | 7,01  | 8,12                           | 6,82                     | 6,63 | 2,70                           | 6,35                     | 6,19 | 2,64                           |
|   | 10        | 7,61                     | 7,37  | 3,23                           | 6,85                     | 6,65 | 2,84                           | 6,39                     | 6,16 | 3,53                           |
| 1 пружина                                       | 9         | 5,68                     | 5,37  | 5,40                           | 5,16                     | 5,06 | 1,81                           | 4,85                     | 4,65 | 4,22                           |
|   | 10        | 5,83                     | 5,65  | 3,06                           | 5,14                     | 5,05 | 1,77                           | 4,86                     | 4,64 | 4,51                           |
| <b>Максимальный показатель эффективности, %</b> |           |                          |       | <b>8,12</b>                    |                          |      | <b>5,18</b>                    |                          |      | <b>5,36</b>                    |

Таблица 3.6 – Эффект внедрения бетонного сердечника в металлическую обойму при расположении макета под углом 90° (вдоль шага колонн)

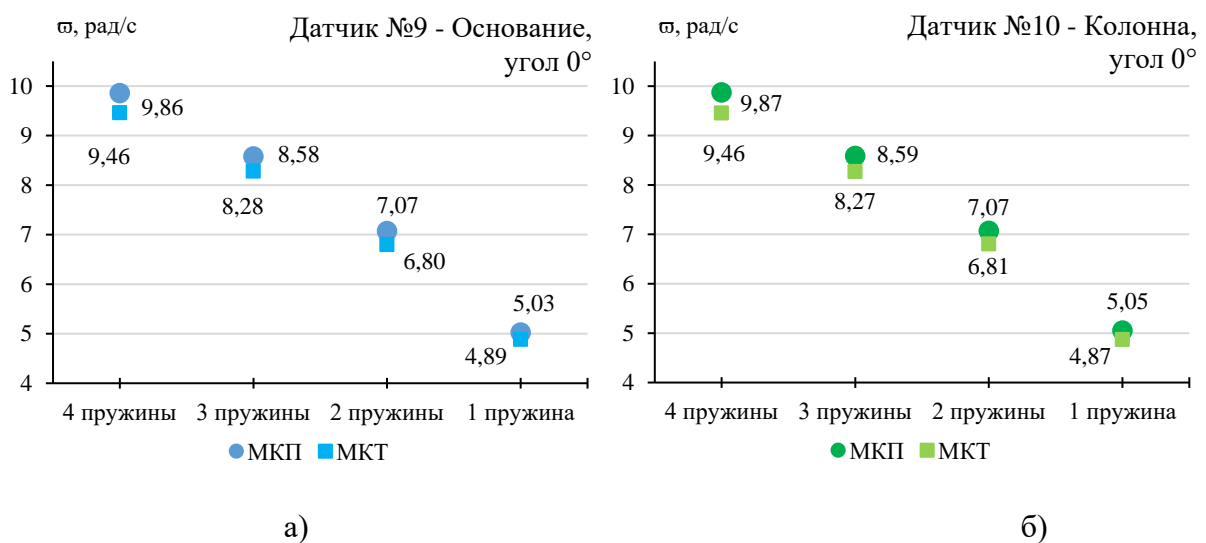
| Жесткость системы                               | № датчика | Каркас без нагрузки      |       |                                | Каркас с нагрузкой 10 кг |      |                                | Каркас с нагрузкой 20 кг |      |                                |
|---|-----------|--------------------------|-------|--------------------------------|--------------------------|------|--------------------------------|--------------------------|------|--------------------------------|
|   |           | Средняя круговая частота |       | Эффект внедрения сердечника, % | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % |
|   |           | МКП                      | МКТ   |                                | МКП                      | МКТ  |                                | МКП                      | МКТ  |                                |
| 4 пружины                                       | 9         | 10,40                    | 9,99  | 3,91                           | 9,45                     | 8,97 | 5,03                           | 8,55                     | 8,32 | 2,75                           |
|   | 10        | 10,39                    | 10,01 | 3,67                           | 9,44                     | 8,99 | 4,77                           | 8,59                     | 8,28 | 3,52                           |
| 3 пружины                                       | 9         | 9,15                     | 8,86  | 3,13                           | 8,13                     | 7,80 | 4,01                           | 7,56                     | 7,39 | 2,22                           |
|   | 10        | 9,13                     | 8,66  | 5,09                           | 8,12                     | 7,82 | 3,72                           | 7,58                     | 7,41 | 2,16                           |
| 2 пружины                                       | 9         | 7,64                     | 7,01  | 3,87                           | 6,89                     | 6,62 | 3,89                           | 6,40                     | 6,25 | 2,46                           |
|   | 10        | 7,62                     | 7,37  | 3,73                           | 6,87                     | 6,64 | 3,38                           | 6,42                     | 6,27 | 2,33                           |
| 1 пружина                                       | 9         | 5,66                     | 5,37  | 2,79                           | 4,92                     | 4,91 | 0,30                           | 4,94                     | 4,86 | 1,48                           |
|   | 10        | 5,68                     | 5,65  | 3,64                           | 5,18                     | 4,91 | 5,19                           | 4,92                     | 4,85 | 1,39                           |
| <b>Максимальный показатель эффективности, %</b> |           |                          |       | <b>5,09</b>                    |                          |      | <b>5,19</b>                    |                          |      | <b>3,52</b>                    |

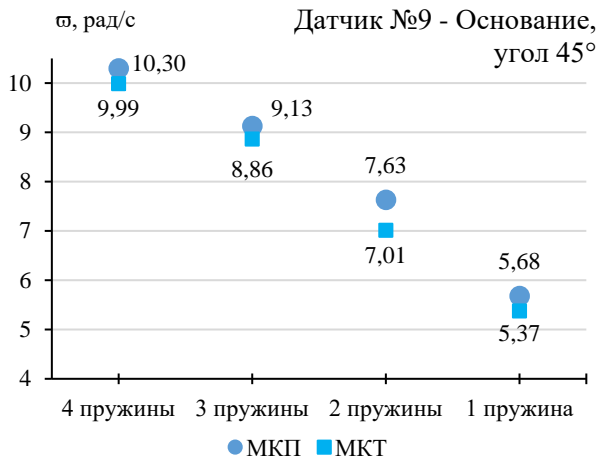
Анализ данных показал важную связь между жесткостью системы и первой собственной частотой колебаний макета: снижение жесткости конструкции приводило к уменьшению первой собственной частоты. Исследование также позволило количественно оценить влияние внедрения бетонного сердечника в металлические стержни, демонстрируя изменения в динамических характеристиках каркаса при использовании трубобетонных элементов.

Более детальный анализ представленных в таблицах 3.4–3.6 данных позволяет выявить дополнительные закономерности. Сравнение показаний датчика на основании (№9) и датчика на колонне (№10) во всех исследованных конфигурациях показывает высокую степень корреляции — различия в значениях частот обычно не превышают 0,2–0,3 рад/с. Это подтверждает, что колебания каркаса носят синхронный характер, а конструкция работает как единая динамическая система без существенных локальных деформаций в узлах соединений.

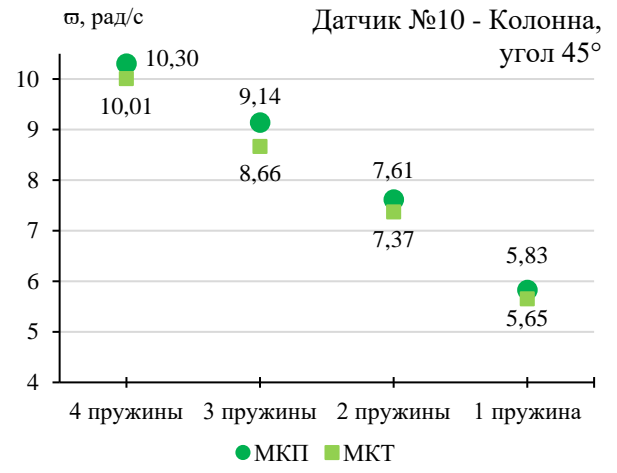
Кроме того, установлено, что оптимальная жесткость системы, обеспечивающая максимальный демпфирующий эффект, зависит от направления динамического воздействия. При поперечных нагрузках ( $0^\circ$ ) наибольшая эффективность сердечника (10,48%) достигается в наиболее жесткой системе (4 пружины). При действии нагрузки под углом  $45^\circ$  и  $90^\circ$  максимум смещается в сторону меньшей жесткости (2–3 пружины), а абсолютные значения эффекта снижаются до 5–8%. Это указывает на необходимость учета направления преобладающих динамических воздействий при выборе жесткостных параметров конструкций.

Рисунок 3.8-3.10 демонстрирует сравнение средних значений первой собственной частоты для полого и трубобетонного каркасов, позволяя визуально оценить влияние бетонного заполнения и угла приложения воздействия относительно положения каркаса на динамический отклик конструкций.

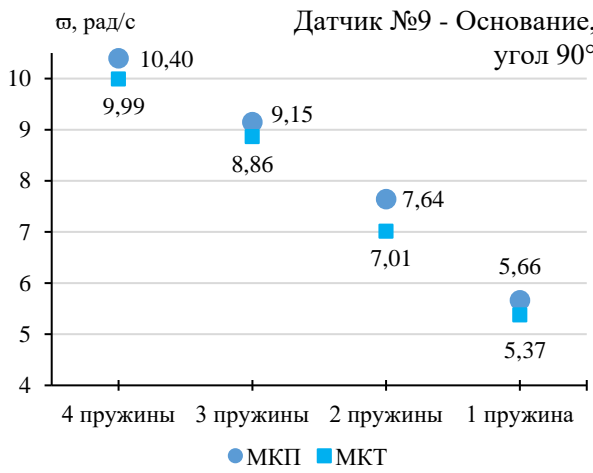




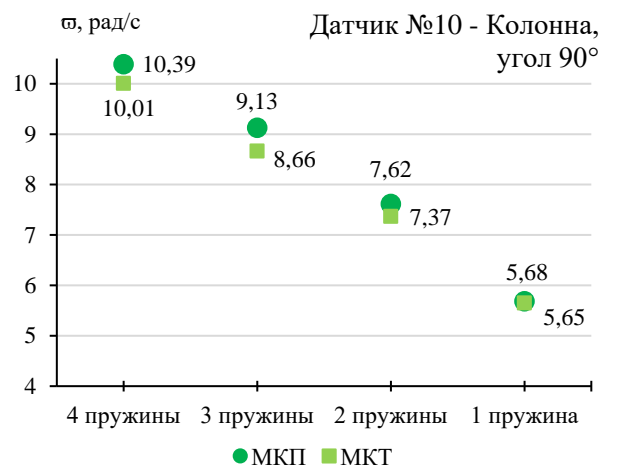
в)



г)

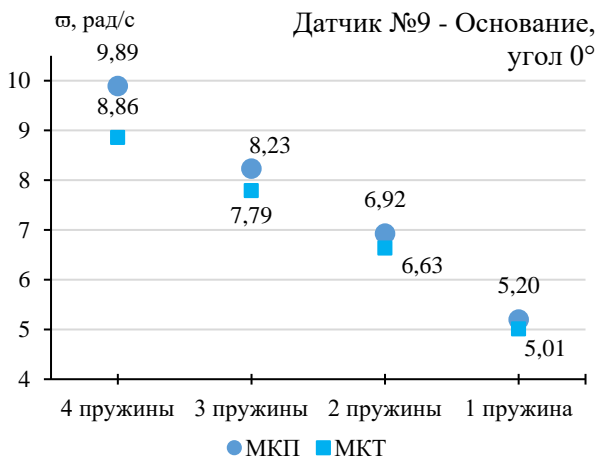


д)

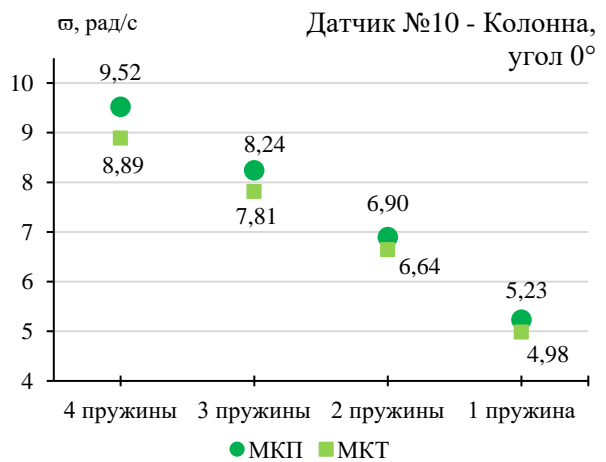


е)

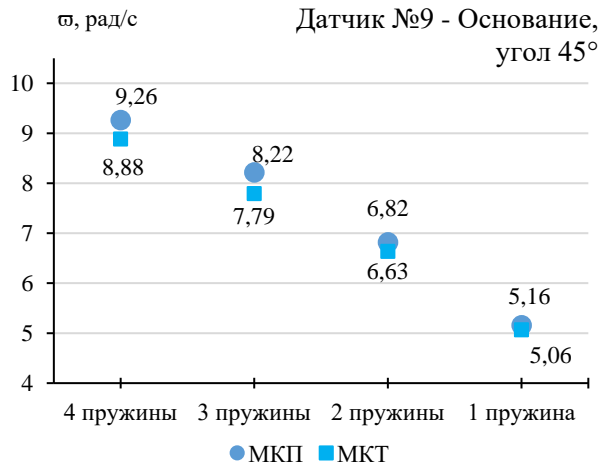
Рисунок 3.8 - Усредненные значения первой собственной частоты  $\bar{\omega}$  колебаний моделей каркасов МКП и МКТ без нагрузки в зависимости от жесткости системы: (а), (в), (д) датчик №9, установленный на основание при положении каркаса на платформе под углами  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  соответственно; (б), (г), (е) датчик №10, установленный на колонну при положении каркаса на платформе под углами  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  соответственно.



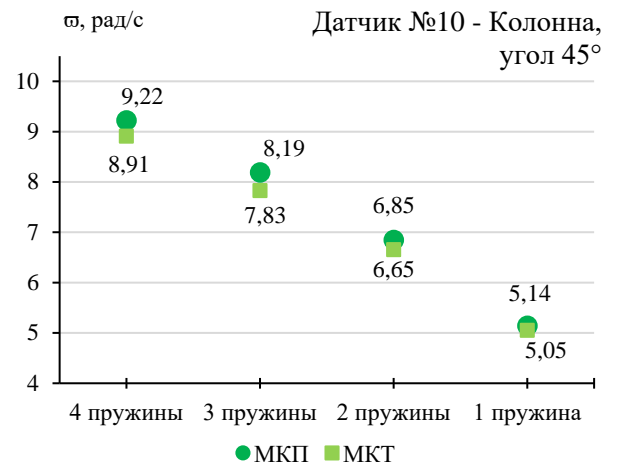
а)



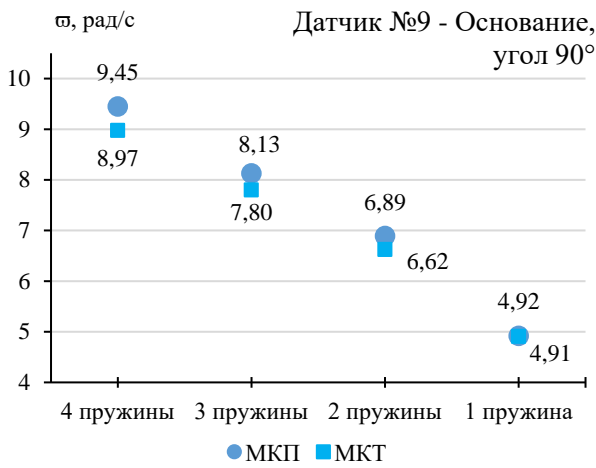
б)



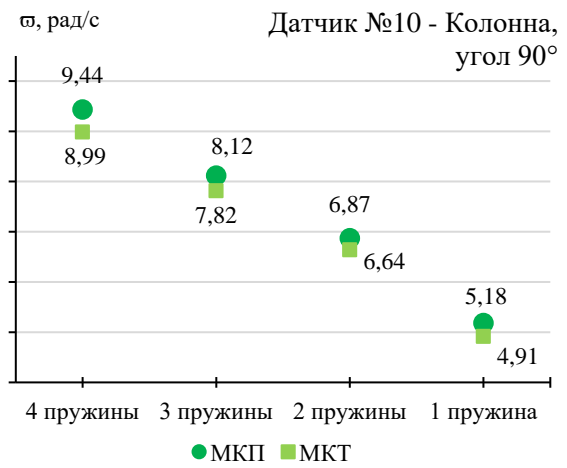
в)



г)

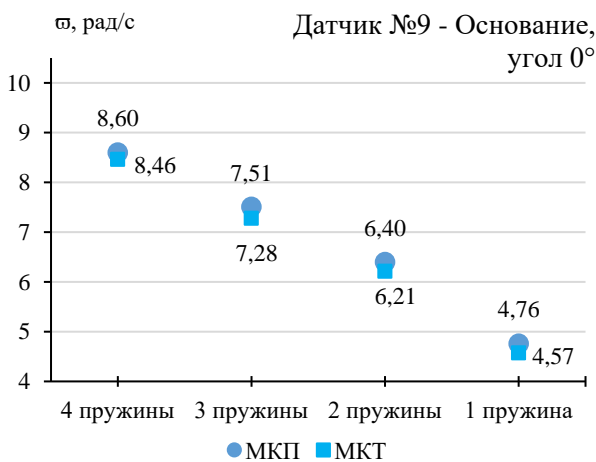


д)

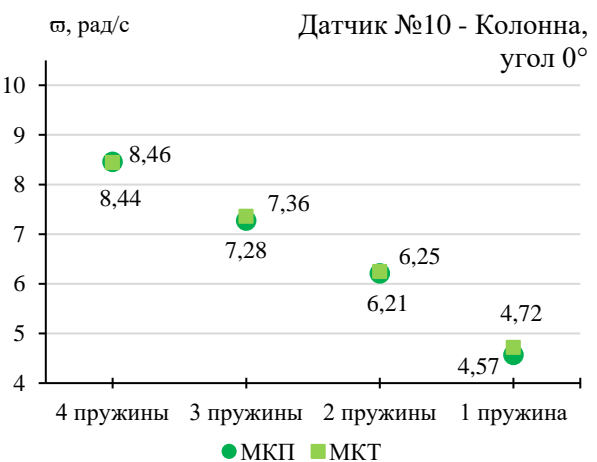


е)

Рисунок 3.9 - Усредненные значения первой собственной частоты  $\bar{\omega}$  колебаний моделей каркасов МКП и МКТ с нагрузкой 10 кг в зависимости от жесткости системы: (а), (в), (д) датчик №9, установленный на основание при положении каркаса на платформе под углами 0°, 45°, 90° соответственно; (б), (г), (е) датчик №10, установленный на колонну при положении каркаса на платформе под углами 0°, 45°, 90° соответственно.



а)



б)

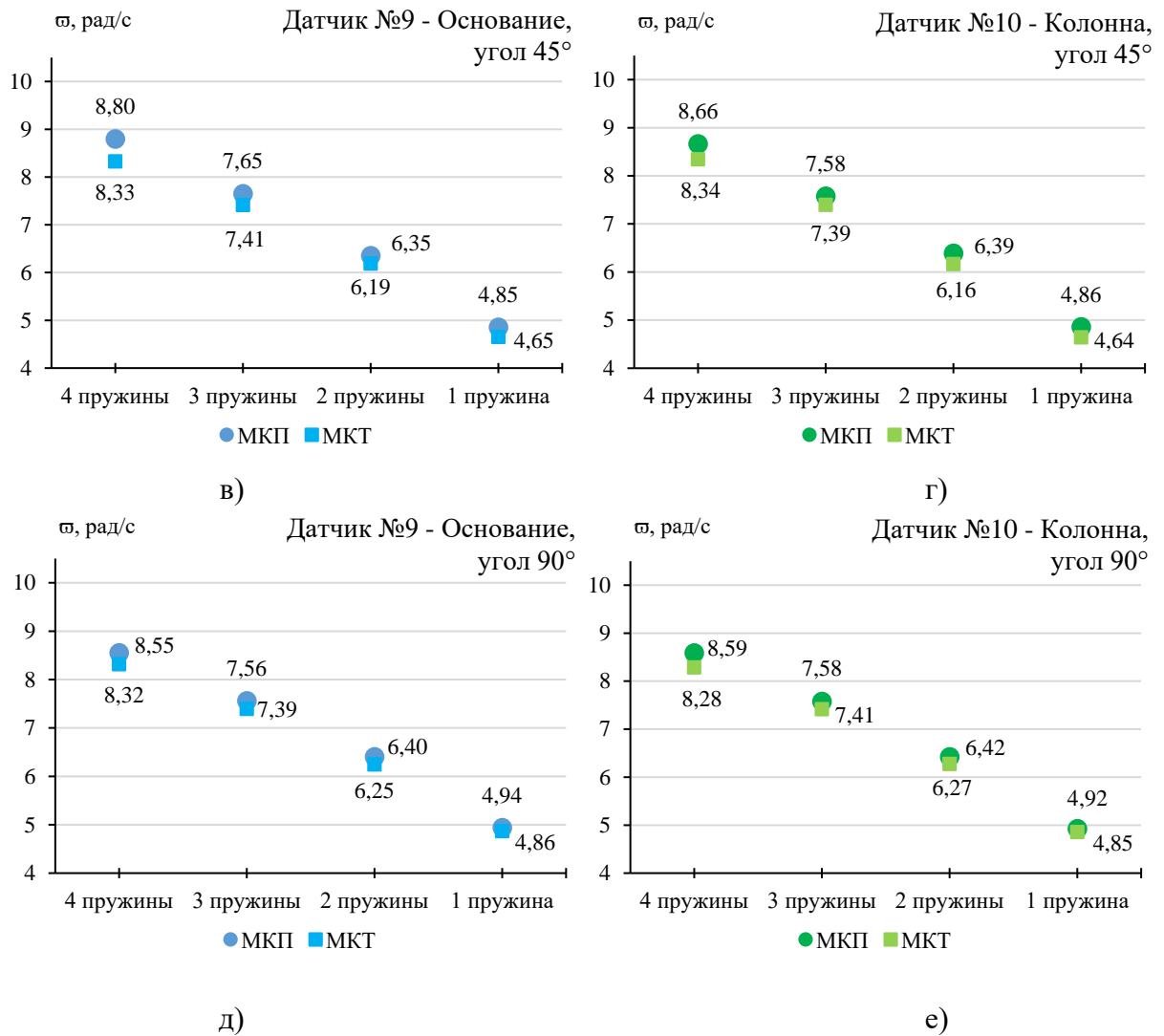


Рисунок 3.10 - Усредненные значения первой собственной частоты  $\bar{\omega}$  колебаний моделей каркасов МКП и МКТ с нагрузкой 20 кг в зависимости от жесткости системы: (а), (в), (д) датчик №9, установленный на основание при положении каркаса на платформе под углами 0°, 45°, 90° соответственно; (б), (г), (е) датчик №10, установленный на колонну при положении каркаса на платформе под углами 0°, 45°, 90° соответственно.

Также для изучения влияния массы нагрузки на демпфирующие характеристики каркаса были проведены эксперименты с различной жесткостью пружинной системы. Исследование включало вариации нагрузки (8 кг, 10 кг, 12 кг, 20 кг, 25 кг) и анализ двух типов каркасов: без сердечника (МКП) и с сердечником (МКТ). Основными параметрами оценки стали средняя круговая частота и эффект внедрения сердечника, выраженный в процентах. Эксперименты проводились при положении каркаса на платформе под углом 0 градусов, что обеспечило стандартизированные условия для сравнения результатов. В таблице 3.7 представлены результаты, полученные в ходе исследования.

Проведенные эксперименты позволили выявить ряд закономерностей, связанных с влиянием жесткости пружинной системы и массы нагрузки на демпфирующие характеристики

каркаса. Наблюдения показали, что с увеличением количества пружин (от 1 до 4) средняя круговая частота возрастает как для каркаса без сердечника (МКП), так и для каркаса с сердечником (МКТ). Например, для каркаса без нагрузки для системы с одной пружиной значения частоты составляли 5,03–5,05 (МКП) и 4,87–4,89 (МКТ), тогда как при четырех пружинах эти показатели увеличивались до 9,86–9,87 (МКП) и 9,46 (МКТ). Это свидетельствует о том, что жесткость системы напрямую влияет на динамические характеристики конструкции, делая ее менее податливой к внешним воздействиям.

При этом эффект внедрения сердечника, выраженный в процентах, варьировался в зависимости от нагрузки и конфигурации пружин. Наибольшая эффективность (10,48%) была зафиксирована для системы с четырьмя пружинами при нагрузке 10 кг, что свидетельствует об оптимальном сочетании жесткости и демпфирующих свойств в данном диапазоне. Однако с увеличением массы нагрузки (от 8 кг до 25 кг) наблюдалось постепенное снижение как круговой частоты, так и эффекта от сердечника. Например, для четырех пружин при 8 кг средняя частота составляла 9,90–9,99 (МКП), а при 25 кг она уменьшалась до 8,29–8,31 (МКП). Аналогичная тенденция прослеживалась и для МКТ, где значения частоты снижались с 9,74 до 8,13–8,20. Это свидетельствует о том, что при больших нагрузках демпфирующие свойства сердечника становятся менее выраженными, что может быть связано с достижением предела его эффективности или изменением характера колебаний системы.

Сравнение каркасов МКП и МКТ во всех экспериментах подтвердило, что наличие сердечника обеспечивает более высокие демпфирующие характеристики, так как значения круговой частоты для МКТ были стабильно ниже, чем для МКП. Однако степень этого влияния зависела от условий: при меньших нагрузках (8–12 кг) эффект внедрения был максимальным (до 10,48%), тогда как при дальнейшем росте нагрузки до 20–25 кг эффект снижался и не превышал 4,08%. Это позволяет сделать вывод о том, что сердечник наиболее эффективен в системах с умеренными нагрузками и высокой жесткостью, где его применение позволяет существенно снизить вибрации.

Таблица 3.7 – Эффект внедрения бетонного сердечника в металлическую обойму при расположении макета под углом 0° (поперек шага колонн) с дополнительными сценариями приложенной нагрузки

| Жесткость системы                               | № датчика | Каркас без нагрузки      |      |                                | Каркас с нагрузкой 8 кг  |      |                                | Каркас с нагрузкой 10 кг |      |                                |
|---|-----------|--------------------------|------|--------------------------------|--------------------------|------|--------------------------------|--------------------------|------|--------------------------------|
|   |           | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % |
|   |           | МКП                      | МКТ  |                                | МКП                      | МКТ  |                                | МКП                      | МКТ  |                                |
| 4 пружины                                       | 9         | 9,86                     | 9,46 | 4,22                           | 9,90                     | 9,74 | 1,61                           | 9,89                     | 8,86 | 10,48                          |
|   | 10        | 9,87                     | 9,46 | 4,22                           | 9,99                     | 9,74 | 2,57                           | 9,52                     | 8,89 | 6,62                           |
| 3 пружины                                       | 9         | 8,58                     | 8,28 | 3,46                           | 8,81                     | 8,50 | 3,56                           | 8,23                     | 7,79 | 5,40                           |
|   | 10        | 8,59                     | 8,27 | 3,67                           | 8,80                     | 8,54 | 2,94                           | 8,24                     | 7,81 | 5,19                           |
| 2 пружины                                       | 9         | 7,07                     | 6,80 | 3,87                           | 7,44                     | 7,04 | 5,36                           | 6,92                     | 6,63 | 4,23                           |
|   | 10        | 7,07                     | 6,81 | 3,73                           | 7,45                     | 7,04 | 5,44                           | 6,90                     | 6,64 | 3,70                           |
| 1 пружина                                       | 9         | 5,03                     | 4,89 | 2,79                           | 5,93                     | 5,81 | 1,99                           | 5,20                     | 5,01 | 3,60                           |
|   | 10        | 5,05                     | 4,87 | 3,64                           | 5,87                     | 5,84 | 0,53                           | 5,23                     | 4,98 | 4,82                           |
| <b>Максимальный показатель эффективности, %</b> |           |                          |      | <b>3,70</b>                    |                          |      | <b>5,44</b>                    |                          |      | <b>10,48</b>                   |
| Жесткость системы                               | № датчика | Каркас с нагрузкой 12 кг |      |                                | Каркас с нагрузкой 20 кг |      |                                | Каркас с нагрузкой 25 кг |      |                                |
|   |           | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % | Средняя круговая частота |      | Эффект внедрения сердечника, % |
|   |           | МКП                      | МКП  |                                | МКП                      | МКП  |                                |                          |      |                                |
| 4 пружины                                       | 9         | 9,71                     | 8,96 | 7,78                           | 8,60                     | 8,46 | 1,61                           | 8,31                     | 8,13 | 2,11                           |
|   | 10        | 9,75                     | 9,01 | 7,57                           | 8,55                     | 8,44 | 1,20                           | 8,29                     | 8,20 | 1,01                           |
| 3 пружины                                       | 9         | 8,45                     | 7,99 | 5,44                           | 7,51                     | 7,28 | 3,08                           | 7,37                     | 7,12 | 3,33                           |
|   | 10        | 8,40                     | 7,99 | 4,85                           | 7,56                     | 7,36 | 2,60                           | 7,40                     | 7,20 | 2,64                           |
| 2 пружины                                       | 9         | 7,09                     | 6,88 | 2,90                           | 6,40                     | 6,21 | 2,90                           | 6,44                     | 6,18 | 4,07                           |
|   | 10        | 7,06                     | 6,95 | 1,57                           | 6,40                     | 6,25 | 2,44                           | 6,34                     | 6,14 | 3,16                           |
| 1 пружина                                       | 9         | 5,62                     | 5,47 | 2,66                           | 4,76                     | 4,57 | 3,89                           | 5,05                     | 4,84 | 4,08                           |
|   | 10        | 5,61                     | 5,45 | 2,76                           | 4,77                     | 4,72 | 1,02                           | 5,08                     | 4,95 | 2,62                           |
| <b>Максимальный показатель эффективности, %</b> |           |                          |      | <b>7,78</b>                    |                          |      | <b>3,89</b>                    |                          |      | <b>4,08</b>                    |

Исследование демпфирующих свойств каркасов с различными типами сердечников требует не только анализа частотных характеристик, но и оценки энергетических потерь в системе. Для количественного сравнения эффективности каркасов с полыми стержнями (МКП) и трубобетонными сердечниками (МКТ) рассчитан декремент колебаний (табл. 3.8). Этот параметр позволяет определить, насколько эффективно каждый из каркасов рассеивает энергию вибраций, что особенно важно при выборе оптимальной конструкции для систем с динамическими нагрузками.

Таблица 3.8 – Декремент колебаний при расположении макета под углом 0°

| Жесткость системы | Каркас без нагрузки |       |  | Каркас с нагрузкой 10 кг |       |  | Каркас с нагрузкой 20 кг |       |  |
|-------------------|---------------------|-------|--|--------------------------|-------|--|--------------------------|-------|--|
|                   | Декремент колебаний |       | Эффект внедрения бетонного сердечника, % | Декремент колебаний      |       | Эффект внедрения бетонного сердечника, % | Декремент колебаний      |       | Эффект внедрения бетонного сердечника, % |
|                   | МКП                 | МКП   |  | МКП                      | МКТ   |  | МКП                      | МКТ   |  |
| 4 пружины         | 0,206               | 0,210 | 1,96                                     | 0,261                    | 0,214 | -17,82                                   | 0,243                    | 0,553 | 127,77                                   |
| 3 пружины         | 0,187               | 0,168 | -10,54                                   | 0,220                    | 0,209 | -4,84                                    | 0,226                    | 0,438 | 93,60                                    |
| 2 пружины         | 0,185               | 0,330 | 77,91                                    | 0,211                    | 0,240 | 13,61                                    | 0,202                    | 0,527 | 160,88                                   |
| 1 пружина         | 0,225               | 0,327 | 45,40                                    | 0,190                    | 0,312 | 63,99                                    | 0,171                    | 0,159 | -6,94                                    |

Влияние бетонного сердечника на демпфирование: внедрение бетонного сердечника (МКТ) приводит к значительному изменению декремента колебаний по сравнению с полыми стержнями (МКП). При нагрузке 20 кг в большинстве случаев наблюдается увеличение декремента более чем на 50% (до 160,88%), что свидетельствует о существенном улучшении способности системы рассеивать энергию колебаний. Однако при отсутствии нагрузки и нагрузке 10 кг наблюдается значительный разброс значений: эффект варьируется от отрицательных величин (до -17,82% при 10 кг) до положительных (до +77,91% при 0 кг), что указывает на сложную зависимость демпфирующих свойств от массы и жесткости системы.

Зависимость от нагрузки: при нагрузке 20 кг каркас с бетонным сердечником (МКТ) демонстрирует более высокий декремент колебаний в трех из четырех исследованных конфигураций, достигая максимального значения +160,88%, что подтверждает его эффективность в условиях значительных динамических воздействий. При меньших нагрузках (10 кг) результаты противоречивы: в одних случаях наблюдается улучшение демпфирования (до +63,99%), в других — ухудшение (до -17,82%). Это может быть связано с нелинейным поведением системы или особенностями экспериментальных условий.

### Выводы по главе 3

1. **Экспериментально установлены количественные зависимости влияния жесткости системы и величины нагрузки на демпфирующие свойства.** Показано, что увеличение жесткости системы (количество пружин) приводит к росту собственной частоты колебаний. Оптимальные параметры демпфирования достигаются при 3–4 пружинах и нагрузке до 12 кг, что является важным результатом для проектирования.

2. **Установлена зависимость эффективности демпфирования от направления динамического воздействия.** Максимальная эффективность сердечника зафиксирована при поперечных нагрузках ( $0^\circ$ ), где демпфирование достигало 10,48%. При углах  $45^\circ$  и  $90^\circ$  эффект снижался до 5–8%, что подтверждает целесообразность применения трубобетона преимущественно для гашения поперечных колебаний.

3. **Получены экспериментальные данные, подтверждающие снижение собственной частоты колебаний каркаса при использовании трубобетонных колонн (МКТ) по сравнению с полами (МКП).** Этот результат свидетельствует о снижении риска резонанса и улучшении виброзащиты конструкции. Сдвиг частот в низкочастотную область особенно важен для гашения импульсных нагрузок, минимизации влияния ветровых/сейсмических воздействий.

4. **Проведен анализ декремента колебаний, позволивший дать энергетическую оценку демпфирующих свойств.** Показано, что бетонный сердечник значительно улучшает рассеивание энергии колебаний, особенно при нагрузках 20 кг (увеличение декремента до 160,88%). Вариативность результатов при малых нагрузках (до 10 кг) указывает на сложный, нелинейный характер демпфирования и требует дальнейшего изучения.

5. **Апробирована методика масштабного моделирования (М1:6) с соблюдением законов подобия.** Корректный учет масштабных коэффициентов ( $\lambda=6$ ) и высокая точность измерений (разброс частот  $\leq 0,25\%$ ) подтвердили достоверность результатов и возможность их переноса на реальные конструкции.

Таким образом, в главе получено экспериментальное обоснование повышения демпфирующих свойств стальных конструкций для эксплуатации подъемно-транспортных машин за счет внедрения бетонного сердечника. Полученные результаты подтвердили, что трубобетонные элементы значительно улучшают динамические характеристики каркасов, и могут быть использованы при проектировании промышленных сооружений, подверженных вибрациям.

## ГЛАВА 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СТАЛЬНЫХ И ТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 4.1. Разработка алгоритмов анализа узловых соединений стальных трубчатых элементов с использованием численного моделирование фланцевых соединений

В рассмотренных ранее моделях использовались сплошные трубы. Однако, будучи лабораторными образцами, они имеют ограниченные размеры, тогда как реализация полномасштабных трубобетонных конструкций в реальных условиях неизбежно требует соединения нескольких заранее изготовленных деталей. Надежность таких составных конструкций определяется не только работой составляющих ее элементов, но и точностью расчета узловых соединений [276]. Одним из наиболее распространенных вариантов соединения труб является фланцевое. В связи с этим возникает необходимость уточнения напряженного состояния, влияющего на работу данных сопряжений. Поэтому данный параграф посвящен моделированию и анализу фланцевых соединений для их последующего применения в составе трубобетонных конструкций.

Расчет фланцевых соединений в России регламентируется руководствами [277, 278], составленными в дополнение к соответствующим главам Строительные материалы и изделия СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» (Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*) [279], справедливых для СП 53-102–2004 «Общие правила проектирования стальных конструкций» [280]. Эти руководства, выпущенные в 1981 и 1988 г. устарели, и не имеют статуса нормативной литературы, являясь справочными материалами. Таким образом действующих норм по проектированию фланцевых соединений в России нет. Для полноценного анализа работы фланцевых соединений необходимо изучить методы расчета, используемые в других странах [281-283].

Тем не менее в последние годы Россия стремится увеличить долю зданий и сооружений различного рода на металлокаркасах. Однако в области расчета и использования фланцевых соединений Россия отстала от передовых стран, таких как Китай, США, Великобритания и пр. Применение зарубежного опыта возможно, но зачастую противоречит действующим российским нормам [277, 278]. Так, например, Еврокод [281] и британские нормы [282] учитывают пластическое распределение усилий в болтах, тогда как российские нормы этого не делают. В британской литературе расчетное сопротивление болтов класса прочности 8.8 при разрыве составляет 560 МПа [283], а в России — 400–450 МПа, при этом болты класса 8.8 в России не считаются высокопрочными. В Европе предпочтение отдается болтам класса 8.8 и реже 10.9 из-за их меньшей пластичности, в то время как в России фланцевые соединения выполняются на

высокопрочных болтах. Но главным отличием является состав сортамента металлопроката и типовые решения узлов. Например, в Англии, принятые для их сортамента узлы, могут абсолютно не подходить для российского сортамента.

Изучение статей в различных научных журналах показало, что результаты, полученные при натуральных испытаниях полноразмерных моделей и расчетных моделей, имеют высокую степень сходимости. Кроме того, компьютерные исследования моделей в программных комплексах обладают рядом преимуществ. Во-первых, они позволяют исключить ложные показания измерительных приборов, основываясь на данных расчетной модели. Во-вторых, экспериментальные данные помогают корректировать неточности расчетной модели, задавая правильные параметры для точного отображения напряженно-деформированного состояния соединения.

Все это позволяет оценить реальное напряженно-деформированное состояние и использовать расчетную модель в практических целях для создания более совершенных изделий [A9,A13,A22,A24,A27,A28]. Кроме того, многие задачи требуют значительных затрат на экспериментальную реализацию, поэтому компьютерное математическое моделирование зачастую становится единственным возможным способом экспресс-анализа инженерной проблемы.

#### 4.1.1. Численное моделирование и анализ фланцевого соединения круглых стальных труб

В программном комплексе *IDEA StatiCa* были замоделированы и рассчитаны 4 варианта исполнения фланцевых узлов круглых стальных труб с толщинами фланца равными 25, 27, 30, 36, 40 мм: непрорезной фланцевый узел без ребер жесткости (рис. 4.1,а), прорезной фланцевый узел без ребер жесткости (рис. 4.1,б), непрорезной фланцевый узел с ребрами жесткости (рис. 4.1,в), прорезной фланцевый узел с ребрами жесткости (рис. 4.1,г) [A12,A14,A21].

Для упрощения расчета материалоемкости длина труб принята 1 м.

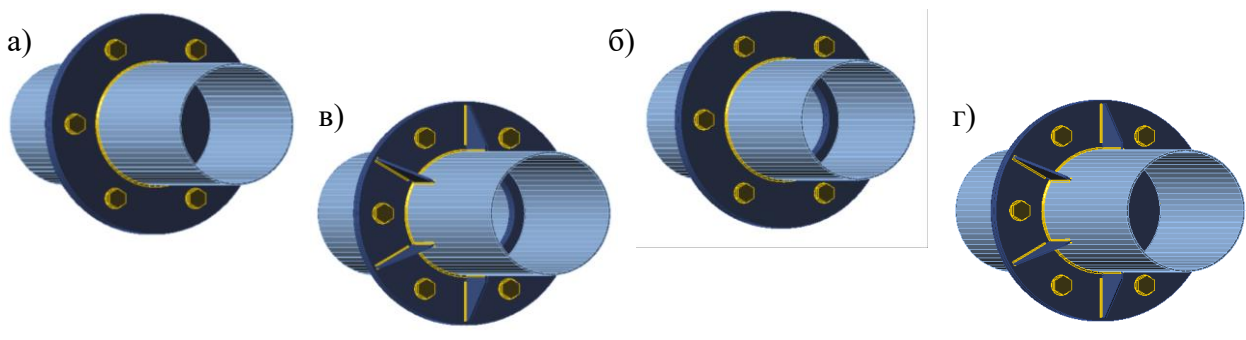


Рисунок 4.1 - варианты конструкций фланцевого узла из круглых труб: а) непрорезной узел без ребер жесткости; б) прорезной узел без ребер жесткости; в) непрорезной узел с ребрами жесткости; г) прорезной узел с ребрами жесткости

После произведения расчета представленные варианты узлов сравнивались по следующим показателям: зависимость напряжения в пластине фланца, напряжения в трубе, напряжения в ребрах жесткости, напряжения в сварном шве присоединения трубы к фланцу, максимальные растягивающие усилия в болтах от толщины фланца. Результаты сравнения представлены на рисунках 4.2 – 4.8 в форме графиков. Более подробный анализ результатов, полученных в процессе компьютерного моделирования представлен в монографии [А14].

*Напряжения в теле трубы (рис. 4.2)*

В местах приварки ребер жесткости наблюдается локальная концентрация напряжений в теле трубы. В узлах без ребер жесткости локальная концентрация в теле трубы наблюдается в месте стыка ее с пластиной фланца.

Напряжения в теле трубы не зависят от толщины фланца.

Наибольшие напряжения в трубе наблюдаются в непрорезном и прорезном узлах с ребрами жесткости – 249,0 МПа, при этом максимальные напряжения превышают расчетные сопротивления стали. Это незначительные области, и они компенсируются пластикой. В прорезном и непрорезном узлах без ребер жесткости напряжения наименьшие – 202,9 МПа и 204,2 МПа соответственно.

*Напряжения в пластине фланца (рис. 4.3)*

Напряжения в пластине фланца во всех типах исполнения узлов максимальны в местах контакта с болтами. При увеличении толщины пластины фланца напряжения в нем уменьшаются.

При больших толщинах фланца уровень напряжения в нем (при непрорезном исполнении) с ребрами жесткости и без них почти одинаковые, но при уменьшении толщины фланца напряжение в узле без ребер жесткости растет быстрее.

Максимальные напряжения наблюдаются в прорезном узле без ребер жесткости. Напряжения в прорезном узле с ребрами жесткости схожи с напряжениями непрорезных узлов.

*Напряжения в ребрах жесткости (рис. 4.4)*

Наименьшие напряжения в ребрах жесткости у прорезного и непрорезного узлов практически одинаковы и равны 177,9 и 176,1 МПа соответственно при толщине фланца 40 мм.

*Напряжения в сварном шве (рис. 4.5)*

Наибольшие напряжения в сварном шве наблюдаются при толщине фланца 25 мм. В порядке уменьшения максимальных напряжений: прорезной узел без ребер жесткости – 240,1 МПа, непрорезной узел без ребер жесткости – 239,4 МПа, прорезной узел с ребрами жесткости – 203,0 МПа, непрорезной узел с ребрами жесткости – 200,3 МПа.

*Растягивающие усилия в болтах (рис. 4.6)*

Наименьшие растягивающие усилия в болтах наблюдаются при максимальной толщине фланца 40 мм. В порядке убывания величин растягивающих усилий в болтах узлы идут в следующей последовательности: прорезной узел без ребер жесткости – 146,1 кН, далее в непрорезной узел без ребер жесткости – 113,3 кН, затем в прорезной узел с ребрами жесткости – 103,2 кН. В непрорезном узле с ребрами жесткости растягивающие усилия в болтах наименьшее 92,0 кН.

#### Несущая способность (рис. 4.7)

Наибольшей несущей способностью обладают непрорезной и прорезной фланцевые узлы с ребрами жесткости  $\approx 194,0\%$ .

У непрорезного фланцевого узла без ребер жесткости несущая способность 112,0-120,1 %.

У прорезного узла без ребер жесткости несущая способность наименьшая 106,0-116,4 %.

#### Материалоемкость (рис. 4.8)

Наиболее материалоемкий узел – непрорезной узел с ребрами жесткости 194,7-236,6 кг. Менее материалоемким является непрорезной фланцевый узел без ребер жесткости 189,8-232,4 кг. Далее прорезной узел с ребрами жесткости 180,8-214,4 кг. Наименее материалоемкий – прорезной узел без ребер жесткости 175,9-210,2 кг.

Площадь использования материала больше у прорезного узла без ребер жесткости, далее прорезного с ребрами жесткости, далее непрорезного без ребер жесткости, у непрорезного узла с ребрами жесткости площадь использования самая маленькая.

Коэффициенты для трех форм потери устойчивости представлены в таблице 4.1.

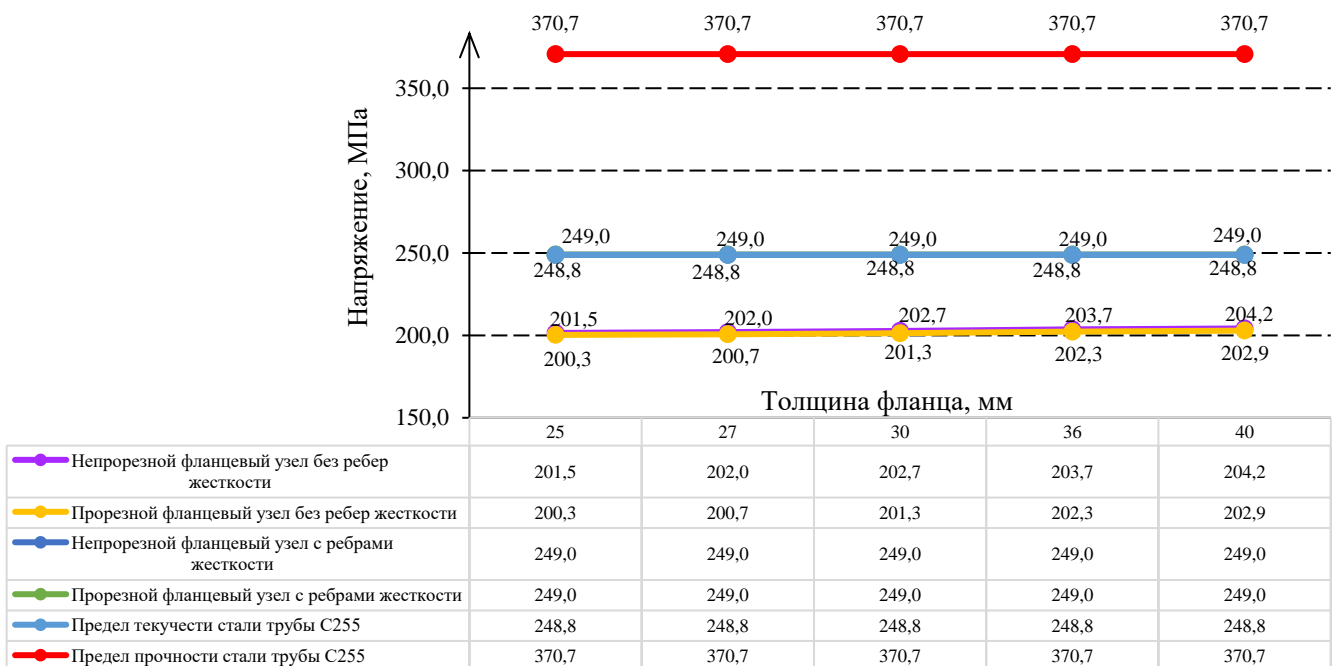


Рисунок 4.2 – Зависимость напряжения в теле трубы от толщины пластины фланца

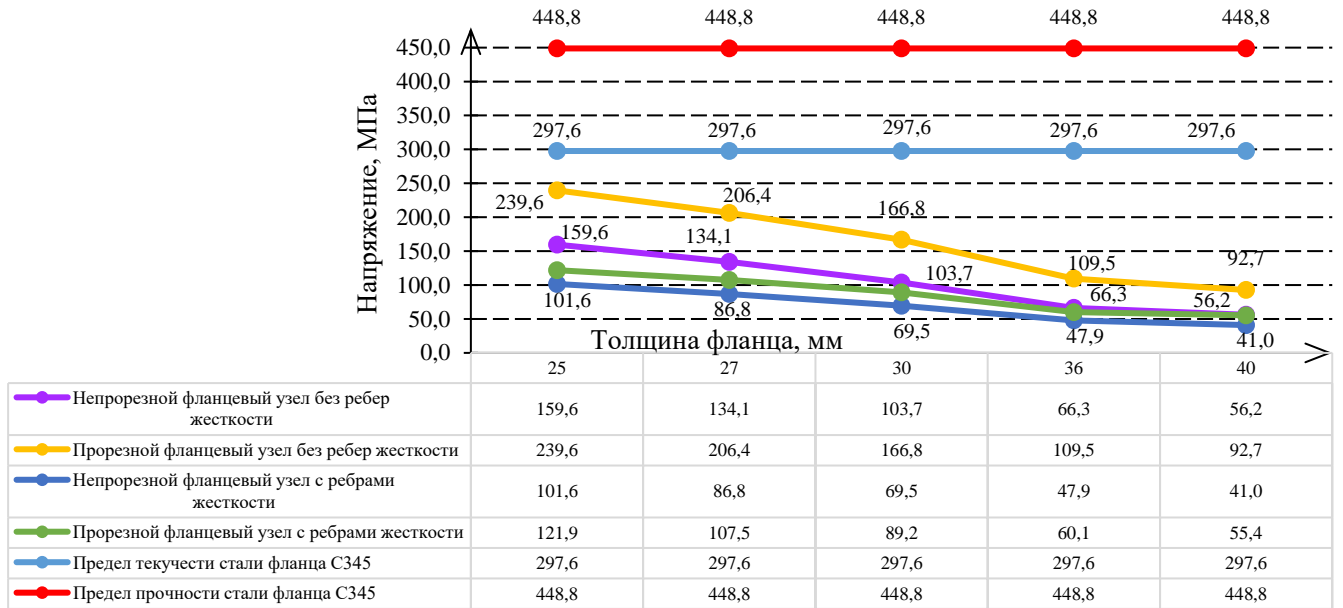


Рисунок 4.3- Зависимость напряжения в пластине фланца от его толщины

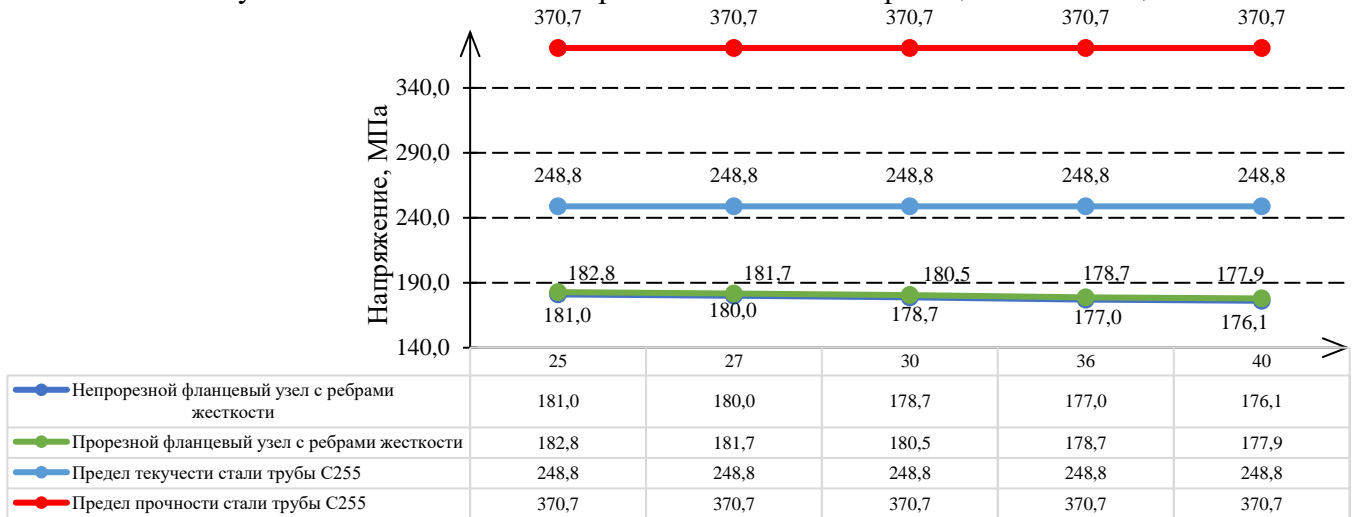


Рисунок 4.4 - Зависимость напряжения в ребре жесткости от толщины пластины фланца

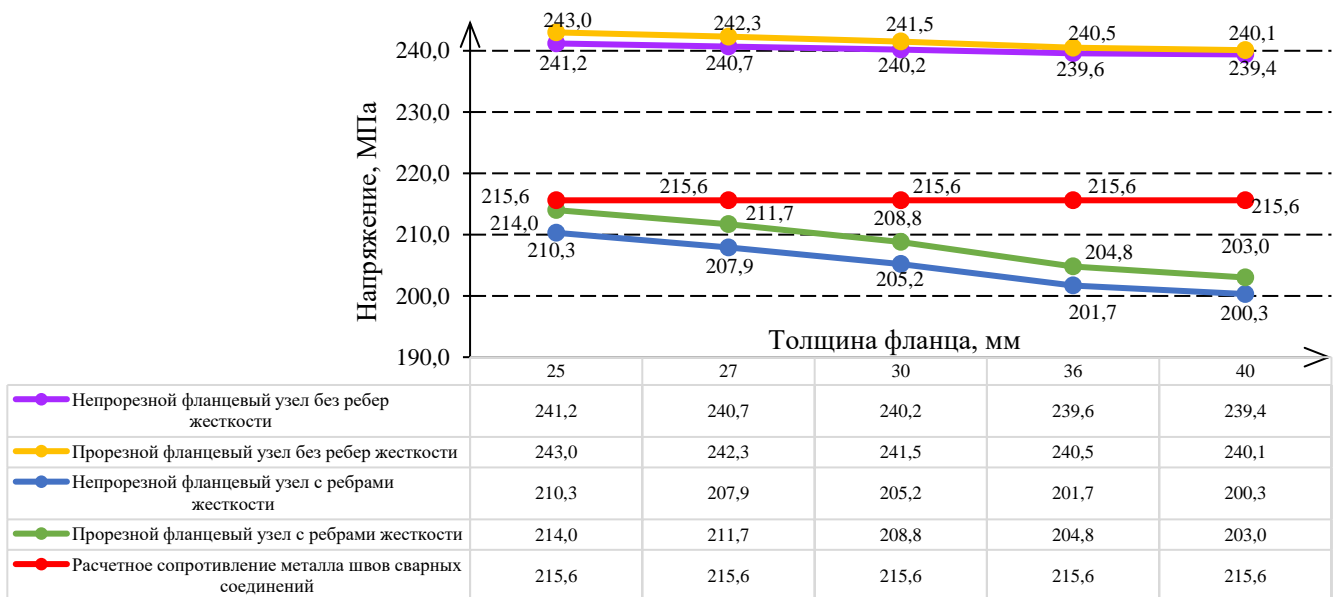


Рисунок 4.5 - Зависимость напряжения в сварном шве от толщины пластины фланца

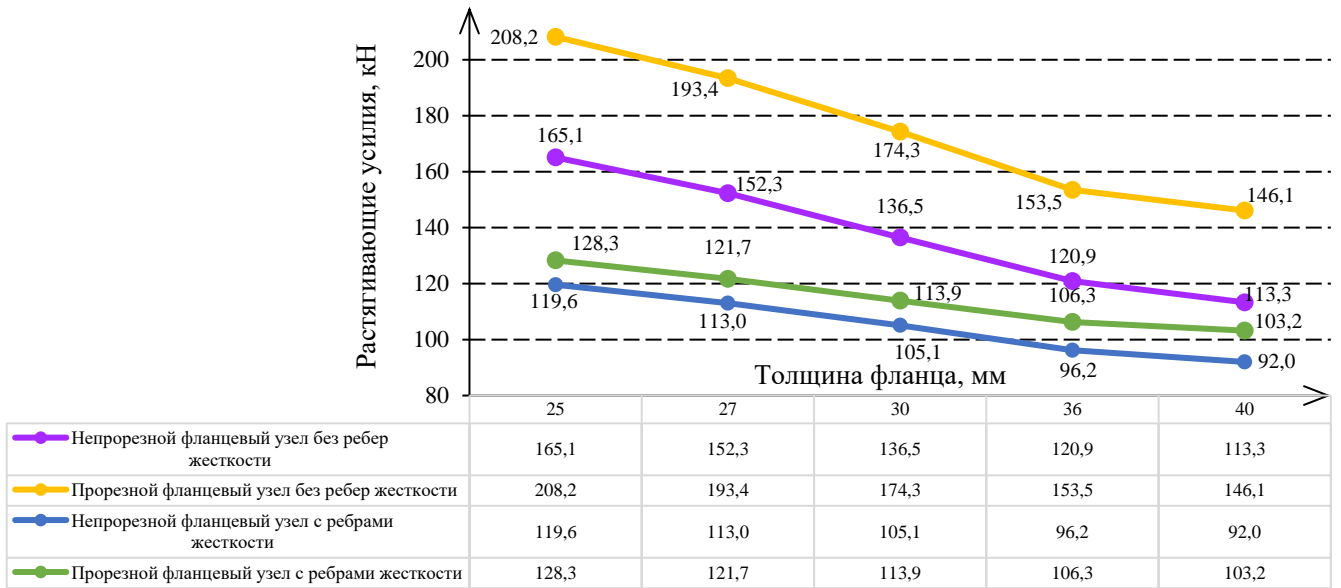


Рисунок 4.6 - Зависимость растягивающего усилия в болтах от толщины пластины фланца

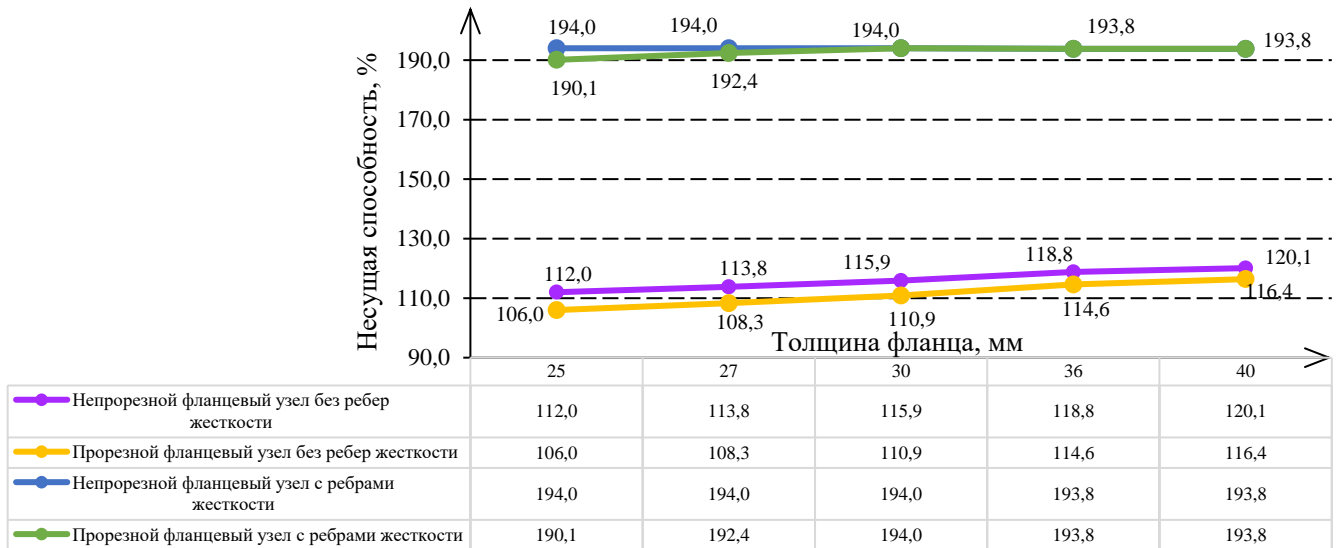


Рисунок 4.7 - Зависимость несущей способности от толщины пластины фланца

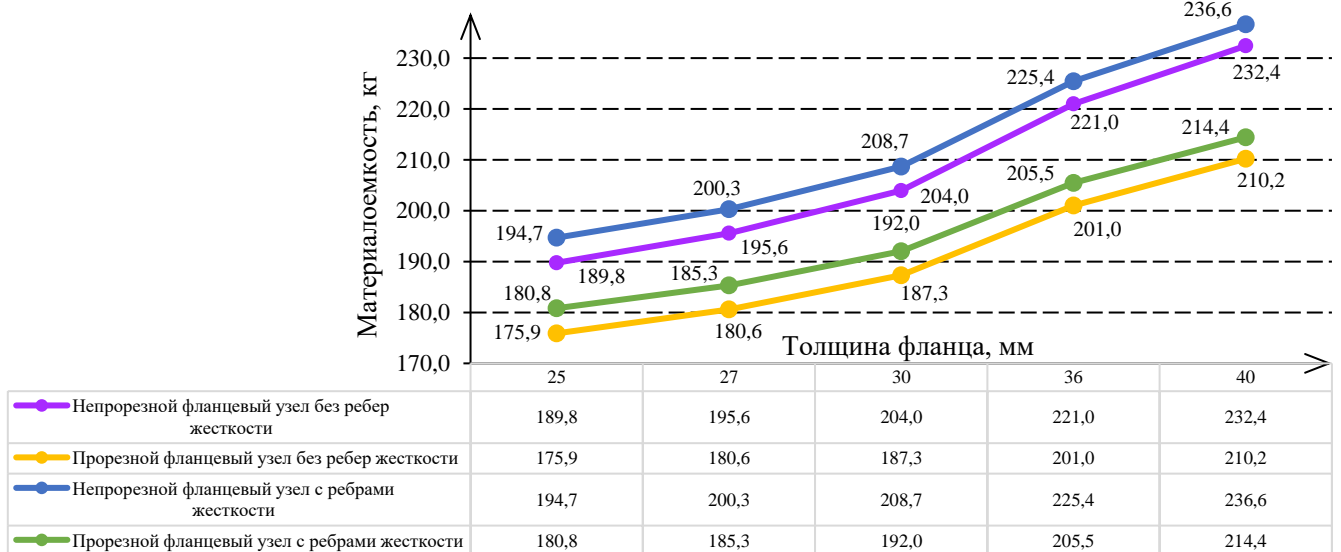


Рисунок 4.8 - Зависимость материалоемкости от толщины пластины фланца

Таблица 4.1 – Коэффициенты потери устойчивости узлового соединения из круглых труб

| <b>Фланцевый узел из круглых труб</b>                |                                      |       |       |       |       |       |
|--|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | Форма<br>потери<br>устойчи-<br>вости | 25 мм | 27 мм | 30 мм | 36 мм | 40 мм |
| Непрорезной фланцевый<br>узел без ребер жесткости    | <b>1</b>                             | 19,98 | 20,14 | 20,29 | 20,32 | 20,34 |
|  | <b>2</b>                             | 20,01 | 20,15 | 20,29 | 20,32 | 20,35 |
|  | <b>3</b>                             | 20,02 | 20,16 | 20,30 | 20,38 | 20,40 |
| Прорезной фланцевый<br>узел без ребер жесткости      | <b>1</b>                             | 19,09 | 19,46 | 19,86 | 20,20 | 20,31 |
|  | <b>2</b>                             | 19,15 | 19,49 | 19,86 | 20,20 | 20,31 |
|  | <b>3</b>                             | 19,41 | 19,66 | 19,92 | 20,21 | 20,31 |
| Непрорезной фланцевый<br>узел с ребрами<br>жесткости | <b>1</b>                             | 20,10 | 20,14 | 20,19 | 20,26 | 20,29 |
|  | <b>2</b>                             | 20,11 | 20,15 | 20,20 | 20,27 | 20,29 |
|  | <b>3</b>                             | 20,25 | 20,29 | 20,34 | 20,40 | 20,43 |
| Прорезной фланцевый<br>узел с ребрами<br>жесткости   | <b>1</b>                             | 20,00 | 20,06 | 20,12 | 20,20 | 20,23 |
|  | <b>2</b>                             | 20,00 | 20,06 | 20,13 | 20,21 | 20,24 |
|  | <b>3</b>                             | 20,12 | 20,19 | 20,26 | 20,34 | 20,37 |

#### **4.1.2. Численное моделирование и анализ фланцевого соединения гнутосварных труб прямоугольного сечения**

В программном комплексе *IDEA StatiCa* были замоделированы и рассчитаны 6 вариантов исполнения фланцевого узла для стыковки гнутосварных труб прямоугольного сечения 300x200x8 мм с толщинами фланца равными 25, 27, 30, 36, 40 мм: непрорезной фланцевый узел без ребер жесткости (рис. 4.9,а), прорезной фланцевый узел без ребер жесткости (рис. 4.9,б), непрорезной фланцевый узел с ребрами жесткости на гранях профиля (рис. 4.9,в), прорезной фланцевый узел с ребрами жесткости на гранях профиля (рис. 4.9,г), непрорезной фланцевый узел с ребрами жесткости по углам профиля (рис. 4.9,д), прорезной фланцевый узел с ребрами жесткости по углам профиля (рис. 4.9,е) [A14,A23,A25,A26].

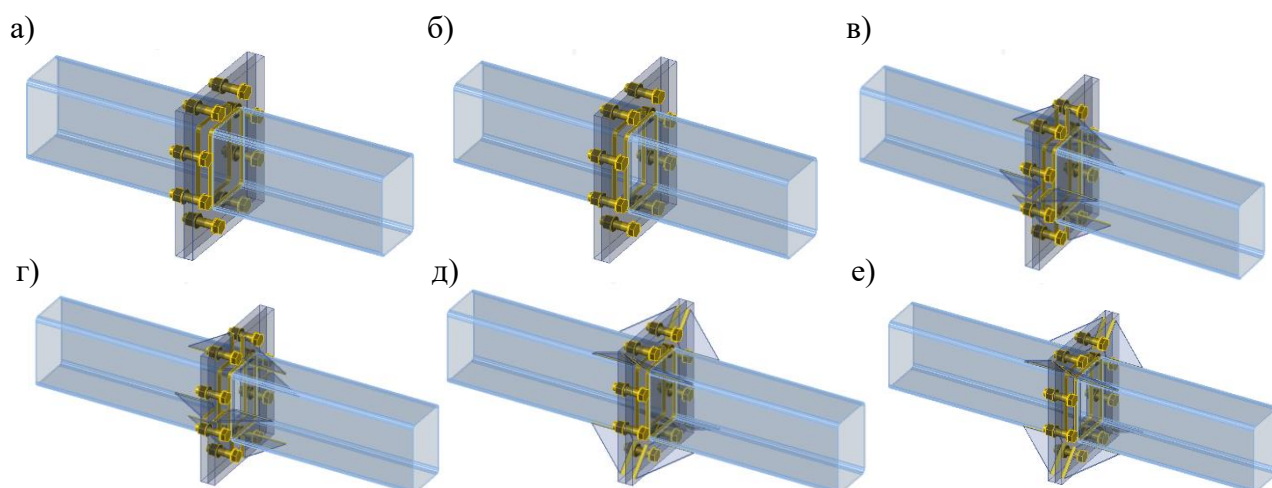


Рисунок 4.9- варианты конструкций фланцевого узла из гнутосварных труб прямоугольного сечения: а) непрорезной узел без ребер жесткости; б) прорезной узел без ребер жесткости; в) непрорезной узел с ребрами жесткости на гранях профиля; г) прорезной узел с ребрами жесткости на гранях профиля; г) непрорезной узел с ребрами жесткости по углам профиля; е) прорезной узел с ребрами жесткости по углам профиля;

Для упрощения расчета материалоемкости длина труб принята 1.

#### Сравнение результатов расчета

Зависимости напряжения в пластине фланца, напряжения в трубе, напряжения в ребрах жесткости, напряжения в сварном шве присоединения трубы к фланцу, максимальные растягивающие усилия в болтах от толщины фланца представлены на графиках 4.10 – 0.88.

##### *Напряжения в теле трубы (рис. 4.10)*

В местах приварки ребер жесткости наблюдается локальная концентрация напряжений в теле трубы. В узлах без ребер жесткости локальная концентрация в теле трубы наблюдается в месте стыка ее с пластиной фланца.

Напряжения в трубе не зависят от толщины фланца.

Наибольшие напряжения в трубе во всех типах исполнениях узла практически идентичны и равны 248,9 МПа. Значения напряжения в незначительных областях превышают расчетные сопротивления стали и компенсируются пластикой.

##### *Напряжения в пластине фланца (рис. 4.11)*

Напряжения в пластине фланца во всех типах исполнения узлов максимальны в местах контакта с болтами. При увеличении толщины пластины фланца напряжения в нем уменьшаются.

Максимальные напряжения наблюдаются в прорезном узле без ребер жесткости.

Максимальные напряжения в пластине фланца непрорезного и прорезного узлов с ребрами жесткости по 1 варианту меньше, чем непрорезного и прорезного узлов с ребрами жесткости по 2 варианту.

*Напряжения в ребрах жесткости (рис. 4.12)*

Наибольшие напряжения в ребрах жесткости у непрорезного и прорезного узлов в 1 и 2 варианте практически одинаковы и равны: 235,0 МПа и 236,3 МПа - для 1 варианта; 249,0 МПа и 249,1 МПа – для 2 варианта соответственно. Причем в 1 варианте исполнения узла с ребрами жесткости напряжения меньше.

*Напряжения в сварном шве (рис. 4.13)*

Наибольшие напряжения в сварном шве наблюдаются при наименьшей толщине фланца 25 мм в прорезном узле без ребер жесткости – 229,1 МПа, далее в непрорезном узле без ребер жесткости – 228,2 МПа, затем в прорезном и непрорезном узле с ребрами жесткости 2 варианта исполнения – 227,1 МПа и 226,9 МПа соответственно. В непрорезном и прорезном узлах с ребрами жесткости 1 варианта исполнения напряжения в сварке наименьшие – 226,5 МПа.

*Растягивающие усилия в болтах (рис. 4.14)*

Наименьшие растягивающие усилия в болтах наблюдаются при максимальной толщине фланца 40 мм. В порядке убывания растягивающих усилий в болтах узлы идут в следующей последовательности: прорезной узел без ребер жесткости – 121,8 МПа, далее в непрорезной узел без ребер жесткости – 106,6 МПа, затем в прорезной и непрорезной узел с ребрами жесткости 2 варианта исполнения – 102,4 МПа и 93,4 МПа соответственно. В прорезном и непрорезном узлах с ребрами жесткости 1 варианта исполнения растягивающие усилия в болтах наименьшее 77,5 МПа и 74,3 МПа соответственно.

*Несущая способность (рис. 4.15)*

Наибольшей несущей способностью обладают непрорезной и прорезной фланцевые узлы с ребрами жесткости 1 варианта исполнения с одинаковым значением 166,7-165,9 %.

У непрорезного и прорезного фланцевых узлов с ребрами жесткости 2 варианта исполнения несущая способность достигает 143,8-149,5 % и 139,1-145,3% соответственно.

У непрорезного и прорезного узлов без ребер жесткости несущая способность наименьшая 119,0-125,0 % и 113,3-120,8% соответственно.

*Материалоемкость (рис. 4.16)*

Для упрощения расчета длина труб принята 1 м.

Наиболее материалоемкие узлы – непрорезные с ребрами жесткости 1 и 2 варианта исполнения 176,1-204,5 кг и 175,3-203,2 кг соответственно. Менее материалоемким является непрорезной фланцевый узел без ребер жесткости 171,7-199,5 кг. Далее прорезные узлы с ребрами жесткости 1 и 2 варианта исполнения 169,3-192,7 кг и 168,0-191,4 кг соответственно. Наименее материалоемкий – прорезной узел без ребер жесткости 164,3-187,7 кг.

Площадь использования материала больше у прорезного узла без ребер жесткости, далее у прорезных узлов с ребрами жесткости, затем у непрорезных узлов без ребер жесткости. У непрорезного узла с ребрами жесткости площадь использования наименьшая.

Коэффициенты для трех форм потери устойчивости представлены в таблице 4.2.

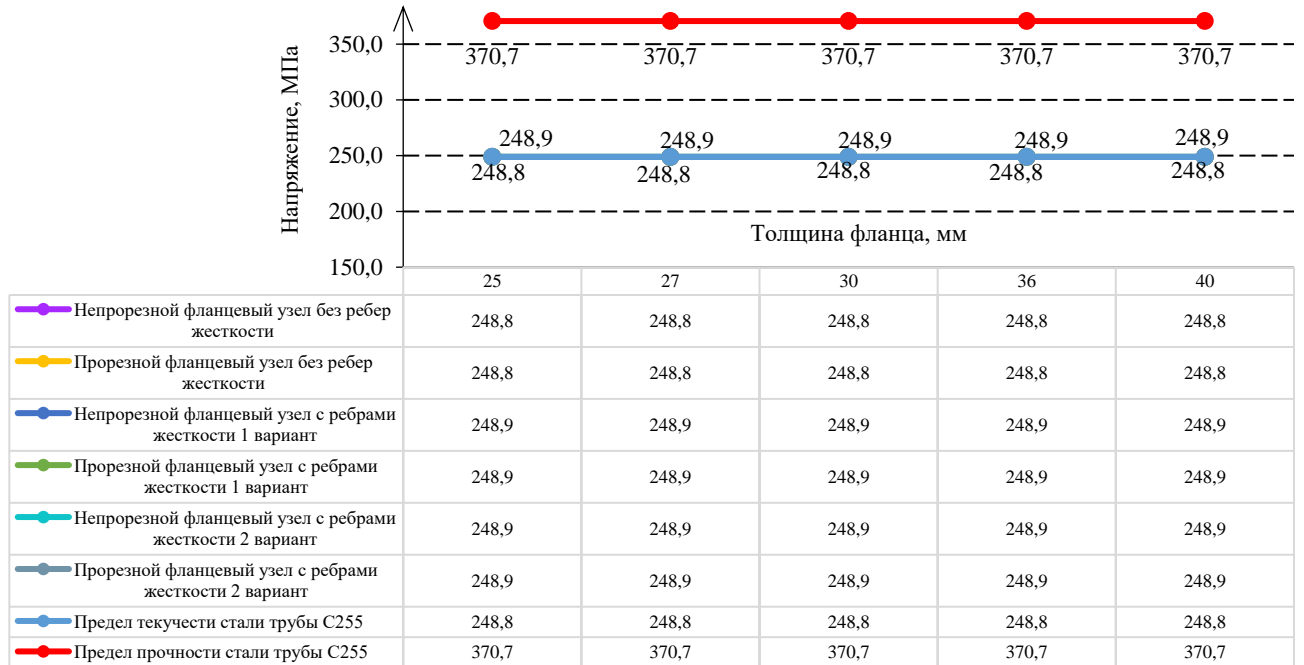


Рисунок 4.10 - Зависимость напряжения в теле трубы от толщины пластины фланца

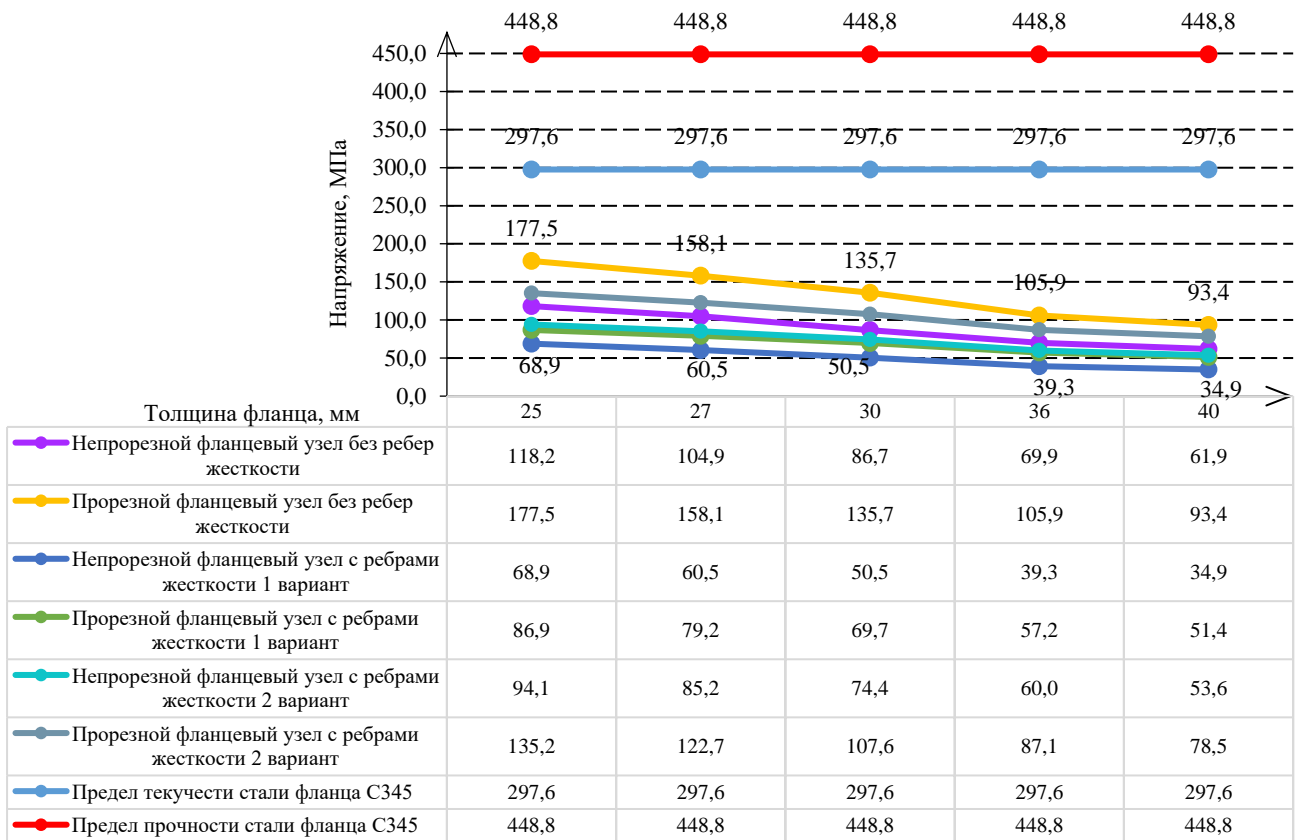


Рисунок 4.11 - Зависимость напряжения в пластине фланца от его толщины



Рисунок 4.12 - Зависимость напряжения в ребре жесткости от толщины пластины фланца

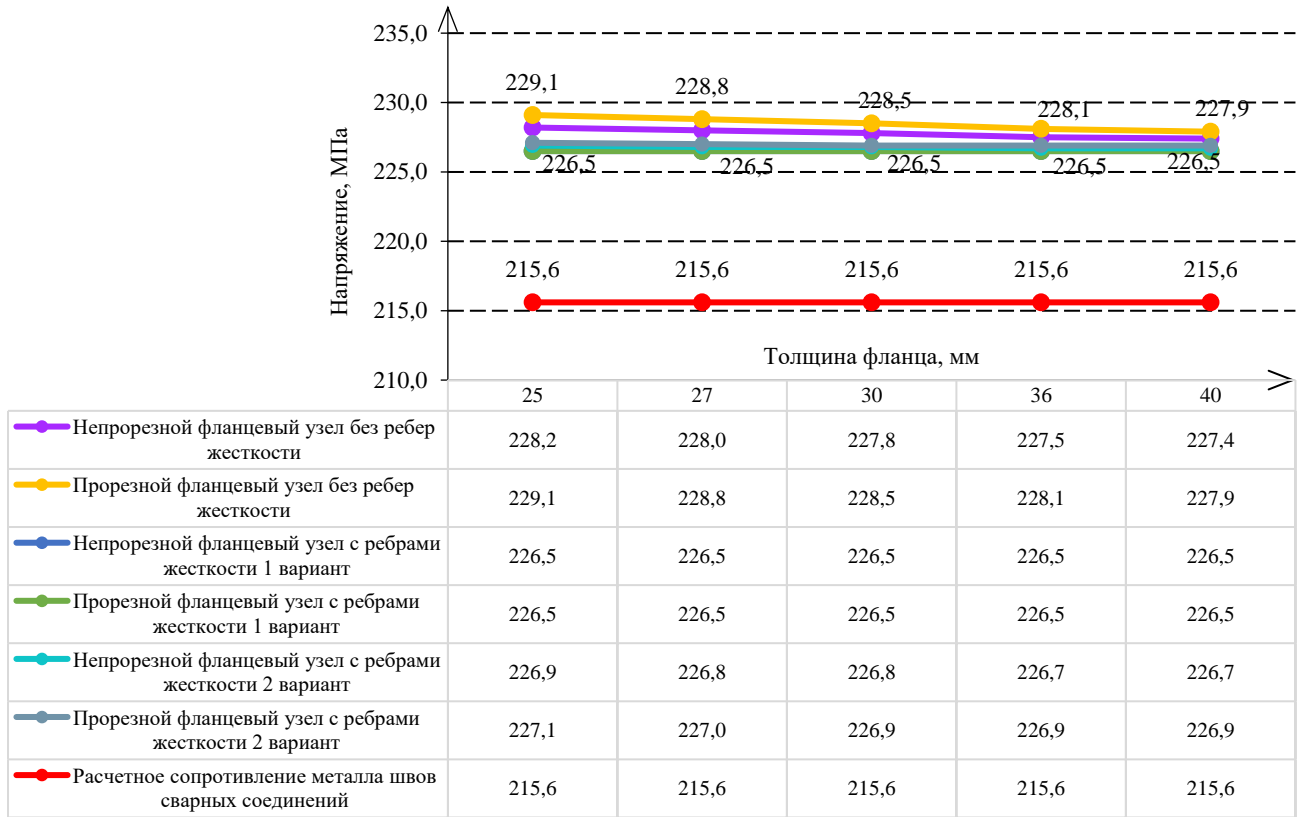


Рисунок 4.13 - Зависимость напряжения в сварном шве от толщины пластины фланца

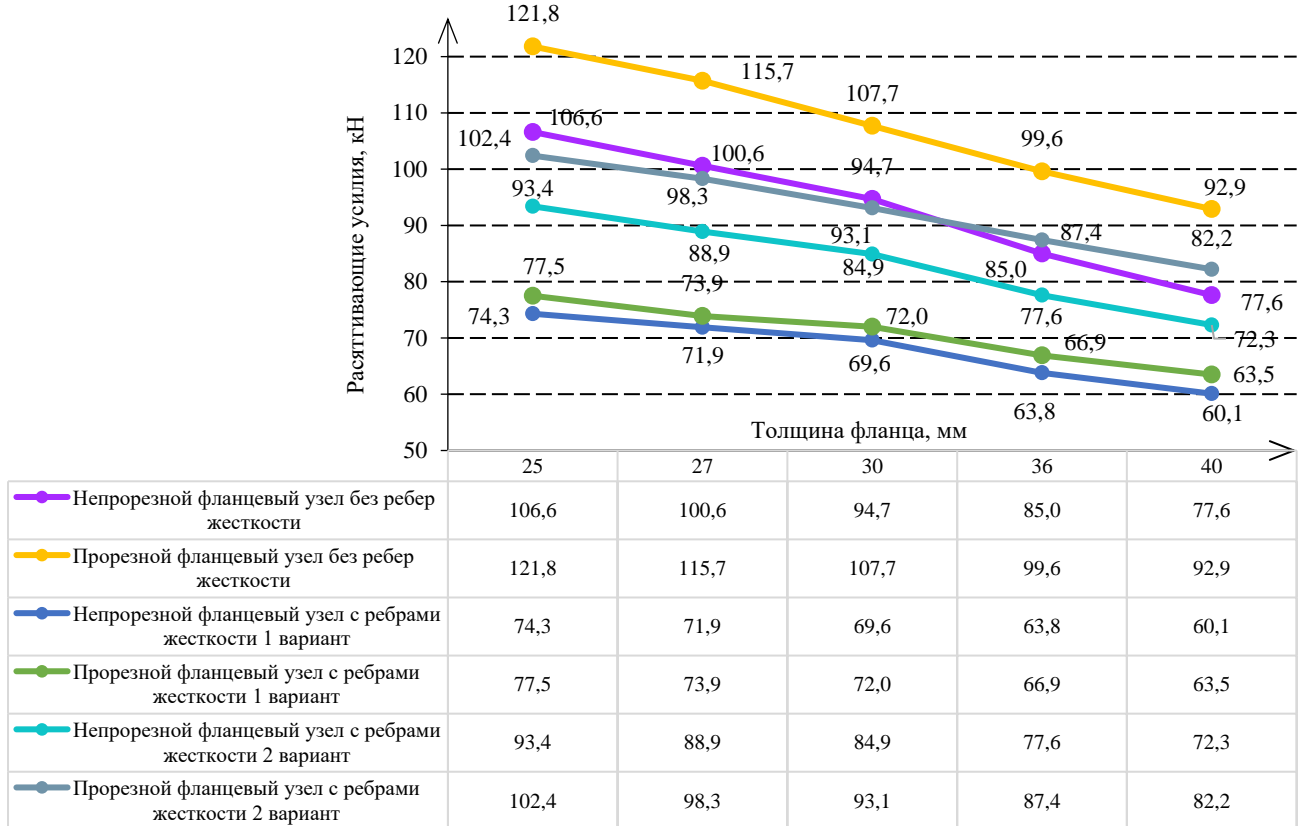


Рисунок 4.14 - Зависимость растягивающего усилия в болте от толщины пластины фланца

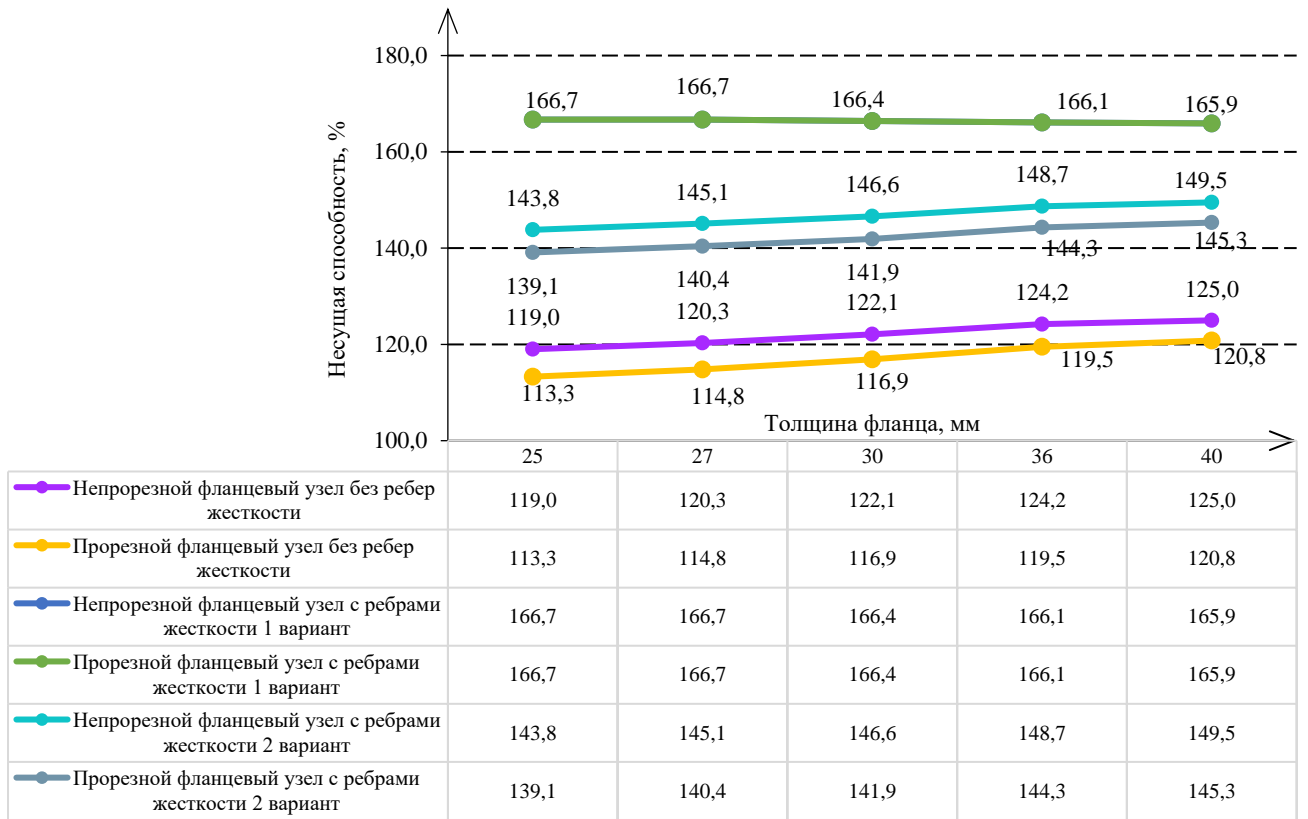


Рисунок 4.15 - Зависимость несущей способности от толщины пластины фланца

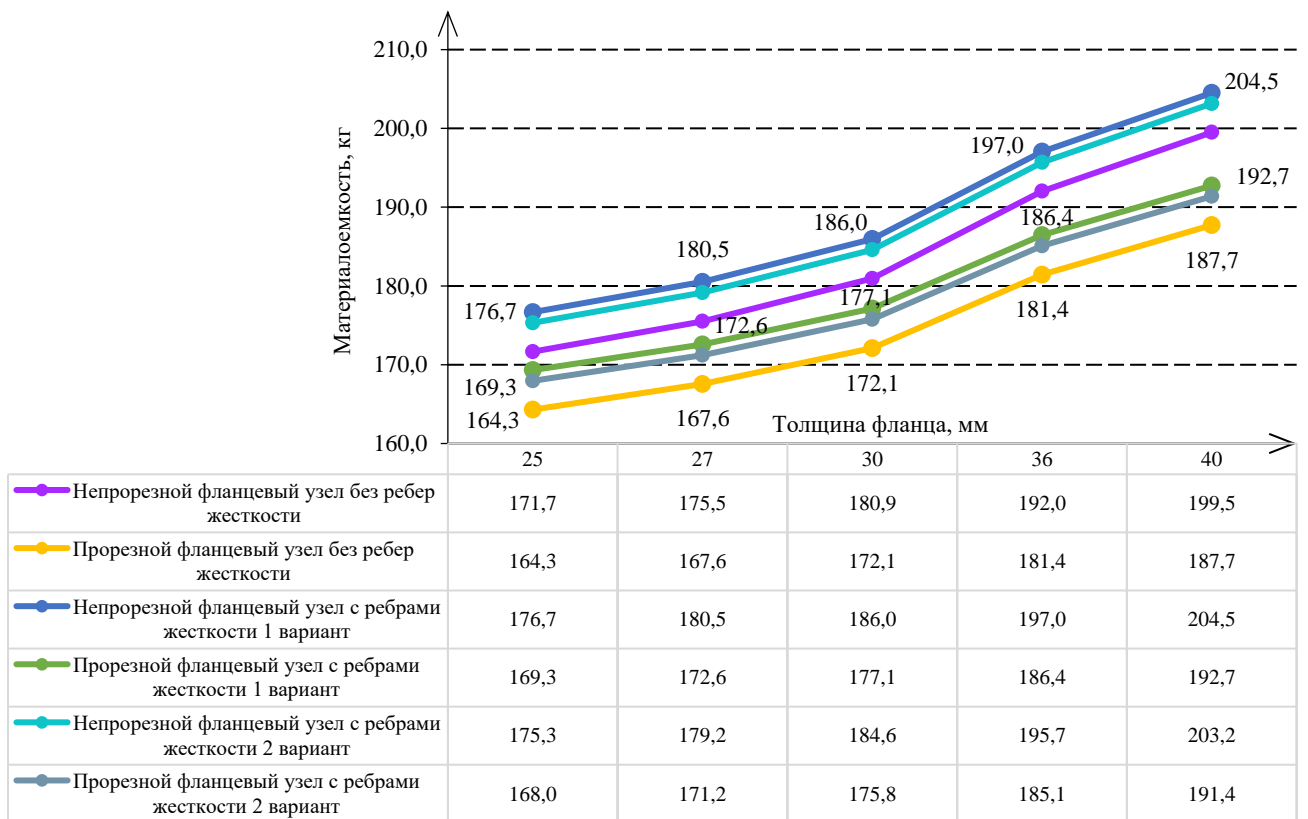


Рисунок 4.16 - Зависимость материалоемкости от толщины пластины фланца

Таблица 4.2 – Коэффициенты потери устойчивости узлового соединения из гнутосварных труб прямоугольного сечения

| <b>Фланцевый узел из гнутосварных труб прямоугольного сечения</b> |                                      |       |       |       |       |       |
|---|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | Форма<br>потери<br>устойчи-<br>вости | 25 мм | 27 мм | 30 мм | 36 мм | 40 мм |
| Непрорезной фланцевый узел без ребер жесткости                    | 1                                    | 9,35  | 9,37  | 9,38  | 9,40  | 9,41  |
|   | 2                                    | 9,85  | 9,85  | 9,86  | 9,86  | 9,85  |
|   | 3                                    | 10,06 | 10,10 | 10,15 | 10,22 | 10,26 |
| Прорезной фланцевый узел без ребер жесткости                      | 1                                    | 9,27  | 9,30  | 9,32  | 9,36  | 9,37  |
|   | 2                                    | 9,82  | 9,82  | 9,83  | 9,83  | 9,83  |
|   | 3                                    | 9,92  | 9,98  | 10,04 | 10,14 | 10,19 |
| Непрорезной фланцевый узел с ребрами жесткости по граням профиля  | 1                                    | 9,18  | 9,18  | 9,17  | 9,15  | 9,14  |
|   | 2                                    | 9,26  | 9,26  | 9,25  | 9,24  | 9,23  |
|   | 3                                    | 10,33 | 10,33 | 10,33 | 10,33 | 10,32 |
| Прорезной фланцевый узел с ребрами жесткости по граням профиля    | 1                                    | 9,18  | 9,17  | 9,17  | 9,15  | 9,14  |
|   | 2                                    | 9,26  | 9,25  | 9,25  | 9,23  | 9,23  |
|   | 3                                    | 10,31 | 10,31 | 10,31 | 10,31 | 10,31 |
| Непрорезной фланцевый узел с ребрами жесткости по углам профиля   | 1                                    | 9,26  | 9,26  | 9,25  | 9,23  | 9,22  |
|   | 2                                    | 9,43  | 9,43  | 9,43  | 9,41  | 9,40  |
|   | 3                                    | 10,97 | 10,97 | 10,97 | 10,96 | 10,96 |
| Прорезной фланцевый узел с ребрами жесткости по углам профиля     | 1                                    | 9,26  | 9,25  | 9,25  | 9,23  | 9,22  |
|   | 2                                    | 9,43  | 9,43  | 9,42  | 9,41  | 9,40  |
|   | 3                                    | 10,96 | 10,96 | 10,96 | 10,95 | 10,95 |

Проведенный анализ различных конструктивных решений фланцевых соединений позволил выявить рациональные варианты (прорезные узлы с ребрами жесткости), обеспечивающие высокую несущую способность при умеренной материалоемкости. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании составных стержневых конструкций из трубчатых профилей. Однако прочность и динамическое поведение системы в целом определяются не только качеством узловых сопряжений, но и достоверным заданием жесткостных характеристик самих несущих элементов — трубобетонных стержней. Корректное описание их деформативных свойств является необходимым условием для получения адекватных результатов при расчете пространственных стержневых систем.

#### 4.2. Методика назначения деформационно-прочностных характеристик для моделирования напряженно-деформированного состояния стержневых элементов

Как было отмечено в предыдущем параграфе, надежность составных конструкций определяется не только работой узлов соединения, но и корректностью задания свойств самих несущих элементов. Проектирование конструкций из трубобетона сопряжено со сложностью точного определения расчетных параметров, ключевым из которых является жесткость составных элементов. Использование стержневых моделей в программных комплексах (например, таких как SCAD) требует назначения жесткостных характеристик, от корректности которых напрямую зависят итоговые усилия в конструкции. Часто для определения жесткостей прибегают к методам численного моделирования. Несмотря на их возможности, такие подходы обладают рядом недостатков (сложность верификации и значительная вычислительная стоимость), что обуславливает актуальность прямого экспериментального определения характеристик.

В рамках данного исследования для назначения жесткостей трубобетонной колонны в стержневой расчетной модели (рис. 4.17) был использован экспериментальный метод.

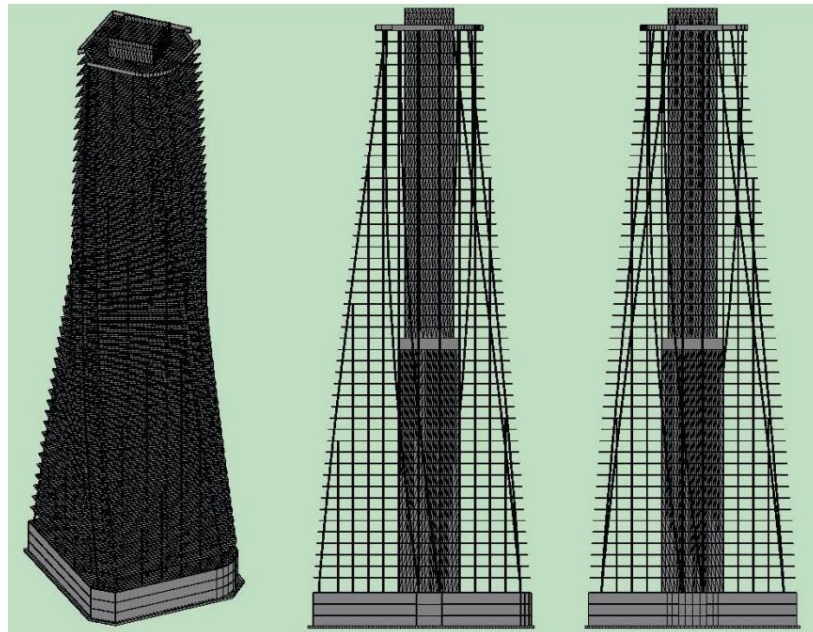


Рисунок 4.17 –Пространственная конечно-элементная расчетная модель, реализованная в ПК SCAD [A3].

1) Определение изгибной жесткости ( $EI$ ) было проведено на основе испытаний длинных образцов трубобетона на изгиб (рис. 4.18). Путем регистрации прогибов двухопорной балки  $\Delta_d$  при известных нагрузках (рис. 4.19) были вычислены фактические значения изгибной жесткости  $EJ_{eq}$ :

$$\Delta_A = \frac{Fl^3}{48EJ_{eq}} \rightarrow EJ_{eq} = \frac{Fl^3}{48\Delta_A} \quad (4.1)$$

где  $l$  – длина испытываемого образца;

$F$  – нагрузка, приложенная к образцу.



а)



б)

Рисунок 4.18 – Определение изгибной жесткости: а) процесс нагружения образца на экспериментальной установке; б) фото испытанных длинных трубобетонных образцов на изгиб для определения изгибной жесткости.

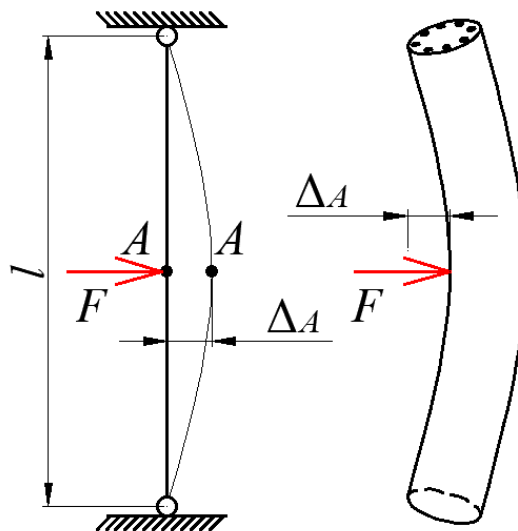


Рисунок 4.19 – Схема определения жесткости стержневого элемента

2) Определение продольной жесткости ( $EA$ ) выполнено в результате осевого нагружения коротких образцов (рис. 4.20). Для сравнения и оценки влияния стальной оболочки параллельно испытывались бетонные образцы-близнецы. Полученные зависимости «нагрузка-деформация» позволили установить продольную жесткость составного сечения.



Рисунок 4.20 – Фото испытания короткого трубобетонного образца на осевое сжатие для определения продольной жесткости.

Жесткости элементов расчетной модели были назначены в соответствии с алгоритмом, описанным в [А3], но на основе экспериментально полученных данных, а не результатов численного моделирования.

При этом использование цифровой модели трубобетонного образца позволяет определить в том числе и напряжения от единичного момента.

Тогда после назначения жесткостей в программно-вычислительном комплексе SCAD и проведения статического расчет здания, целью которого является выявление наихудших комбинаций нагрузок, приводящих к максимальным расчетным усилиям в исследуемой трубобетонной колонне (рис. 4.17), условие прочности для этой колонны можно записать следующим образом [250, А3]:

$$\sigma_{\max} = \sigma_M^{\text{расч}} + \sigma_N^{\text{расч}} = \sigma_M \cdot M_{\text{расч}} + \sigma_N \cdot N_{\text{расч}} \leq R_y, \quad (4.2)$$

где  $\sigma_M^{\text{расч}}$ ,  $\sigma_N^{\text{расч}}$  – нормальные напряжения, вызванные расчетным значением момента и продольной силы соответственно;

$\sigma_M, \sigma_N$  – максимальные нормальные напряжения, возникающие в элементе колонны (бетон, арматура, труба) от действия единичного момента или единичной продольной силы соответственно, определенные на основе данных исследования или твердотельной цифровой модели;

$M_{\text{расч}}, N_{\text{расч}}$  – расчетные значения момента и продольной силы, определенные с помощью пространственной стержневой модели (рис. 4.17);

$R_y$  – расчетное сопротивление материала.

Результаты проверки прочности по двум наименее выгодным комбинациям приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Проверка прочности элементов колонны.

| Комбинация усилий       |                        | Элемент  | $\sigma_M$ , Па | $\sigma_N$ , Па | $\sigma_M^{\text{расч}}$ , МПа | $\sigma_N^{\text{расч}}$ , МПа | $\sigma_{\text{max}}$ , МПа | $R_y$ , МПа | Запас, % |
|-------------------------|------------------------|----------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------|----------|
| $M_{\text{расч}}$ , кНм | $N_{\text{расч}}$ , кН |          |                 |                 |                                |                                |                             |             |          |
| 245                     | 16 675                 | бетон    | 26,36           | 1,16            | 4,99                           | 19,3                           | 42,3                        | 33,0        | 26       |
|                         |                        | арматура | 78,17           | 12,41           | 19,2                           | 207                            | 226,2                       | 436         | 48       |
|                         |                        | труба    | 179,32          | 12,58           | 43,9                           | 210                            | 253                         | 265         | 5        |
| 360                     | 13 035                 | бетон    | 20,36           | 1,16            | 7,33                           | 15,1                           | 22,8                        | 33,0        | 31       |
|                         |                        | арматура | 78,17           | 12,41           | 28,1                           | 162                            | 190,1                       | 436         | 56       |
|                         |                        | труба    | 179,32          | 12,58           | 64,6                           | 164                            | 228,6                       | 265         | 14       |

Полученные данные можно представить в виде диаграммы, визуализирующей процент использования материала различных элементов колонны при каждом из рассмотренных сочетаний напряжений (рис. 4.21).

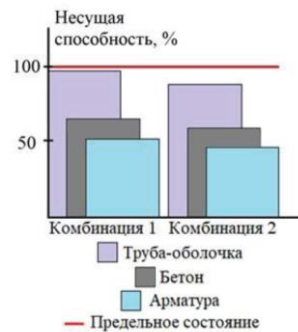


Рисунок 4.21 – Диаграмма, визуализирующая процент использования компонентов трубобетонной колонны [А3]

Проведенный расчет на основе экспериментально назначенных жесткостей показал, что прочность колонны обеспечена. Наиболее нагруженным элементом является стальная труба-оболочка, имеющая минимальный запас прочности (около 5%), в то время как арматура имеет значительный резерв (48-56%). Полученные результаты подтверждают адекватность применения экспериментального метода для определения жесткостных характеристик трубобетонных элементов при проектировании стержневых систем.

На рисунке 4.22 представлены фото образцов после испытания на осевое сжатие. Характер разрушения образцов кардинально различается: бетонный образец разрушился хрупко (рис. 4.22а), путем откола бетона, в то время как трубобетонный образец демонстрирует пластическую работу с образованием зон выпучивания на стальной оболочке (4.22б), что подтверждает положительный эффект от совместной работы материалов.



а)



б)

Рисунок 4.22 – Короткие образцы после разрушения: а) бетонный армированный образец; б) трубобетонный армированный образец

Положительный эффект совместной работы элементов, составляющих трубобетон, можно изобразить в виде диаграммы, представленной на рисунке 4.23 [284].

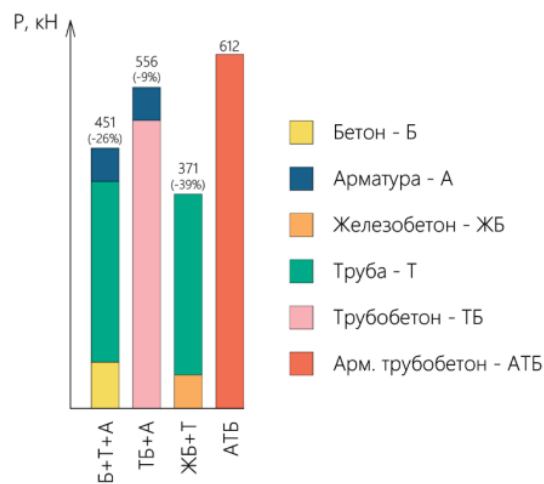


Рисунок 4.23 - Диаграмма сравнения суммы несущих способностей трубы, бетона и арматуры; суммы несущих способностей трубобетона и арматуры, суммы несущих способностей трубы и железобетона, а также армированного трубобетона [284].

## Выводы по главе 4

Проведенные в главе комплексные численные и экспериментальные исследования позволили разработать и апробировать методы анализа и проектирования элементов конструкций из трубчатых профилей и трубобетона. **Полученные результаты** заключаются в следующем:

1. **Разработан и апробирован алгоритм поиска рациональных вариантов фланцевых соединений стальных трубчатых элементов**, обеспечивающий требуемую прочность и надежность при минимизации материалоемкости. На основе анализа напряжённо-деформированного состояния различных конструктивных решений (прорезные/непрорезные, с рёбрами жёсткости и без) установлено, что ключевым фактором повышения несущей способности является не увеличение толщины фланца, а рациональное конструирование узла. **Научная новизна** заключается в определении оптимальных схем для круглых (прорезной узел с рёбрами жёсткости) и прямоугольных (прорезной узел с рёбрами жёсткости по углам профиля) труб, что позволяет снизить материалоемкость на 10-15% без потери несущей способности по сравнению с традиционными решениями.

2. **Предложена и верифицирована экспериментальная методика назначения деформационно-прочностных характеристик (продольной  $EA$  и изгибной  $EI$  жесткостей) для стержневых конечных элементов**, моделирующих трубобетонные конструкции. Методика, в отличие от чисто численных подходов, основана на прямых испытаниях образцов на осевое сжатие и изгиб, что повышает достоверность исходных данных для моделирования. **Научная новизна** методики заключается в ее применимости для прямого использования в стержневых ПВК (на примере SCAD), что существенно упрощает процесс расчёта сложных конструкций с трубобетонными элементами.

3. **Апробирована методика проверки прочности трубобетонных колонн**, основанная на совместном использовании стержневой модели всей конструкции и данных о НДС, полученных для составного сечения. Методика реализует условие прочности (4.1) и позволяет оценить запас прочности каждого компонента колонны (бетон, арматура, стальная труба). Апробация подтвердила адекватность методики: расчёт выявил, что наиболее нагруженным элементом является стальная оболочка, в то время как арматура имеет значительный резерв, что соответствует физической сущности работы композита.

4. **Экспериментально подтверждён положительный эффект совместной работы стальной оболочки и бетонного ядра** в трубобетонном элементе. Установлено, что характер разрушения трубобетона является пластичным, с образованием зон выпучивания стальной трубы, в отличие от хрупкого разрушения железобетонного образца. Это подтверждает высокий

энергорассеивающий потенциал материала, что имеет ключевое значение для его работы при динамических воздействиях.

Таким образом, в главе **решена задача разработки методов моделирования напряженно-деформированного состояния и выбора наиболее рационального варианта соединения стальных и трубобетонных конструкций.** Полученные результаты, обладая признаками научной новизны, развивают методы расчета динамики механических систем применительно к композитным конструкциям и их узловым соединениям, предоставляя инженерно-применимые методики для проектирования перспективных строительных систем.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основании выполненных исследований изложены новые научно обоснованные решения, имеющие значительный вклад в развитие экспериментальных методов исследования характеристик материалов. Основные результаты сводятся к следующему:

1. Разработаны методики экспериментального определения динамических характеристик предварительно напряженных трубобетонных стержней при свободных и вынужденных колебаниях. Установлено, что рост осевой нагрузки от 6,8 до 36,5 кН повышает частоту свободных колебаний до 61,4%. При гармоническом нагружении увеличение мощности воздействия снижает частоту колебаний на 15–50% в зависимости от диаметра образца. Получена полиномиальная зависимость влияния осевой нагрузки на приведенный коэффициент упругости  $E_N$ .

2. На масштабных моделях каркасов (М 1:6) экспериментально доказано, что заполнение стальных колонн бетонным сердечником снижает собственную частоту колебаний конструкции (до 10,5%) и увеличивает декремент колебаний (до 160%). Подтверждена эффективность применения трубобетона в конструкциях для эксплуатации подъемно-транспортных машин для повышения демпфирования.

3. На основе численного моделирования определены рациональные типы фланцевых узлов для круглых и прямоугольных труб (прорезные с ребрами жесткости), позволяющие снизить материалоемкость на 10–15% без потери несущей способности.

4. Предложена экспериментальная методика назначения жесткостных характеристик ( $E_A$ ,  $E_I$ ) для достоверного моделирования трубобетонных конструкций стержневыми элементами в ПК.

5. Разработанные методики, алгоритмы и программы для ЭВМ (свидетельства о государственной регистрации № 2024682661, № 2024689601) внедрены в проектный процесс АО «ТЕМП-АВИА» и проект «Техноплатформа 2035», а также используются в учебном процессе ННГАСУ.

**ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в журналах из перечня рецензируемых изданий по специальности 1.1.7 и приравненные к ним публикации в журналах, индексируемых в международных базах данных:**

A1. **Shkoda, I.V.** Enhancing the damping behaviour of steel crane structures by introducing a concrete core / **I.V. Shkoda**, O. I. Vediaikina, D.A. Loshkaryova // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. – Т. 20 -№. 4. – P. 57-71 - DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-57-71. (**RSCI, Scopus (Q3)**). **Приравнивается к ВАК К1).**

A2. **Шкода, И.В.** Повышение демпфирующих свойств стальных подкрановых конструкций за счет внедрения бетонного сердечника / И.В. Шкода // Машиностроение и инженерное образование. 2024. – № 1-2 (74). - С. 25-34. (**ВАК по 1.1.7 (К3)**).

A3. Kozhanov, D.A. Strength and stability of a pipe-concrete column of a high-rise building / D.A. Kozhanov, P.A. Khazov, **I.V. Shkoda**, S.Yu. Likhacheva // Magazine of Civil Engineering. 2024. - 17(2). - Article No. 12601. – DOI: 10.34910/MCE.126.1. (**WoS (Q4), RSCI, Scopus (Q3)**). **Приравнивается к ВАК К1).**

**Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (приравнивается к ВАК категории К1):**

A4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682661 Российская Федерация. «Определение разрушающей нагрузки для центрально сжатого трубобетонного стержня» : № 2024681197 : заявл. 12.09.2024 : опубл. 26.09.2024 / П. А. Хазов, А. П. Помазов, **И. В. Шкода** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

A5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689601 Российская Федерация. «Расчет динамических параметров материала на основании показаний блока акселерометров» : № 2024687355 : заявл. 14.11.2024 : опубл. 09.12.2024 / П.А. Хазов, А.П. Помазов, С.П. Помазов, **И.В. Шкода**, Л.Ю. Тягунова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

**Публикации в журналах из перечня рецензируемых изданий по смежным специальностям:**

A6. Шкода, И.В. Колебания масштабных моделей подкрановых конструкций при различных направлениях динамического воздействия на основание. / И.В. Шкода, О.И. Ведяйкина, П.А. Хазов // Строительная механика и конструкции. 2025. - № 3 (46). - С. 41-51.

A7. Ерофеев, В.И. Динамические реакции сталебетонных стержней при гармонических нагрузках при действии продольной силы / В.И. Ерофеев, П.А. Хазов, И.В. Шкода, А.С. Торопов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. - 2024. - Т. 26. - № 6. - С. 201–213.

A8. Shkoda, I.V. Economic and constructive optimization of the nodal connections of elements from closed profiles / I.V.Shkoda, O. I. Vediaikina, E.A. Nikitina // Privolzhsky Scientific Journal. - 2024. - № 3 (71). - С. 138-146.

A9. Khazov, P.A. Strength and stability of models of tube-concrete and Reinforced concrete columns / P.A. Khazov, I.V. Shkoda, A.E. Kudryavtsev // Privolzhsky Scientific Journal. - 2024. - № 1 (69). - С. 136-146.

A10. Хазов, П.А. Методика определения динамических параметров материала при свободных колебаниях / П.А. Хазов, И.В. Шкода, Л.Ю. Тягунова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. - 2023. - Т. 25. - № 6. - С. 89–10.

A11. Шкода, И.В. Численный анализ вариантов фланцевых узлов ребристо-кольцевой купольной системы / И.В. Шкода, Б.Б. Лампси, Е.П. Исаева // Приволжский научный журнал. - 2022. - № 2 (62). - С. 58-66.

A12. Ерофеев, В.И. Напряженно-деформированное состояние узла ребристо-кольцевого купола при различных вариантах сопряжения элементов / В.И. Ерофеев, П.А. Хазов, И.В. Шкода // Приволжский научный журнал. - 2020. - № 4 (56). - С. 42-48.

**Монографии:**

A13. Физическое и численное моделирование стальных и сталежелезобетонных конструкций из труб / И.В. Шкода, П.А. Хазов, А.П. Помазов, А.К. Ситникова, Д.А. Кожанов / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. Нижний Новгород, 2023. – 135 с.

**Публикации в сборниках трудов конференций:**

A14. Шкода, И.В. Исследование динамических характеристик макетов каркаса промышленного здания со сквозными трубобетонными колоннами / И.В. Шкода, О.И.

Ведяйкина, П.А. Хазов // Необратимые процессы в природе и технике. Сборник статей XIII Всероссийской конференции. В 2-х томах. - Москва, 2025. – С.267-270.

**A15. Шкода, И.В.** Модельные исследования динамических процессов в подкрановых конструкциях с трубобетонными колоннами / И.В. Шкода, О.И. Ведяйкина // Сб. тезисов. Междунар. конф. Нижегород. фестиваля наук: сб. тезисов. - Нижний Новгород, 2025. – С.82-83.

**A16. Шкода, И.В.** Экспериментальное исследование динамических процессов в сталебетонных конструкциях / И.В. Шкода, О.И. Ведяйкина // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ – 2024): сб. трудов. XVII междунар. науч.-тех. конф. – Москва, 2024. – С. 308-313.

**A17. Шкода, И.В.** Влияние продольной силы на динамический отклик сталебетонных стержней при гармонических нагрузках / И.В. Шкода // Акустика среды обитания: сб. трудов. IX Всерос. конф. молодых ученых и специалистов – Москва, 2024. – С. 415-423.

**A18. Ситникова, А.К.** Экспериментальные исследования динамических характеристик трубобетонных конструкций / К.А. Ситникова, **И.В. Шкода** // Сб. докл. XIII Всерос. фестиваль науки: сб. докл. - Нижний Новгород, 2023. – С. 103-105.

**A19. Тягунова, Л.Ю.** Определение динамических характеристик древесины при экспериментальной оценке уровня колебаний и вибраций / Л.Ю. Тягунова, **И.В. Шкода** // Сб. докл. XII Всерос. фестиваль науки: сб. докл. - Нижний Новгород, 2022. – С. 1292-1295.

**A20. Исаева, Е.П.** Численный анализ вариантов фланцевых узлов ребристо-кольцевой купольной системы / Е.П. Исаева, Н.Г. Абрамян, **И.В. Шкода**, П.А. Хазов // Сб. докл. XII Всерос. фестиваль науки: сб. докл. - Нижний Новгород, 2022. – С. 1281-1288.

**A21. Шкода, И.В.** Оптимизация сопряжения элементов купола / И.В. Шкода, П.А. Хазов // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ - 2020) – 2016: сб. ст. XIV междунар. науч.-тех. конф. – Москва, 2020. – С. 270-273.

**A22. Шкода, И.В.** Анализ прочностных характеристик различных вариаций исполнения фланцевого узла из гнутосварных труб прямоугольного сечения при изменении толщины пластины фланца / И.В. Шкода // Технические науки: сб.ст. сессии молодых ученых. – Н.Новгород, 2020. – С. 149-153.

**A23. Шкода, И.В.** Совершенствование монтажного узлового соединения купольного покрытия из труб / И.В. Шкода, Е.Н. Облетов // Великие реки 2022: тр. 18-й Междунар. науч.-промышленного форума. – Н.Новгород, 2022. – С. 400-403.

**A24. Шкода, И.В.** Сравнительный анализ деформативно-прочностных характеристик различных вариаций исполнений фланцевого узла из прямоугольных гнутосварных труб / И.В. Шкода // Сб. докл. X Всерос. фестиваль науки: сб. докл. - Нижний Новгород, 2020. – С. 90-93.

**A25. Шкода, И.В.** Исследование напряженно-деформированного состояния в элементах фланцевого узла при изменении толщины фланца / И.В. Шкода // Сб. докл. X Всерос. фестиваль науки: сб. докл. - Нижний Новгород, 2020. – С. 86-89.

**A26. Шкода, И.В.** Напряженно деформированное состояние узлов сопряжения металлических ребристо-кольцевых куполов из трубчатых профилей / И.В. Шкода, Е.В. Смирнова // Сб. докл. X Всерос. фестиваль науки: сб. докл. - Нижний Новгород, 2020. – С. 284-291.

**A27. Шкода, И.В.** Анализ напряженно - деформированного состояния монтажного узла ребристого купола / И.В. Шкода // Сб. докл в 2-х томах. IX Всерос. фестиваль науки: сб. докл. - Нижний Новгород, 2020. – С. 70-74.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Лагерев А.В. Нагруженность подъемно-транспортной техники / А. В. Лагерев // Учеб. пособие.- Брянск: БГТУ. - 2010. - 180 с.
2. Федяева, Г. А. Моделирование динамики электромеханической системы мостового крана / Г. А. Федяева, Д. В. Кочевин, В. П. Лозбинев, Ф.Ю. Лозбинев // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2014. - № 1 (41). - С. 63-67.
3. Musilek, J. Horizontal Forces on Crane Runway Caused by Skewing of the Crane // IOP: Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - Vol. 471. - Issue 5:052001. - DOI 10.1088/1757-899X/471/5/052001.
4. Лобов, Н.А. Нагрузка на мостовой кран, вызванные поперечными и вращательными движениями мостовой балки / Н.А. Лобов // Вестник машиностроения. -1984. - Т. 64. - С. 22-26.
5. Лобов, Н.А. Нагрузка на мостовой кран при его движении с постоянным перекосом балки / Н.А. Лобов // Вестник машиностроения. - 1986. - Т. 66. - С. 13-17.
6. Musilek, J. Dynamical Model for Determination of Horizontal Forces on Crane / J. Musilek // Runway during Motion of the Crane. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - Vol. 603. - Issue 5:052076. - DOI 10.1088/1757-899X/603/5/052076.
7. Musilek, J. Dynamical Model for Calculation Transverse Forces between Overhead Bridge Crane and Crane Runway / J. Musilek // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Building Defects 2019 (11th International Conference Building Defects) 28–29 November 2019, České Budějovice, Czech Republic. - 2020.- Vol. 728:012001. - DOI 10.1088/1757-899X/728/1/012001.
8. Теличко, Л. Я. Система управления электроприводами, обеспечивающая бесперекусное передвижение мостовых кранов [Электронный ресурс] /Л. Я. Теличко, А. А. Дорофеев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2010. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-upravleniya-elektroprivodami-obespechivayuschaya-besperekosnoe-peredvizhenie-mostovyh-kranov/viewer>.
9. Ахтулова, Л. Н. Визуальное моделирование двухбалочного мостового крана как сложной динамической системы / Л.Н. Ахтулова, А. Л. Ахтулов, О. М. Кирасиров, В.А. Машонский // Омский научный вестник.- 2014. - №1 (127). - С. 147-152.
10. Лагерев, И.А. Влияние подкрановой конструкции на динамическую нагруженность мостового крана / И. А. Лагерев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2011. - Issue 5-3.
11. Лобов, Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Н. А.Лобов // М.: Машиностроение. - 1987. - 160 с.

12. Лагерев, И.А. Моделирование эксплуатационной нагруженности металлоконструкции мостового крана общего назначения / И. А. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2015. - № 1. - С. 49-54.
13. Спицына, Д.Н. Исследование работы кранов мостового типа при сейсмических воздействиях / Д. Н. Спицына, А.А. Шарыгин, И.В. Шарыгин // Известия высших учебных заведений. - 2012. - №2. - С. 1-12.
14. ГОСТ 30546.1—98. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета сложных конструкций в части сейсмостойкости. - Минск: МГС, 1998. - 58 с.
15. Методические указания. Нормы расчета пространственных станций на эксплуатационные и сейсмические воздействия металлоконструкций грузоподъемных кранов. РД 24.090.83—87. Минтяжмаш, руководящий документ по стандартизации. - 1987. - С. 41—62.
16. Иванченко, И.И. Динамическое взаимодействие мостов и высокоскоростных железнодорожных составов / И.И. Иванченко // Механика твердого тела. - 2015. - №3. - С. 146-160.
17. Smirnov, V.N. Dynamic interaction of high-speed trains with span structures and flexible support / V.N. Smirnov, E. B. Shestakova, S.V. Chizhov, A. A. Antonyuk, L. A. Lediaev, I. A. Indeykin // Инженерно-строительный журнал. - 2017. - №8.- С. 115-129. - DOI 10.18720/MCE.76.11.
18. Индейкин, А.В. Анализ свободных вертикальных колебаний пролетного строения системы "мост - поезд" [Электронный ресурс] / А. В. Индейкин, М. М. Евстифеев // Известия Петербургского университета путей сообщения. - 2005.- №3. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-svobodnyh-vertikalnyh-kolebaniy-proletnogo-stroeniya-sistemy-most-poezd> (дата обращения: 15.01.2024).
19. Доронин, Ф.А. Исследование динамики пролетных строений моста с учетом его совместной работы с опорами / Ф. А. Доронин, А. В. Индейкин // Бюллетень результатов научных исследований. - 2012. - № 4(3). С. 131-136.
20. Wei, Li. Development of multiband tuned rail damper for rail vibration control / Li Wei, Anbin Wang, Xiaogang Gao, Longhua Ju, Lang Liu // Applied Acoustics. - 2021. - Vol. 184:108370.
21. Liu, W. Metamaterial approach to mitigate ground-borne vibrations induced by moving trains [Электронный ресурс] / W. Liu, S. Yan, L. Wu, J. Zhou // Applied Research. - 2022. - Vol. 2, Issue 1: e202200021. Режим доступа: <https://DOI.org/10.1002/appl.202200021>.
22. Hana, Y.A. Investigating the dynamic effect of in-track vibration countermeasures / Y.A. Hana, Shamaileh, Hussien F.M. Mohammed // ICSV29, Annual Congress of International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV). - 2023.

23. Li, HY. Effect of seismic isolation on random seismic response of high-speed railway bridge based on probability density evolution method / Li HY, Yu ZW, Mao JF, Spencer BF // Structures. - 2021. - Vol. 29. - P. 1032-1046.
24. Zhang, Z. Random vibration of a train traversing a bridge subjected to traveling seismic waves / Z. Zhang, Y. Zhang, J. Lin, Y. Zhao, W.P. Howson, F.W. Williams // Engineering Structures. - 2011. - Vol. 33. - Issue 12. - P. 3546-3558.
25. Xuebing. Dynamic responses of a train-track-bridge coupled system under earthquakes [Электронный ресурс] / Xuebing, Zhang, Han Wu, Han Zhao, Ping Xiang // Zhang et al. J Infrastruct Preserv Resil, - 2023. - 4:13. Режим доступа: <https://DOI.org/10.1186/s43065-023-00074-9>.
26. Yu, J. Running test on high-speed railway track-simply supported girder bridge systems under seismic action / J. Yu, L. Jiang, W. Zhou, X. Liu, L. Nie, Y. Zhang, Y. Feng, S. Cao // Bulletin of Earthquake Engineering. - 2021. - Vol. 19. - P. 3779–3802.
27. Yu, J. Study on the influence of trains on the seismic response of high-speed railway structure under lateral uncertain earthquakes / J. Yu, L. Jiang, W. Zhou, J. Lu, T. Zhong, K. Peng // Bulletin of Earthquake Engineering. - 2021. - Vol. 19. - P. 2971–2992.
28. Gao, X.J. Dynamic response analysis of longspan continuous bridge considering the effect of train speeds and earthquakes / X. J. Gao, P.H. Duan, H. Qian // International Journal of Structural Stability and Dynamics. - 2020. - Vol. 20. - № 06. - 2040013.
29. Весницкий, А.И. Краевы задачи двумерных упругих систем с движущимися нагрузками и закреплениями / А. И. Весницкий, В. П. Болдин // Машиноведение. - 1989. - №1. - С. 70-75.
30. Весницкий, А.И. Избранные труды по механике / отв. ред. В.И. Ерофеев, Е.Е. Лисенкова // Нижегород. фил. Ин-та машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. - Нижний Новгород: ИД "Наш дом", 2010. - 248 с.
31. Euler, L. Historie de I / L. Euler // Academie Royale de Berlin. - 1746. - P. 117.
32. Неронов, Н.П. Определение напряжений в подъемном канате / Н. П. Неронов // Доклады Академии наук СССР. - 1947. - № 8. - С. 765-768.
33. Горошко, О.А. Введение в механику деформируемых одномерных тел переменной длины / О. А. Горошко, Г. Н. Савин // Академия Наук УССР институт механики. - Киев: Наук.думка, 1971. - 224 с.
34. Болотин, В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости // М.: Физматгиз, 1961. - 339 с.
35. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко // М.: Наука, 1967. - 444 с.

36. Хейсин, Д.Е. Динамика ледяного покрова / Д. Е. Хейсин // Л.: Гидрометеоздат, 1967. - 215 с.
37. Весницкий, А.И. Физический энциклопедический словарь / А. И. Весницкий // Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Сов. Энциклопедия, 1983. - 928 с.
38. Ерофеев, В.И. Волновая динамика деформируемых систем, взаимодействующих с упругоинерционными и неоднородными основаниями: монография / В.И. Ерофеев [и др.]// Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. – 128 с.
39. Болотовский, Б. М. Эффект Вавилова–Черенкова и эффект Доплера при движении источников со скоростью больше скорости света в вакууме / Б. М. Болотовский, В. Л. Гинзбург // Успехи физических наук. – 1972. – Вып. 4. – Т. 106. – С. 577–592.
40. Весницкий, А.И. Переходное излучение в механике / А. И. Весницкий, А.В. Метрикин // Успехи физических наук. -1996. - Т. 166. - № 10. - С. 1044-1068.
41. Metrikine, A.V. Vibration of a periodically supported beam on an elastic half-space / A.V. Metrikine, K. Popp // European Journal of Mechanics A/Solids. - 1999.- Vol. 18. - N 4. - P. 679-701.
42. Suiker, A.S.J. Dynamic behavior of a layer of discrete particles. - Part 1. - Analysis of body waves and eigen modes / A. S. J. Suiker, A. V. Metrikine, R. de Borst // Journal of Sound and Vibration. - 2001. - Vol. 240. - №. 1. - P. 1-18.
43. Liu, D. K. Study on fatigue life estimation method of welded structure of lifting machinery /D. K. Liu, J. F. Jiang, X. Y. Shao, B. Yu // The 12th Global Conference on Materials Science and Engineering (CMSE 2023). Journal of Physics: Conference Series. - 2024. - 2680:012013. - DOI 10.1088/1742-6596/2680/1/012013.
44. Cheng, Jiaming. Research on fatigue crack propagation of metal structure of casting crane based on XFEM / Jiaming Cheng, Hui Jin // Conference Paper in IOP Conference Series Materials Science and Engineering. - 2021. - 1043:042049. - DOI 10.1088/1757-899X/1043/4/042049.
45. Cheng, Jiaming. Prediction of fatigue crack growth life based on a new fusion model / Jiaming Cheng, Hui Jin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The 10th International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE 2020) 8th-11th October 2020, Shaanxi, China. -2021. - Vol. 1043 (4):042048. - DOI 10.1088/1757-899X/1043/4/042048.
46. Liu, D. K. Study on fatigue life estimation method of welded structure of lifting machinery /D. K. Liu, J. F Jiang, X. Y. Shao, B. Yu //Journal of Physics: Conference Series. The 12th Global Conference on Materials Science and Engineering (CMSE 2023) 27/10/2023 - 30/10/2023 Shenzhen, China. - 2023. - Vol. 2680:012013. - DOI 10.1088/1742-6596/2680/1/012013.

47. Yun, Li. Prediction of Remaining Fatigue Life of In-Service Bridge Cranes [Электронный ресурс] / Li Yun, Jin Afang, Dai Yong, Yang Dexin, Zheng Bin // Appl Sci. -2023. - 13(22):12250. Режим доступа : <https://DOI.org/10.3390/app132212250>.
48. Xiaoqing, Zhao. Peak Stress Method-Based Fatigue Predictions for Steel Crane Girder Variable-Section Supports [Электронный ресурс] / Zhao Xiaoqing, Kuntao Xing, Nan Jin // Buildings. - 2023. -13(1). - 108. Режим доступа: <https://DOI.org/10.3390/buildings13010108>.
49. Nussbaumer, A. Modern Tubular Truss Bridges / A. Nussbaumer, Manfred A. Hirt // IABSE Symposium Report. - 2002. - 86(4).- DOI 10.2749/222137802796337332.
50. Nussbaumer, A. Fatigue behaviour of welded CHS joints in bridges / A. Nussbaumer, Manfred A. Hirt // Journal of Physics: Conference Series. - 2022. - 2383:012060. - DOI 10.1088/1742-6596/2383/1/012060.
51. Nussbaumer, A. Fatigue behaviour of welded CHS bridges joints: emphasis on the effect of size / A. Nussbaumer, Manfred A. Hirt // Proceedings ISTS 9. - 2003. - P. 10.
52. Shi Zhaoyang. Bridge crane fatigue life reliability sensitivity analysis based on MCMC method [J] / Shi Zhaoyang, Wang Aihong, Gao Youshan, et al. // China Safety Science Journal. - 2014. 24(03):47-52.
53. Zhang, Xin. The application of the reliability maintenance theory in machines and crane / Zhang, Xin // Northeastern University. - 2014.
54. Wang, Zhihai. Research on reliability theory of metal Structure of bridge Crane based on fatigue test [D] / Wang, Zhiha // Taiyuan University of Science and Technology. - 2011.
55. Cao, Xiaoxiang. Reliability study on overhead crane structure with multiple cracks [D] / Cao, Xiaoxiang // Taiyuan University of Science and Technology. -2021.
56. Yanchao, Zhang. Fatigue reliability analysis of bridge crane metal structure considering maintenance / Zhang Yanchao, Hua Wang, Li Xiangdong, Ren Qinghua, Feng Yunwen, Xue Xiaofeng // Journal of Physics: Conference Series. 2020. - 2383:012060. - DOI 10.1088/1742-6596/2383/1/012060.
57. Сабитов, Л.С. Разработка и численные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций из трубчатых стержней в энергетическом строительстве [Электронный ресурс] / Л. С. Сабитов // Вестник ИргТУ. - 2015. - №6 (101). Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-i-chislennye-issledovaniya-napryazhenno-deformirovanNogo-sostoyaniya-nds-konstruktsiy-iz-trubchatyh-sterzhney-v> (дата обращения: 15.05.2024).
58. Packer, J. A. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading (2nd ed) / J.A. Packer, J. Wardenier, X.-L. Zhao, G.J. van der Vegte and Y. Kurobane // CIDECT. - 2009. - 147 p.

59. Design of welded joints [Электронный ресурс] // Celsius®355 and Hybox®355. Режим доступа: URL: <https://pdfslide.net/documents/design-of-welded-joints-celsius-355-and-hybox-355-kt-joints-55-i-or-h-section-chord.html>.
60. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. - Издательство «Машгиз», 1963. - 232 с.
61. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести /Н. Н. Малинин. - М., Машиностроение, 1975. – 400 с.
62. Перминов, Д. А. Исследование напряженного состояния узлов из гнутых профилей замкнутого сечения / Д. А. Перминов // Строительство и техногенная безопасность. - 2017. - №7 (59). - С. 47-53.
63. Гатиятов, И.З. Определение напряженно-деформированного состояния опор контактных сетей городского электрического транспорта/ И. З. Гатиятов, Л. С. Сабитов, И. Л. Кузнецов // Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии. Пенза, 23–24 апреля 2015 года. Издательство: Пензенский государственный аграрный университет (Пенза), 2015. - с. 37-40.
64. Гатиятов, И.З. Исследование напряженно-деформированного состояния опор контактных сетей электрического транспорта / И. З. Гатиятов, И. Н. Хвмидуллин, Л. С. Сабитов, И. Л. Кузнецов // Энергетика Татарстана. - 2015. - № 2 (38). - С. 57-62
65. Кузнецов, И. Л. Монография Конструкции с соединениями стальных труб разного диаметра /И. Л. Кузнецов, Л. С. Сабитов, А. В. Исаев // Монография. М-во образования и науки Российской Федерации, Казанский гос. архитектурно-строительный ун-т. - Казань: КГАСУ, 2012. - 123 с.
66. Сабитов, Л.С. Напряжённо-деформированное состояние соединения труб разного диаметра / Л. С. Сабитов, И. Л. Кузнецов, А. З. Камалов // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2008. - № 2 (34). - С. 42-49.
67. Сабитов, Л. С. Разработка и исследование соединений труб разного диаметра / Л. С. Сабитов // Известия КазГАСУ. - 2008. - № 1(9). - С. 102–105.
68. Сабитов, Л.С. Разработка и исследование узла соединения стержней опор линии электропередач / Сабитов, Л.С., Кузнецов, И.Л., Ильин, В.К., Хамидуллин, И.Н. // Актуальные вопросы современной техники и технологии. Сборник докладов XIV-й Международной научной конференции. Отв. редактор А.В. Горбенко. - 2014.- С. 38-43.
69. Сабитов, Л.С. Экспериментальные исследования узлов соединения труб разного диаметра в опорах контактных сетей электротранспорта / Л. С. Сабитов, И. Л. Кузнецов, И. З. Гатиятов // Вестник гражданских инженеров. - 2014. - № 6 (47). - С. 90-95.

70. Инжутов, И. С. Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента [Электронный ресурс]/ И. С. Инжутов, П. А. Дмитриев, С. В. Деордиев, В. В. Захарюта // Вестник МГСУ. 2013. №3. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-suschestvuyuschih-uzlov-sopryazheniya-prostranstvennyh-konstruktsiy-i-razrabotka-sborno-razborno-uzlovogo-elementa-1> (дата обращения: 15.05.2024).

71. Инжутов, И. С. Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента [Электронный ресурс]/ И. С. Инжутов, П. А. Дмитриев, С. В. Деордиев, В. В. Захарюта // Вестник МГСУ. 2013. №3. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-suschestvuyuschih-uzlov-sopryazheniya-prostranstvennyh-konstruktsiy-i-razrabotka-sborno-razborno-uzlovogo-elementa-1> (дата обращения: 15.05.2024).

72. Зинкевич, И.В. К определению зависимости податливости узлов рам из прямоугольных трубы и двутавров при действии изгибающего момента в ригеле / И. В. Зинкевич, Л. В. Мухин, В. А. Лебедь, Н. В. Черноиван // Проблемы и перспективы современных строительных конструкций и технологий: труды XXV научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов. — Брест: БПИ, 1998. —с. 13-18.

73. Митрофанов С.В. Работа узловых соединений структурной конструкции с элементами решетки, выполненной из круглой трубы / С. В. Митрофанов // Строительство и техногенная безопасность. - 2013. - № 46. - С. 20-24.

74. Сахновский, М. М. Уроки аварий стальных конструкций / М. М. Сахновский, А. М. Титов // Издательство «Будівельник». Киев. - 1969.- 200 с.

75. Байков Д. А. Численные исследования действительной работы узлов фермы из квадратных труб, соединенных в узлах на ребро / Д. А. Байков, А. И. Колесов Д. С. Маслов // Приволжский научный журнал, 2012, № 4, с. 36-40.

76. Драган, В.И. Конструктивные решения и основные результаты большепролетного металлического покрытия летнего амфитеатра в г. Витебске / В. И. Драган, А. В. Мухин, И. В. Зинкевич, В. А. Лебедь, Л. Г. Головкин, Н. Н. Шалобыта, А. Б. Шурин, В. В. Люстибер, А. В. Мигель // Строительная наука и техника.- 2007. - №3. - С. 18-29.

77. Дружинина, М. Ю. Исследование напряженно-деформированного состояния узлов несущих конструкций агрегатов стартовых комплексов при задании граничных условий в виде внутренних силовых факторов / М. Ю. Дружинина, А. В. Ульяенков, В. А. Бошняк // Инженерный вестник. - 2014. - № 4.

78. Дружинина, М.Ю. Исследование напряженно-деформированного состояния узлов несущих конструкций агрегатов стартовых комплексов при задании граничных условий в виде перемещений / М. Ю. Дружинина, А. В. Ульяенков // Инженерный вестник. - 2013.- № 2.
79. Губайдулин, Р.Г. Исследование напряженного состояния сварных соединений бесфасоночных трубчатых / Р. Г. Губайдулин, А. К. Тиньгаев, В. А. Lupin // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». - 2012. - № 15. - Вып. 18. - С. 31-36.
80. Мурашко, Н. Н. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния бесфасоночных узлов ферм из замкнутых гнутосварных профилей [Электронный ресурс] / Н. Н. Мурашко, Ю. В. Соболев, А. В. Мухин Л.Г. Режим доступа: <https://rep.bstu.by/bitstream/handle/data/21646/66-72.pdf?sequence=1>.
81. Пат. 116526 Российская Федерация, МПК E04B 1/58, E04C 3/08. Узловое бесфасоночное соединение трубчатых элементов фермы [Текст] / Марутян А. С. — № 2010135714/03; заявл. 26.08.10; опубл. 27.05.12, Бюл. № 15. — 2 с.
82. Зинькова, В. А. Методика экспериментальных исследований узловых соединений трубчатых элементов фермы [Электронный ресурс] // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова.- 2012. -№1. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-eksperimentalnyh-issledovaniy-uzlovyyh-soedineniy-trubchatyh-elementov-fermy> (дата обращения: 15.05.2024).
83. Бочкарева, С.А. Оценка надежности многослойных труб из полимерных материалов / С. А. Бочкарева, Н. Ю. Гришаева, Б. А. Люкшин, П. А. Люкшин, Н. Ю. Матолыгина, С. В. Панин, Ю. А. Реутов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 4. – С. 161-168. - DOI 10.15593/perm.mech/2018.4.15.
84. Ясиевич, В. Е. Бетон и железобетона в архитектуре / В. Е. Ясиевич // М.: Стройиздат, 1980. - 187 с.
85. Лычев, А. С. Надежность железобетонных конструкций : монограф. // А.С. Лычев, В.П. Корякин. - Куйбышев: Изд. Куйбыш. инж.-строит. ин-та, 1974.- 126 с.
86. Глазунов, Ю. В. Конструкции из стальных оболочек, заполненных бетоном / Ю. В. Глазунов // Коммунальное хозяйство городов, - 2011. - Выпуск 86. - С. 22-26.
87. Альперина, О. Н. Исследование сжатых железобетонных элементов с поперечным армированием: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук/ О. Н. Альперина. – 2005. – 24 с.
88. Васильев, А.П. Состояние и перспективы развития конструкций с внешним армированием / А. П. Васильев, В.Н. Голосов // Бетон и железобетон. - 2007. - № 9. - С. 28-29.
89. Воронков, Р. В. О внешнем листовом армировании / Р. В. Воронков // Промышленное строительство. - 2006. - № 5. - С. 19-20.

90. Smith F. The Shearing Strength of Concrete, Bull / F. Smith, R. Brown // Univ. of Washington. - 2001. - № 106. - p. 205
91. Garner N.I. Use of Spiral Welded Steel Tubes in Pipe Columns /N. I. Garner // ACJ. J. Proceedings. - 2003. - Vol. 65. - P. 937-942.
92. Гвоздев, А. А. Определение величины разрушающей нагрузки для статически неопределимых систем. / А. А. Гвоздев // Проект и стандарт. – 1934. – № 8. - С. 10-16.
93. Долженко, А. А. Исследование сопротивления трубобетона осевому сжатию / А. А. Долженко // Теория сооружений и конструкций. Труды Воронежского ИСИ. – 1964. – Вып. 1. – С. 3-23.
94. Кришан, А. Л. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов / А. Л. Кришан, А. И. Заикин, М. С. Купфер // Бетон и железобетон. – 2008. – №2. – С. 22–25.
95. Кикин, А. И. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном / А. И. Кикин, Р. С. Санжаровский, В. А. Труль. - М.: Стройиздат, 1974. – 144 с.
96. Стороженко, Л. И. Расчет трубобетонных конструкций / Л. И. Стороженко, П. И. Плахотный, А. Я. Черный. – Киев: Будивельник, 1991. – 120 с.
97. Khazov, P. A. Experimental and analytical models of longitudinal deformation in pipe-concrete specimens with small cross-sections /P. A. Khazov, V. I. Erofeev, E. A. Nikitina, A. P. Pomazov // Structural mechanics of engineering constructions and buildings. - 2023. -19(4). - С. 410-418.
98. Gardner, N. J. Structural Behavior of Concrete Filled Steel Tube / N. J. Gardner, E. R. Jacobson // ACI Journal. – 1967. – P. 404-413.
99. Jayalekshmi, S. A. Comparative Study on Design Principles of Circular Concrete Filled Steel Tubular Columns / S. Jayalekshmi, J. S. Sankar Jegadesh // Proceedings to the ICIDRET. – 2014. – P. 133-137.
100. Schneider, S. P. Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes / S. P. Schneider // Journal of Structural Engineering. – 1998. – Vol. 124. – Issue. 10. – P. 1125-1138.
101. Kuranovas, A. Load-Bearing Capacity Of Concrete-Filled Steel Columns / A. Kuranovas, D. Goode, A. Kvedaras, S. Zhong // Journal Of Civil Engineering And Management. – 2009. – P. 21-33.
102. Скворцов, Н. Ф. Прочность сталетрубобетона : дисс. ... канд. техн. наук / Н. Ф. Скворцов. – М., 1953. – 453 с.
103. Knowles, R. Strength of concrete-filled steel tubular columns / R. Knowles, R. Park // Journal of the Structural Division ASCE. – 1969. – Vol. 95(12). – P. 2565-2587.

104. Хазов, П.А. Расчет трубобетонных конструкций: современное состояние вопроса и перспективы дальнейших исследований (обзор) / П. А. Хазов, А. К. Ситникова, Е. А. Чибаква // Приволжский научный журнал. - Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. - 4 (68). - С. 57-76.
105. Резван, И. В. Трубобетонные колонны из высокопрочного самоуплотняющегося напрягающего бетона : дисс. ... канд. техн. наук / И. В. Резван. – Ростов на Дону, 2012. – 202 с.
106. Мартиросов, Г. М. Трубобетонные элементы из бетона на напрягающем цементе / Г. М. Мартиросов, А. И. Шахворостов. – Текст : электронный // Бетон и железобетон. – 2001. – №4. – С. 12-13.
107. Ефименко, В. И. Опыт проектирования строительных конструкций из стальных труб, заполненных центрифугированным бетоном / В. И. Ефименко, А. П. Сухан, С. П. Сухан. // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Кривой Рог, 2008. – С. 194-199.
108. Ефименко, В. И. Деформативность центрифугированных трубобетонных элементов / В. И. Ефименко, Л. И. Стороженко // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Киев: Четверта хвиля, 2001. – С. 280-284.
109. Кришан, А. Л. Прочность трубобетонных колонн с предварительно обжатым яром : дисс. ... док. техн. наук / А. Л. Кришан. – МГТУ им. Г. И. Носова, Магнитогорск, 2011. – 380 с.
110. Abed, F. Experimental and numerical investigations of the compressive behavior of concrete filled steel tubes (CFSTs) // Journal of Constructional Steel Research. – 2013. – Issue 80. - P. 429–439.
111. Singh, N. D. Study and Buckling Analysis of Concrete Filled Steel Tubes Columns using ANSYS / N. D. Singh, Sh. Vaghmarey // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2018. – Vol. 05. – Issue 12. – P. 1259-1267.
112. Gupta, P. K. Experimental and computational study of concrete filled steel tubular columns under axial loads / P. K. Gupta, S. M. Sarda, M. S. Kumar // Journal of Constructional Steel Research. – 2007. – Vol. 63. – P. 182-193.
113. Овчинников, И. И. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 2. Расчет трубобетонных конструкций с металлической оболочкой / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников, Г. В. Чесноков, Е. С. Михалдыкин // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – С. 1-32.
114. Долженко, А. А. Трубчатая арматура в железобетоне : дисс. ... докт. техн. наук / Александр Александрович Долженко. – М., 1967. – 413 с.
115. Галагурия, Е. И. Напряженно-деформированное состояние сталебетонных колонн при различных схемах нагружения : дисс. ... канд. техн. наук / Е. И. Галагурия. – Харьков, 2008. – 120 с.

116. Санжаровский, Р. С. Теория и расчет прочности и устойчивости элементов конструкций из стальных труб, заполненных бетоном : дисс. ... докт. техн. наук / Р. С. Санжаровский. – М., 1977. – 453 с.
117. Sakino, K. Elastic-Plastic Behavior of Concrete Confined in Circular Steel Tube or Spiral Reinforcement / K. Sakino, Y. Xiao, M. Tomii. // Proc. of the 3-rd Int. Conf. on Steel-Concrete Composite Structures. – Fukuoka, Japan, 1991. – P. 67-73.
118. Furlong, R. W. Design of steel-encased concrete beam-columns / R. W. Furlong // Proc. ASCE. – 1968. – Vol. 94. – P. 267-281.
119. Johnson, R. S. Concrete-Filled Steel Tubes / R. S. Johnson // Composite Structures of steel and Concrete. – 1984. – Vol. 1. – Chapter 5. – P. 171-177.
120. Takeo, N. Experimental Study on Concrete Filled Steel Pipe under Eccentric Axial Load /N. Takeo // Transactions of The Architectural Institute of Japan, Extra, Summaries of Technical Papers of Annual meeting of A. I. J. – 1965. – 333 p.
121. Zhong, S. Concrete-filled steel Tubes under Excentric Loading / S. Zhong // Experiments and Analysis, Dianti Jianshekeji Daobao. – 1979. – Vol. 1.
122. Zhou, C. Investigation on Load Carrying Capacity of Concrete-filled Steel Tubes under Eccentric Loading / C. Zhou // Journal of Harbin Institute of Civil Engineering. – 1982. – Vol. 4. – P. 29-46.
123. Muciaccia, G. Response of self-compacting concrete filled tubes under eccentric compression / G. Muciaccia, F. Giussani, G. Rosati, F. Mola. // Journal of Constructional Steel Research. – 2011. – Vol. 67(5). – P. 904-916.
124. Kedziora, S. Concrete-filled steel tubular (CFST) columns subjected to eccentric compressive load / S. Kedziora, M. O. Anwaar. // AIP Conference Proceedings. – 2019. - 2060:020004. - DOI 10.1063/1.5086135.
125. Liu, F. Q. Post-fire behaviour of reinforced concrete stub columns confined by circular steel tubes / F. Q. Liu, L. Gardner, H. Yang. // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 102. – P. 82-103.
126. Jiang, S. F. Experimental study on fire-exposed rectangular concrete-filled steel tubular (CFST) columns subjected to bi-axial force and bending / S. F. Jiang, Z. Q. Wu, D. S. Niu. // Advances in Structural Engineering. – 2010. – Vol. 13. – P. 551-560.
127. Lu, H. Fire performance of self-consolidating concrete filled double skin steel tubular columns: experiments / H. Lu, L. H. Han, X. L. Zhao // Fire Safety Journal. – 2010. – Vol. 45(2). – P. 106-115.

128. Арленинов, П. Д. Расчетно-экспериментальные исследования изгибаемых трубобетонных конструкций / П. Д. Арленинов, С. Б. Крылов, П. П. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 4. – С. 34-38.
129. Астанков, К. Ю. Тенденции применения трубобетонных конструкций для строительства малых мостов / К. Ю. Астанков, И. Г. Овчинников. – Текст : электронный // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России: Материалы XV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Волгоград, 2021. – С. 109-117.
130. Казимагомедов, Ф. И. Эффективные трубобетонные изгибаемые элементы : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Ф. И. Казимагомедов. – Харьков, 2015. – 20 с.
131. Овчинников, И. Г. Повышение нагрузочной способности трубобетонной балки / И. Г. Овчинников, Д. Н. Парышев, А. В. Ильтяков [и др]. – Текст : электронный // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2019. – №4. – С. 58-66.
132. Якупова, Л. З. О возможности применения свода правил СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» для проектирования трубобетонных конструкций в малом мостостроении / Л. З. Якупова, К. Ю. Астанков, И. Г. Овчинников. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – №2. – С. 112-121.
133. Долженко, А. А. Исследование сопротивления трубобетона осевому сжатию / А. А. Долженко // Теория сооружений и конструкций. Труды Воронежского ИСИ. – 1964. – Вып. 1. – С. 3-23.
134. Кришан, А. Л. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов / А. Л. Кришан, А. И. Заикин, М. С. Купфер // Бетон и железобетон. – 2008. – №2. – С. 22–25.
135. Стороженко, Л. И. Расчет трубобетонных конструкций / Л. И. Стороженко, П. И. Плахотный, А. Я. Черный. – Киев: Будивельник, 1991. – 120 с.
136. Tao, Z. Compressive and flexural behavior of CFRP repaired concrete-filled steel tubes after exposure to fire / Z. Tao, L. H. Han, L. L. Wang // Journal of Constructional Steel Research. – 2007. – Vol. 63(8). – P. 1116-1126.
137. Нурадинов, Б. Н. Огнестойкость сталетрубобетонных колонн : дисс. ... канд. техн. наук / Бауыржан Нурадинович Нурадинов. – М., 1994. – 201 с.
138. Hicks, S. J. Design guide for SHS concrete filled columns / S. J. Hicks // Corus Tubes Structural & Conveyance Business. – 2005. – 62 p.
139. Кикин, А. И. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном / А. И. Кикин, Р. С. Санжаровский, В. А. Труль. – М.: Стройиздат, 1974. – 144 с.

140. Brett, C. G. A Synopsis of Studies of the Monotonic and Cyclic Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Members, Connections, and Frames / C. G. Brett, T. Cenk, D. D. Mark // Department of Civil and Environmental Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign. – 2008. – 371 p.
141. Ellobody, E. Nonlinear analysis of concrete-filled steel SHS and RHS columns / E. Ellobody // Thin-Walled Structures. – 2006. – Vol. 44(8). – P. 919-930.
142. Dai, X. Numerical modelling of the axial compressive behavior of short concrete-filled elliptical steel columns / X. Dai // Construction Steel Researches. – 2010. – Vol. 66(4). – P. 542-555.
143. Dai, X. H. Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression / X. H. Dai, D. N. Lam, J. Ye. Jamaluddin // Thin-Walled Structures. – 2014. – Vol. 77. – P. 26–35.
144. Снигирева, В. А. Совершенствование методов моделирования и расчета предварительно напряженных трубобетонных стоек транспортных сооружений : дисс. ... канд. техн. наук / В. А. Снигирева. – СурГУ, Сургут, 2021. – 199 с.
145. Гаранжа, И. М. Численное моделирование трубобетонных элементов конструкций круглого сечения / И. М. Гаранжа, А. В. Танасогло, Ж. Н. Войтова // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – №6(71). – С. 14-18.
146. Mathankumar, S. Finite Element Analysis of Steel Tubular Section Filled with Concrete / S. Mathankumar, M. Anbarasan // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 5. – Issue 6. – P. 11775-11779.
147. Abed, F. Experimental and numerical investigations of the compressive behavior of concrete filled steel tubes (CFSTs) / F. Abed, M. AlHamaydeh, S. Abdalla // Journal of Constructional Steel Research. – 2013. – Vol. 80(130). – P. 429-439.
148. Ahmed, A. D. Structural performance of frames with concrete-filled steel tubular columns and steel beams: Finite element approach / A. D. Ahmed, E. M. Guneyisi // Advanced Composites Letters. – 2019. – Vol. 28(5). – P. 1–15.
149. Xiaozhong, Li. Numerical Study on the Axial Compressive Behavior of Steel-Tube-Confined Concrete-Filled Steel Tubes [Электронный ресурс]/ Li Xiaozhong, Sumei Zhang, Yu Tao, Bing Zhang // Experimental Tests and Numerical Analysis of Construction Materials. - 2024. - 17(1). - 155. Режим доступа: URL: <https://doi.org/10.3390/ma17010155>.
150. Hao, Dinh Phana. Numerical analysis of compressive behavior of circular concrete filled steel tubular columns with high to ultra-high strength materials / Hao Dinh Phana, Lien Kim Thi Daoa // Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE. - 2023. - 17(2):83-98. - DOI: 10.31814/stce.huce2023-17(2)-08.

151. Ведерникова, А.А. Численные исследования трубобетонных элементов при внецентренном сжатии / А. А. Ведерникова // Инженерный вестник Дона. -2022. - № 11 (95). - С.639-654.
152. Аманов, А. Н. Идентификация физико-механических свойств материалов / А. Н. Аманов, Д. А. Ильина, С. В. Шлычков // Научному прогрессу – творчество молодых: матер. XIV межд. молод. научн. конф. – Йошкар-Ола. ПГТУ, 2019. – Ч. 1. – С. 129-131
153. Константинов, А.Ю. Экспериментально-теоретический подход к исследованию высокоскоростного деформирования и разрушения материалов с использованием мерных стержней : дисс... д. физ.-мат. н. / Константинов Александр Юрьевич. – Н. Новгород, 2018. – С. 304.
154. Брагов, А.М. Влияние вида напряженно-деформированного состояния на динамическую сжимаемость березы / А. М. Брагов, А. К. Ломунов, Т. Н. Южина // Проблемы прочности и пластичности. – Н. Новгород, 2020. - Т.82, №3. - С.269-282.
155. Брагов, А.М. Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы / А.М. Брагов, А.К. Ломунов – Н. Новгород: ННГУ, 2017. - С.148.
156. Смирнов, В. А. Сравнительные динамические характеристики конструкционных материалов / В. А. Смирнов // Academia. Архитектура и строительство. – Москва, 2022. – №3. - С. 117–131.
157. Захезин, А.М. Оценка динамических характеристик материалов и механических систем экспериментальными методами / А. М. Захезин, О. П. Колосова, П. Ю. Воителев, М. В. Пакулев // Международный журнал экспериментального образования. – Пенза, 2015. – № 5 (часть 1) – С. 91-95.
158. Турков, А.В. Экспериментальные исследования систем перекрестных балок из деревянных элементов на квадратном плане при изменении динамических и статических нагрузок / А. В. Турков, В. И. Коробко, А. А. Макаров // Лес. журнал. – Архангельск, 2016. – №5. – С.275-280.
159. Кокошвилли, С. М. Методы динамических испытаний жестких полимерных материалов/ С. М. Кокошвилли // Рига: Зинатне, 1978. - 184 с.
160. Брагов, А. М.Высокоскоростная деформация мелкозернистого бетона и фибробетона // А. М. Брагов, Л. А. Игумнов, А. К. Ломунов. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2015. - 269 с.
161. Брагов, А.М. Современные методы динамических испытаний материалов/ А. М. Брагов, Э. Кадони, Л. Крушка // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - Н. Новгород: ННГУ, 2011. - № 4 (5). - С. 2039–2040.

162. Давиденков Н. Н. Динамические испытания металлов / Н. Н. Давиденков - М., 1936. - 360 с.
163. Калимов, А.И. Установка для динамических испытаний материалов / А. И. Калимов, Е. К. Постенный. // Заводская лаборатория. - 1969. - № 1, Т. 25. - С. 114-115.
164. Perrone, N. On the use ring test determination of rate sensitive material constants / N. Perrone // Exp. Mech. - 1968. - Vol.5. - P. 232-236.
165. Кокошвили, С.М. Методы динамических испытаний жестких полимерных материалов / С. М. Кокошвили // Справ. пособие. – Рига: Зинатне, 1978. – С. 182.
166. Рыжанский, В.А. Экспериментальное исследование взрывного расширения тонких колец из отожженного алюминиевого сплава / В. А. Рыжанский, В. Н. Минеев и др. // Физика горения и взрыва, 1976. – Т. 12. - №1. – С. 120-124.
167. Whiffin, A.C. The use of flat ended projectiles for determining yield stress. II: Tests on various metallic materials / A. C. Whiffin // Proc. R. Soc. Lond. – A 194, 1948. – P. 300-322.
168. Li, H. High Strain Rate Response of In-Situ TiB<sub>2</sub>/7055 Composite by Taylor Impact / H. Li, Z. Yu, P. Rong, Wu, Yu, H. Hui, F. Zhang // Materials. - 2021. –Vol. 8. – P. 1-13.
169. Taylor, G.I. The use of flat ended projectiles for determining yield stress. I: Theoretical considerations / G. I. Taylor // Proc. R. Soc. Lond. - 1948. – A 194. – P. 289-299.
170. Li, J.-C. Load Characteristics in Taylor Impact Test on Projectiles with Various Nose Shapes / J.-C. Li, G. Chen, F.-L. C Huang, Y.- G. Lu // Metals. - 2021. – p. 21.
171. Woodward, R. L. An experimental and analytical study of the Taylor impact test / R. L. Woodward, N. M. Burman, B. J. Baxter // Pergamon. – Australia, 1994. – Vol. 15. - №7. – P. 407-416.
172. Juncheng, L. Investigation on the Application of Taylor Impact Test to High-G / L. Juncheng, C., Gang, L., Yonggang, H., Fenglei // Boundaries in materials. – 2021. – p. 21.
173. Chen, W. Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing, and applications / W. Chen, B. Song // Springer, New York, 2011. – p. 388.
174. Jankowiak, T. Validation of the Klepaczko–Malinowski model for friction correction and recommendations on Split Hopkinson Pressure Bar / T. Jankowiak, A. Rusinek, T. Lodygowski // Finite elements in analysis and design. – China, 2011. – Vol. 47, № 10. – P. 1191-1208.
175. Klepaczko, J. Dynamic, frictional effects as measured from the split Hopkinson pressure bar / J. Klepaczko, Z. Malinowski // Proc. IUTAM Symp., ed. K. Kawata, Springer Verlag, 1977. – P. 403- 416.
176. Gray III, G.T. Classic split-Hopkinson pressure bar testing / In: Kuhn, H., Medlin, D. // Mechanical testing and evaluation. – 2000. -Vol. 8. – P. 462–476.
177. Gray, G.T. Split Hopkinson pressure bar testing of soft materials / G. T. Gray, W. R. Blumenthal // Mech Test Eval, ASM Metals Handb, Am Soc Metals, 2000. – P. 488–496.

178. Frew, D.J. Pulse shaping techniques for testing high-strength steel with a split Hopkinson pressure bar / D. J. Frew, M. J. Forrestal, W. Chen // *Exp Mech* 45, 2005. – P. 186–195
179. Forrestal, M.J. The effect of radial inertia on brittle samples during the split Hopkinson pressure bar test / M. J. Forrestal, T. W. Wright, W. Chen // *Int J Impact Eng* 34, 2007. – P. 405–411.
180. Feng, J. Influence of the end cap deformation of a hollow transmission bar on the hollow split Hopkinson pressure bar test results/ J.Feng, M. Jiang, H. Xu, Z. Li, Z. Wu // *International Journal of Impact Engineering*.- 2017. – 112. - P. 116–124.
181. Брагов, А.М. Дисперсия волн в разрезных стержнях гопкинсона при динамических испытаниях хрупких материалов / А. М. Брагов, А. Ю. Константинов, М. В. Медведкина // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. - Н. Новгород: ННГУ, 2011. - № 6 (1). - С. 158–162.
182. Bacon, C. Development of the Kolsky-Hopkinson techniques and applications for non-conventional testing / C. Bacon, J-L. Lataillade // *New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact. Trends in Mechanics of Materials* / Eds. W.K. Newacki, J.R. Klepaczko. Warsaw, 2001. - P. 1-58.
183. Field, J.E. Experimental methods at high strain rate / J. E. Field, S. M. Walley, N .K. Bourne, J. M. Huntley // *Journal de Physique IV, Colloque C3. Dymat*, 1994. - P. 3-22.
184. Nicholas, T. Tensile testing of materials at high rates of strain / T. Nicholas // *Experimental Mechanics. An International Journal Integrating Experimental Methods with the Mechanical Behavior of Materials and Structures*. - 1981. - Vol. 21. - P. 177–185.
185. Pothnis. High strain rate tensile behavior of aluminum alloy 7075 T651 and IS 2062 mild steel / Pothnis, R. Jayaram, Y. Perla, H. Arya, N. K. Naik // *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*. - 2011. - 133:021026. - P. 1-9.
186. Bragov, A. Experimental Methods with the Mechanical Behavior of Materials and Structures / A. Bragov, E. Cadoni, A. Konstantinov, A. Lomunov // *An International Journal Integrating in Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*. - 2011. - Vol. 59. - P. 101-117.
187. Dunand, M. High strain rate tensile testing of sheet materials using three Hopkinson pressure bars [Электронный ресурс] / M. Dunand, G. Gary, D. Mohr // *EPJ Web of Conferences Volume 26, 2012 DYMAT 2012 - 10th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading. Experimental Techniques*. - 2012. - Vol. 26. - Режим доступа: URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20122601010>.
188. Dunand, M. Load-Inversion Device for the High Strain Rate Tensile Testing of Sheet Materials with Hopkinson Pressure Bars / M. Dunand, G. Gary, D. Mohr // *Experimental Mechanics*. - 2013. - Vol. 53. - №. 7. - P. 1177–1188.

189. Беляев, Н. М. Устойчивость призматических стержней под действием переменных продольных сил / Н. М. Беляев // Инженерные сооружения и строительная механика: сб. – Ленинград, 1924. – С. 149–167.
190. Челомей, В. Н. Динамическая устойчивость авиационных конструкций / В. Н. Челомей. – Москва : Аэрофлот, 1939.
191. Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. – Москва : ГИТТЛ, 1956. - 600 с.
192. Индейкин, А. В. Динамическая устойчивость внецентренно сжатых тонкостенных стержней металлических конструкций / А. В. Индейкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. - 2008. - Iss. 4.
193. Индейкин, А.В. Параметрические колебания стержневых элементов строительных конструкций при действии стационарных и подвижных динамических нагрузок [Электронный ресурс] / А. В. Индейкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. - 2014. - №2 (39). Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametricheskie-kolebaniya-sterzhnevyyh-elementov-stroitelnyh-konstruktsiy-pri-deystvii-statsionarnyh-i-podvizhnyh-dinamicheskikh> (дата обращения: 15.05.2024).
194. Степанов, Д.В. Методика определения тяжения в предварительно напряженном раскосе башни / Д. В. Степанов, А. В. Макаров, Р. В. Маершин, А. В. Валов, Е. С. Зубанов, Е. Н. Облетов // Приволжский научный журнал. - 2023. - № 2. -С. 44-49.
195. Разов, И.О. Аналитические методы расчета динамических характеристик прямолинейных тонкостенных трубопроводов большого диаметра при наземной прокладке : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / И. О. Разов. - Санкт-Петербург, 2015. - 130 с.
196. Разов, И.О. Исследование свободных колебаний тонкостенных полимерных прямолинейных трубопроводов большого диаметра при полуподземной прокладке [Электронный ресурс] / И. О. Разов, С. И. Волынец, Е. А. Жайсамбаев // Вестник Евразийской науки. - 2020. - №3. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/75SAVN320.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
197. Соколов, В.Г.Свободные колебания подземных прямолинейных тонкостенных участков газопроводов [Электронный ресурс] / В. Г. Соколов, А. В. Дмитриев // Вестник гражданских инженеров. - 2019. - № 2 (73). - С. 29–34. Режим доступа: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_38589575\\_16941659.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38589575_16941659.pdf).
198. Дмитриев, А.В. Исследование частоты свободных колебаний для трубопроводов с различными физико-механическими свойствами материала [Электронный ресурс] / А. В. Дмитриев // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». - 2020 - №1. Режим доступа:

<https://t-s.today/PDF/04SATS120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.  
DOI:10.15862/04SATS120

199. Коротков, А.В. Параметрические колебания тонкостенных криволинейных труб / А. В. Коротков, Ю. А. Куликов // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. - 2010. - Том 152, кн. 4.

200. Чигарев, А.В. Анализ свободных колебаний длинных тонкостенных труб / А. В. Чигарев, А. Р. Покульницкий // Инновационные технологии в машиностроении: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию академика П.И. Ящерицына и 40-летию машиностроительного факультета Полоцкого государственного университета, (Новополоцк, 28-29 октября 2015 г.). – Новополоцк: ПГУ, 2015. – С.214-217.

201. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко // М.: Стройиздат, 1996. - 416 с.

202. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции /В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов // Общий курс: Учеб. Для вузов. Изд. 6-е, репринт. М., 2009. - 773 с.

203. Grote, D.L. Dynamic behavior of concrete at high strain-rates and pressures: I. Experimental characterization / D .L. Grote, S. W. Park, M. Zhou // Int. J. Impact Engng. - 2001. - Vol. 25. - P. 869-886

204. Bischoff, P.H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates / P. H. Bischoff, S. H. Perry // Materials and Structures. -1991. - Vol. 24. - P. 425-250

205. Li, Q.M. Further investigation on the dynamic compressive strength enhancement of concrete-like materials based on split Hopkinson pressure bar test. Part II: Numerical simulations / Q .M. Li, Y. B. Lu, H. Meng // International Journal of Impact Engineering. - 2009. - № 36.- P. 1335-1345.

206. Lu, Y. B., About the dynamic uniaxial tensile strength of concrete-like materials /Y. B. Lu, Q. M. Li // International Journal of Impact Engineering. - 2011. № 38. - P. 171-180.

207. Malvar, L. J. Dynamic increase factors for concrete / L. J. Malvar, J .E. Crawford // Twenty-Eighth DDESB Seminar. Orlaando, 1998.

208. Xu, H. Semi-empirical equations for the dynamic strength enhancement of concrete-like materials / H. Xu, H. M. Wen // Int. J. Impact. Eng. - 2013. - Vol. 60. - P. 76-81.

209. Li, Q.M. About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test /Q.M. Li, H. Meng // International Journal of Solids and Structures. - 2003. - № 40.- P. 343-360.

210. Баженов, Ю.М. Бетон при динамическом нагружении / Ю. М. Баженов // М.: Стройиздат, 1970. - 274 с.

211. Klepaczko, J.R. On a very high rate sensitivity of concrete failure at high loading rates and impact / J. R. Klepaczko // Proc. Int. Symp. Brittle Matrix Composites 7. Warsaw. - 2003. - P. 1-27

212. Брагов, А.М. Влияние шероховатости заполнителя на динамическое поведение бетона Проблемы прочности и пластичности / А. М. Брагов, Г. М. Грушевский, Н. Ю. Комаров // Межвуз. сб. Нижний Новгород, 2008. - Вып.70. - С. 169-174.
213. Деменко, П.В. Динамическое деформирование некоторых хрупких структурно-неоднородных сред : дисс... канд. техн. наук./ П. В. Деменко - Нижний Новгород, 2004. - 149 с.
214. Brara, A. Experimentaal characterization of concrete in dynamic tension/ A. Brara, J. R. Klepaczko // Mechanics of Materials. - 2006. -Vol. 38. - P. 253-267.
215. Klepaczko, J.R. An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling / J. R. Klepaczko // International Journal of Impact Engineering. - 2001. № 25. - P. 1-27.
216. Южина, Т.Н. Исследование динамических свойств древесины при одноосном сжатии / Т. Н. Южина // Проблемы прочности и пластичности. – Нижний Новгород, 2022. – №3. – С. 420-431.
217. Южина, Т.Н. Высокоскоростное деформирование и разрушение некоторых пород древесины : дис. ... к. т. н. / Южина Татьяна Николаевна – Москва, 2022. – С. 163
218. Брагов, А.М. Экспериментально-теоретическое исследование динамического деформирования и разрушения фибробетона / А. М. Брагов, Б. Л. Карихалу, Ю. В. Петров, А. К. Ломунов, А. Ю. Константинов, Д. А. Ламзин, И. В. Смирнов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2014. - Т. 80. № 4. - С. 57-63.
219. Брагов, А.М. Исследование механических свойств мелкозернистого бетона при динамическом нагружении / А. М. Брагов, А. Ю. Константинов, А. К. Ломунов, Д. А. Ламзин // Приволжский научный журнал. - 2014. - № 4 (32).- С.11-21.
220. Dell'Isola F. Mechanical response change in fine grain concrete under high strain and stress rates /F. Dell'Isola, A. М. Bragov, L. A. Igumnov, A. K. Lomunov, D .A. Lamzin, A. Y. Konstantinov, В .Е. Abali // Advanced Structured Materials. - 2019. - Т. 108. - С. 71-80.
221. Ламзин, Д.А. Методические аспекты динамических испытаний хрупких материалов на сжатие / Д.А. Ламзин, А.М. Брагов, А.К. Ломунов, А.Ю. Константинов, В.В. Новиков, М.Е. Гонов // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.- строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2019 – №4. – 65-78.
222. Ламзин, Д.А. Удельная энергоёмкость кирпича при динамическом нагружении / Д.А. Ламзин, А.М. Брагов, А.К. Ломунов, А.Ю. Константинов, В.В. Новиков, Д.Т. Чекмарев // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.- строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2019 – №4. – 79-88.
223. Брагов, А.М. Исследование механических свойств фибробетона с помощью методики кольского и ее модификаций / Брагов, А.М., Карихалоо, Б., Константинов, А.Ю.,

Ламзин, Д.А., Ломунов, А.К. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - Н. Новгород: ННГУ, 2011. - № 4. - ч. 1. - С. 123–129.

224. Брагов, А.М. Высокоскоростное деформирование и разрушение фибробетона / А. М. Брагов, Б. Л. Карихалу, Ю. В. Петров, А. Ю. Константинов, Д. А. Ламзин, А. К. Ломунов, И. В. Смирнов // Прикладная механика и техническая физика. - 2012. - Т. 53. - № 6. - С. 144-152.

225. Брагов, А.М. Исследование динамических свойств некоторых пород древесины, используемых для проектирования конструктивных элементов / А. М. Брагов, С. П. Горбиков, А. К. Ломунов // Приволжский научный журнал. - 2012. - № 4 (24). - С. 27-35.

226. Белов, Н.Н. Расчет прочности сталебетонных колонн на взрывные и ударные нагрузки / Н. Н. Белов, Н. Т. Югов, Д. Г. Копаница, О. В. Кабанцев, А. А. Югов, А. Н. Овечкина // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. - Томск, 2007. - № 2. - С. 132-138.

227. Белов, Н. Н. Расчет прочности стальных трубобетонных моделей колонн на неоднократный продольный удар / Н. Н. Белов, Н. Т. Югов, Д. Г. Копаница, С. Л. Капарулин, Р. С. Мамцев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. - Томск, 2009. - № 4. - С. 68-77.

228. Jun, W. Residual strength of CHS short steel columns after lateral impact / W. Jun, C. Yu, W. Kai // Thinwalled structures. - 2017. - № 118. - P. 23–36.

229. Hao, D. P. Seismic behavior of full-scale square concrete filled steel tubular columns under high and varied axial compressions / D. P. Hao // Earthquakes and Structures. - 2021.- Vol. 18(6). - P. 677-689. - DOI: 10.12989/eas.2020.18.6.677.

230. Phan, H.D. Seismic Performance of Concrete Filled Steel Tubular (CFST) Columns with Various Axial Compressive Loads [Электронный ресурс] / H. D. Phan, K. C. Lin // In: Tien Khiem, N., Van Lien, T., Xuan Hung, N. (eds) Modern Mechanics and Applications. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. - 2022. Режим доступа: URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3239-6\\_71](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3239-6_71).

231. Phan, H.D., Lin, K.C., Phan, H.T. Numerical Simulation of Full-Scale Square Concrete Filled Steel Tubular (CFST) Columns Under Seismic Loading [Электронный ресурс] / H. D. Phan, K. C. Lin, H. T. Phan // In: Tien Khiem, N., Van Lien, T., Xuan Hung, N. (eds) Modern Mechanics and Applications. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. - 2022. Режим доступа: URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-3239-6\\_68](https://doi.org/10.1007/978-981-16-3239-6_68).

232. Hao, D. P. Numerical analysis of seismic behavior of square concrete filled steel tubular columns [Электронный ресурс] / D. P. Hao // Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE. - 2021. - Vol. 15(2). - P. 127-140. - DOI: 10.31814/stce.nuce2021-15(2)-11.

233. Каличкина, А. С. Зависимость частоты собственных колебаний трубобетонной колонны от величины сжимающей силы / А. С. Каличкина // Инвестиции, строительство, недвижимость. - 2017. - С. 350-352.

234. Кришан А.Л. Несущая способность коротких трубобетонных колонн круглого сечения / А.Л. Кришан, В.И. Римшин, В.А. Рахманов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. - 2017. - № 4 (370). - С. 220-225.

235. Кришан, А.Л. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов / А.Л. Кришан, А.И. Заикин, М.С. Купфер // Бетон и железобетон. - 2008. - №2. - С. 22-25.

236. Хазов, П.А. Трехосное напряженное состояние бетона при продольном деформировании трубобетонных образцов / П.А. Хазов // Проблемы прочности и пластичности. - 2023. - №3 (85). - С. 312-322.

237. Карпенко, Н.И. Критерий прочно-сти бетона при трехосном сжатии / Н.И. Карпенко, В.И. Корсун, С.Н. Карпенко, А. М. Анущенко // Приволжский научный журнал. - 2022. - №4 (64). - С. 8-16.

238. Тамразян, А.Г. Испытание трубобетонных образцов малого диаметра с высоким коэффициентом армирования / А.Г. Тамразян, И.К. Манаенков // Строительство и реконструкция. - 2017. - №4 (72). - С. 57-62.

239. СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования (с Изменением N 1, с Поправкой). - М.: Минстрой России, 2016. 80 с.

240. Хазов, П.А. Экспериментальное исследование расчетных длин и коэффициентов продольного изгиба композитных трубобетонных образцов / П.А. Хазов, В.И. Ерофеев, Д.М. Лобов, А.П. Помазов, А.К. Ситникова // Приволжский научный журнал. - 2022. - №4 (64). - С. 16-24.

241. Хазов, П.А. Экспериментальное исследование прочности композитных трубобетонных образцов малогабаритных сечений / П.А. Хазов, В.И. Ерофеев, Д.М. Лобов, А.К. Ситникова, А.П. Помазов // Приволжский научный журнал. - 2022. - № 3 (63). - С.36-43.

242. Khazov, P.A. Experimental and analytical models of longitudinal deformation in pipe-concrete specimens with small cross-sections / P.A. Khazov, V.I. Erofeev, E.A. Nikitina, A.P. Pomazov // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. - 2023. - Vol. 19. - N. 4. - P. 410-418. - DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-410-418.

243. Morino, S. Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tube Column System in Japan / S. Morino, K. Tsuba // Earthquake and Engineering Seismology. - 2005. - No. 1. - Vol. 4. - P. 51-73.

244. Wang, J. Experimental study on seismic behavior of high-strength circular concrete-filled thin-walled steel tubular columns / J. Wang, Q. Sun, J. Li // *Engineering Structures*. - 2019. - Vol. 182. - P. 403-415.
245. Prasanta, K. Experimental investigation of partially confined concrete-filled steel tubular square columns under lateral cyclic loading / K. Prasanta, C.B. Arun, D.S. Konjengbam // *Journal of Constructional Steel Research*. - 2023. - Vol. 201.
246. Li, P. Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Columns Subjected to Axial Compression / P. Li, T. Zhang, C. Wang // *Advances in Materials Science and Engineering*. - 2018. - P. 1-15.
247. Lu, Y. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression / Y. Lu, Li Na, S. Li, H. Liang // *Construction and Building Materials*. - 2015. - No 95. - P. 74-85.
248. Wang, Z.B. Strength, stiffness and ductility of concrete-filled steel columns under axial compression / Z.B. Wang, Z. Tao, L.H. Han, B. Uy, D. Lam, W.H. Kang // *Engineering Structures*. - 2017. - Vol. 135. - P. 209-221.
249. Dai, X.H. Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression / X.H. Dai, D. Lam, N. Jamaluddin // *Thin-Walled Structures*. - 2014. - No 77. - P. 26–35.
250. Хазов, П. А. Методология цифровой поддержки и компьютерного моделирования динамических процессов : дисс. ... докт. техн. наук / Павел Алексеевич Хазов. – Нижний Новгород, 2025. – 345 с.
251. Тихонов, И.Н. Исследование прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременных динамических нагрузках. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / И.Н. Тихонов. - Москва. - 1974. - 19 с.
252. Тихонов, И.Н. Поведение железобетонных элементов при центральном сжатии однократной динамической нагрузкой до разрушения / И.Н. Тихонов // *Железобетонные конструкции*. Куйбышев, 1975. - С. 144-152.
253. Копаница, Д.Г. Собственные колебания сжатой сталебетонной колонны / Д.Г. Копаница, Р.П. Моисеенко, А.С. Пляскин // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. - 2017. - Т. 371. - № 5. - С. 259–261.
254. Копаница, Д.Г. Взаимосвязь напряженного состояния сжатой колонны и частоты собственных колебаний / Д.Г. Копаница, С.Л. Капарулин, А.С. Пляскин, А.М. Устинов, А.С. Каличкина // *Инвестиции, строительство и недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики: материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. - В 2 частях. - 2015. - С. 294-300.
255. Копаница, Д.Г. Исследование прочности бетонных, фибробетонных и железобетонных плит на высокоскоростной удар модельным снарядом / Д.Г. Копаница, Н.Н.

Белов, Н.Т. Югов, А.Г. Ласковенко, Г.А. Ласковенко, А.С. Пляскин, А.У. Усманов // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия: сборник докладов Международной научно-практической конференции. Москва: НИУ МГСУ. - 2016. - С. 186-192.

256. Пляскин, А.С. Экспериментальные исследования зависимости частоты собственных колебаний железобетонной колонны от величины сжимающей силы / А.С. Пляскин, А.М. Устинов, Б.О. Кошко // Инвестиции, строительство, недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики: материалы VII Международной научно-практической конференции. Томск: ТГАСУ. - 2018. - Ч. 1. - С. 416–420.

257. Пузанков, Ю.И. Прочность и деформативность сжатых железобетонных элементов при поперечной динамической нагрузке. Автореф. дисс. ...канд. техн. наук. / Ю.И. Пузанков. - Москва, 1979. - 22 с.

258. Eibl, J. Behavior of critical regions under hard impact / J. Eibl // Concrete structures under impact and impulsive loading. Berlin (West). - 1982. - Vol. 1. - P. 113-127.

259. Louw, M.J. The Behaviour of RC Columns under Impact Loading / M.J. Louw, G. Maritz, M.J. Loedolff // The Civil Engineer in South Africa. - 1992. - P. 371-378.

260. Jun, W. Residual strength of CHS short steel columns after lateral impact / W. Jun, C. Yu, W. Kai // Thinwalled structures. - 2017. - №118. - P. 23–36.

261. Хазов, П.А. Прочность и продольный изгиб трубобетонных стержней при центральном сжатии / П.А. Хазов, А.П. Помазов // Строительная механика и конструкции. - 2023. - №2 (73). - С. 77-86.

262. Потапов, А.Н. Динамический расчет подкрановой фермы при конструктивно нелинейной работе ее элементов / А.Н. Потапов, Н.А. Зямбаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». - 2015. - Т. 15. - № 3. - С. 26–31.

263. Теличко, Л.Я. Система управления электроприводами, обеспечивающая бесперекусное передвижение мостовых кранов / Л.Я. Теличко, А.А. Дорофеев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2010. - Т. 6. - №3. - С. 116-118.

264. Ахтулова, Л.Н. Визуальное моделирование двухбалочного мостового крана как сложной динамической системы / Л.Н. Ахтулова, А.Л. Ахтулов, О.М. Кирасиров, В.А. Машонский // Омский научный вестник. - 2014. - №1 (127). - С. 147-152.

265. Федяева, Г. А. Моделирование динамики электромеханической системы мостового крана / Г. А. Федяева, Д. В. Кочевин , В.П. Лозбинев , Ф.Ю. Лозбинев // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2014. - № 1 (41). - С. 63-67.

266. Корытов, М.С. Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана / М.С. Корытов, В.С. Щербаков, Е.О. Шершнева // Вестник СибАДИ. - 2017. - № 1(53). - С. 12–19.
267. Vib, J. Parallel neural network combined with sliding mode control in overhead crane control system / J. Vib., L. Lee, P. Huang, Y. Shih, et al. // Control. - 2014. - № 20. - P. 749–760.
268. Круглов, С.П. Метод адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза / С.П. Круглов, Д.Н. Аксаментов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. - № 21(12). - С. 682–688.
269. Аксаментов, Д.Н. Установка по исследованию алгоритмов успокоения колебаний груза мостового крана / Д.Н. Аксаментов, С.П.Круглов, С.В. Ковыршин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. - 2019. - Т. 2. - С. 288–292.
270. Ведерникова, Е.Л. Исследование диссипативных свойств упругих систем грузоподъемных кранов / Е.Л. Ведерникова // Транспортное дело России. - 2007. №1. - С. 157-159.
271. Repin, S. Automotive shock absorbers' applicability for damping resonant oscillations in construction machines / S. Repin, R. Litvin, V. Kuzmichev, I. Vorontsov // Architecture and Engineering. - 2021. - Vol. 6. - Issue 1. - P. 81–87.
272. Ramesh G. Development of Pneumatic Shock Absorber by Variable Damping / G. Ramesh, C. Jayabalan, M. Selvam, S. Palani, D. Vijayakumar // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). - 2019. - Vol. 8. - Issue 6. - P. 1355-1360.
273. Ammar, A.E. Choosing effective damping systems for structures with wide range displacement amplitudes / A.E. Ammar, M. Abdelaziz, I.S. Elmasry [Электронный ресурс] // The eleventh alexandria international conference on structural, geotechnical engineering and management "AICSGE-11" At: Alexandria – Egypt. – Режим доступа: URL: <https://www.researchgate.net/publication/380368815>
274. Rahnavard, R. Static and dynamic stability analysis of a steel-rubber isolator with rubber cores / R. Rahnavard, H.D. Craveiro, R. Napolitano // Structures. – 2020. – Vol. – 26. - P. 441–455. - DOI 10.1016/j.istruc.2020.04.048.
275. Roncen, T. Experiments and nonlinear simulations of a rubber isolator subjected to harmonic and random vibrations / T. Roncen, J. Sinou, J.P. Lambelin, J. Journal of Sound and Vibration. - 2019. - 451(5). - P. 71–83. - DOI: 10.1016/j.jsv.2019.03.017.
276. Сахновский, М.М. Уроки аврий стальных конструкций / М.М. Смахновский, А.М. Титов. - Издательство "Будівельник", 1969. - 204 с.

277. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций / СО Стальмонтаж, ВНИПИ Промстальконструкция, ЦНИИПСК им. Мельникова. – М., 1988. – 83 с.
278. Руководство по проектированию, изготовлению и сборке монтажных фланцевых соединений стропильных ферм с поясами из широкополочных двутавров / ЦНИИПСК им. Мельникова. – М., 1981.
279. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП П-23-81\* (с Поправкой, с Изменением N 1): свод правил утв. приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. №126/пр и введен в д. с 28 августа 2017 г./ ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – институт АО «НИЦ» Строительство», 2017. - 148 с.
280. СП 53–102–2004. Общие правила проектирования стальных конструкций. - ЦНИИСК им. Кучеренко, ЗАО ЦНИИПСК им. Мельникова, ОАО Ин-т «Энергосеть», 2005. - 138 с.
281. EN 1993-1-8. Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 1.8: Design of joints. CEN, 2005.
282. BS 5950-1:2000. British standard. Structural use of steelwork in building. Part 1: Code of practice for design – Roller and welder sections. - 222 p.
283. Joints in Steel Construction Moment Connections. The Steel Construction Institute, 1997В. В. - 172 p.
284. Хазов П.А. Экспериментальное исследование прочности композитных трубобетонных образцов малогабаритных сечений / П.А. Хазов, В.И. Ерофеев, Д.М. Лобов, А.К. Ситникова, А.П. Помазов // Приволжский научный журнал. - 2022. - 3(63). - С. 36-43.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. руководителя НИОКР  
АО АНПП «ТЕМП-АВИА»

Худов В.В.

«21» 02 2025 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ  
АВТОРСКИХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ШКОДА ИРИНЫ ВАСИЛЬЕВНЫ, СОИСКАТЕЛЯ УЧЕННОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Подтверждаем, что методика определения приведенного коэффициента упругости материала, учитывающего осевую силу сжатия, при помощи блока акселерометра при свободных изгибных колебаниях шарнирно-опертых образцов, разработанная в процессе научно-исследовательской деятельности на соискание ученой степени кандидата технических наук, интегрирована в научно-исследовательский процесс Акционерного общества «Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА» в рамках инициативного проекта по разработке системы мониторинга технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений.

Эксперт:

Зам. начальника отдела  
инновационного развития

Гурлов Д.В.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НИЖЕГОРОДСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
доктор исторических наук  
Гордин Алексей Александрович

01.01-12/9

« 18 » ~~сентября~~ 2026 г.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ  
РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертации Шкода Ирины Васильевны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин», были успешно внедрены в учебный процесс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»:

| Направление подготовки/Специальность  | Дисциплина  |
|---|---|
| 08.03.01 Строительство (профиль: промышленное и гражданское строительство)  | Теория динамических расчетов зданий и сооружений          |
| 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений (специализация: строительство высотных и большепролетных зданий и сооружений) | Теория расчета на динамические и сейсмические воздействия |
| 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений (специализация: строительство высотных и большепролетных зданий и сооружений) | Теория автоматизированного проектирования и расчета       |

Заведующий кафедрой теории сооружений и технической механики, кандидат технических наук, доцент

Лампси Борис Борисович

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "НИЖЕГОРОДСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ  
проректор по научной работе и  
цифровому развитию,  
доктор технических наук  
Конопацкий Евгений Викторович

20.01.2026 №01/26



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ  
РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертации Шкода Ирины Васильевны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин», были успешно применены при разработке системы мониторинга строительных конструкций зданий и сооружений в рамках проекта «Техноплатформа 2035» (соглашение №16-11-2021/55 от 16.11.2021 г.), реализованного на базе научно-исследовательской лаборатории «Непрерывный контроль технического состояния зданий и сооружений» при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Руководитель научно-образовательных  
проектов, кандидат физико-  
математических наук, профессор

Лихачева С.Ю.

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024682661

**«Определение разрушающей нагрузки для центрально  
сжатого трубобетонного стержня»**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-  
строительный университет» (RU)**

Авторы: **Хазов Павел Алексеевич (RU), Помазов Артём  
Павлович (RU), Шкода Ирина Васильевна (RU)**

Заявка № 2024681197

Дата поступления **12 сентября 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **26 сентября 2024 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024689601

**«Расчет динамических параметров материала на основании показаний блока акселерометров»**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (RU)**

Авторы: **Хазов Павел Алексеевич (RU), Помазов Артём Павлович (RU), Помазов Степан Павлович (RU), Шкода Ирина Васильевна (RU), Васина Лидия Юрьевна (RU)**

Заявка № **2024687355**

Дата поступления **14 ноября 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 декабря 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. Алексеева



Министерство  
образования и науки  
Нижегородской области

приоритет

Передовые  
инженерные  
школы



СМУиС  
НГТУ



# ДИПЛОМ

## I степени

в XXIV Всероссийской молодежной  
научно-технической конференции  
«БУДУЩЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ НАУКИ»

НАГРАЖДАЕТСЯ

*Шкода Ирина Васильевна*

*Анализ динамических свойств макета каркаса  
промышленного здания со свозными  
брусьянобетонными колонами.*



Ректор

С.М. Дмитриев

29-30.05.2025 г.

