

на правах рукописи



Шкода Ирина Васильевна

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

Специальность: 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва, 2026

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» (ННГАСУ)

Научный руководитель: **Хазов Павел Алексеевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теории сооружений и технической механики» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», г. Нижний Новгород.

Официальные оппоненты: **Попов Виктор Сергеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов.

Саиян Сергей Гургенович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Строительная и теоретическая механика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород.

Защита диссертации состоится 09 октября 2026 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.13, созданном на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 и на сайте: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=188495

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.327.13, к.т.н.



Орехов Александр Александрович

Актуальность работы. 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 конструкций, 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.**

Объектом исследования являются конструкции и системы, предназначенные для перемещения и эксплуатации подъемно-транспортных машин и их стержневые элементы, работающие в условиях динамических и вибрационных воздействий.

Предметом исследования являются экспериментальные и численные методы оценки динамических характеристик, демпфирующих свойств и напряженно-деформированного состояния стальных и трубобетонных элементов при динамических нагрузках.

Цель работы. Разработка экспериментальных методик проведения динамических испытаний и основанные на них исследования деформационных и демпфирующих свойств трубобетонных конструкций при динамических воздействиях.

В соответствии с целью были решены следующие **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.

Степень разработанности темы. 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. Трулль, 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.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин:

п. 3. Теория колебаний механических систем.

п. 13. Динамика систем, состоящих из абсолютно твердых и деформируемых тел, в том числе машин, приборов и конструкций.

п. 14. Математическое и компьютерное моделирование кинематики и динамики механических систем, в том числе машин, приборов и их элементов при динамических, статических, тепловых и других видах воздействий

п. 15. Экспериментальное исследование динамики систем тел, в том числе летательных аппаратов, машин, приборов и конструкций (только технические науки).

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. 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**);

2. 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**);

3. 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**);

4. 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:

— 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).

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

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 методы, методы статистического анализа.

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**:

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

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

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

Степень достоверности и апробация 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 натурных 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.

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» (Нижний Новгород, 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 Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки» (г. Нижний Новгород, 2025 г.) (Диплом I степени).

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.

Объем работы. Диссертация состоит из следующих разделов: введения, четырех глав, выводов, приложений; изложена на 162 страницах текста, содержит 77 рисунков, 15 таблиц, список литературы из 284 наименований.

Основное содержание работы. На рис. 1 приведена взаимосвязь глав диссертации, показано соответствие глав паспорту научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

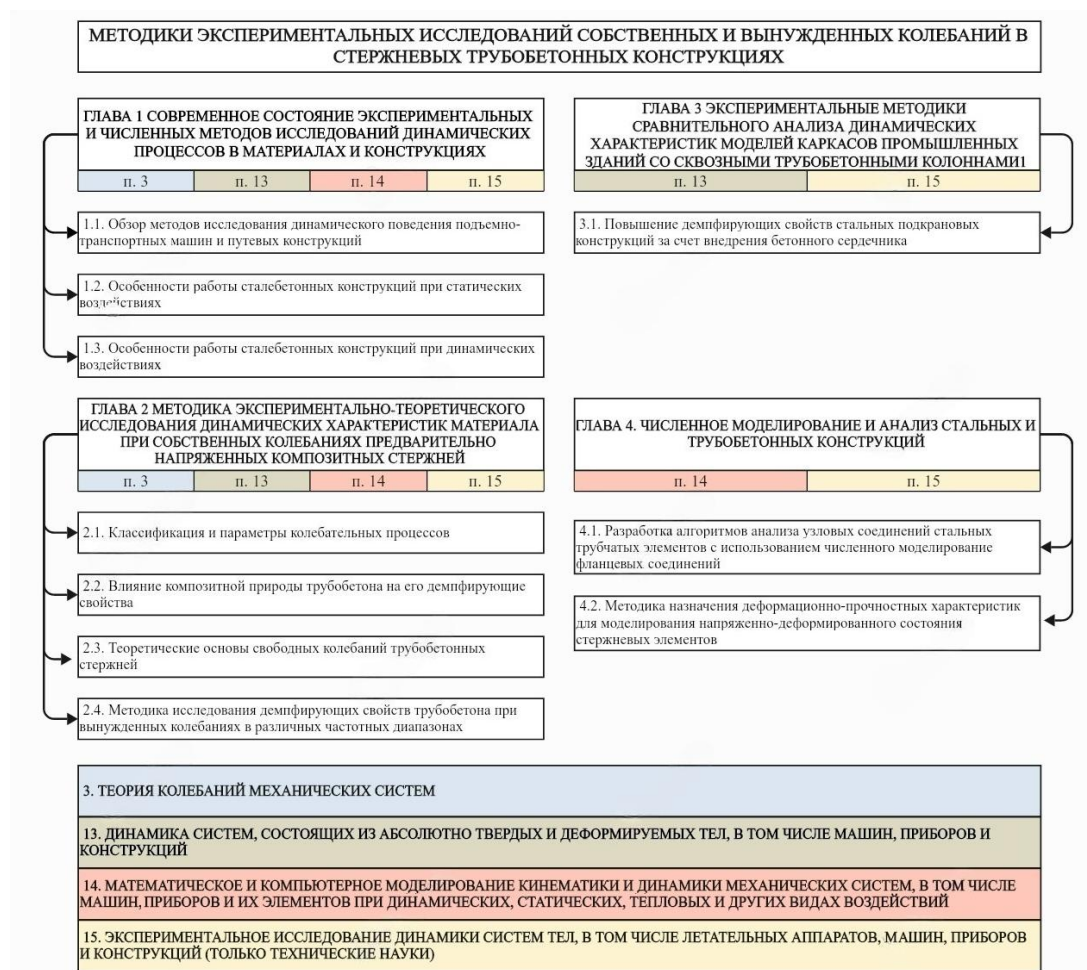


Рис.1. Структура диссертации и взаимосвязь глав, а также соответствие пунктам паспорта научной специальности.

Во **введении** обоснована актуальность исследования, обозначены цели и задачи, значимость диссертации, положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** на основе анализа современного состояния вопроса выявлены ключевые проблемы и методологические пробелы в области исследования динамических процессов в конструкциях, а именно: недостаточный учет реальных условий эксплуатации (перекосы, волновые эффекты, нестационарность нагрузок), отсутствие комплексных методов анализа демпфирующих свойств композитных систем, в частности трубобетона, а также противоречия между существующими аналитическими моделями и экспериментальными данными. Проведенный обзор позволил систематизировать динамические воздействия и обосновать актуальность разработки новых методов цифрового моделирования и экспериментального определения динамических характеристик, что определило направления собственных исследований, представленных в работе.

Вторая глава посвящена разработке и апробации комплексной методики экспериментально-теоретического определения динамических характеристик трубобетона. Методика основана на возбуждении поперечных колебаний шарнирно опертых предварительно напряженных трубобетонных стержней. Для возбуждения свободных затухающих колебаний используется ударный импульс (пружинный ударник), для вынужденных — гармоническая сила от электродвигателя с эксцентриком. Регистрация параметров колебаний выполняется трёхосным акселерометром. Ключевыми определяемыми параметрами являются приведенный коэффициент упругости E_N , декремент

колебаний ε и коэффициент неупругой работы материала γ . Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

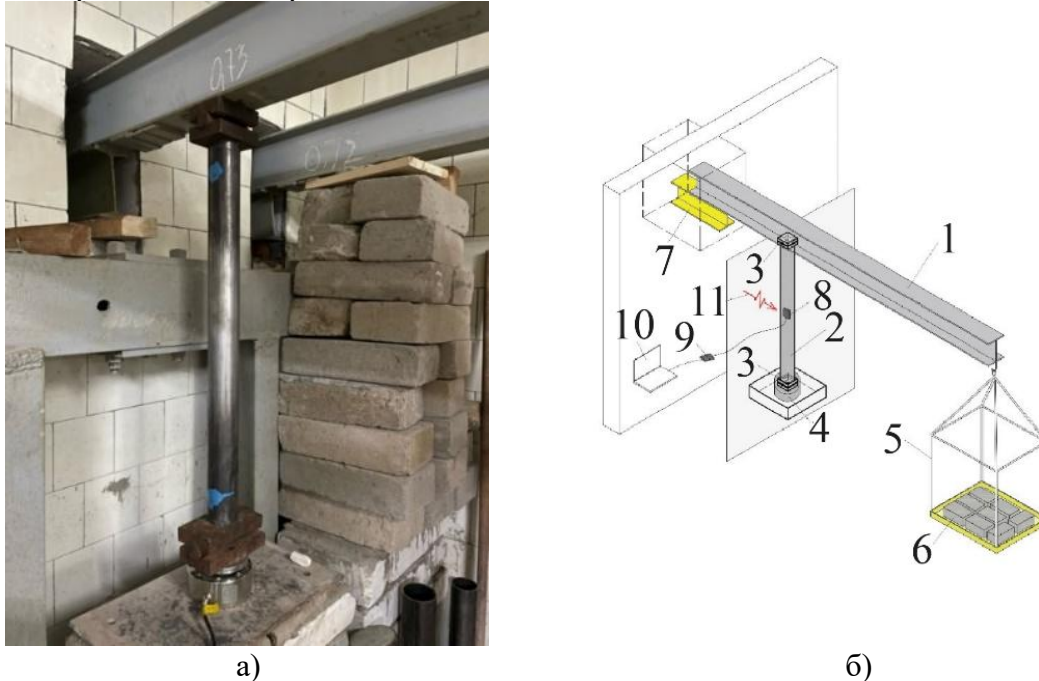


Рис. 2. Испытания центрально сжатых образцов для определения параметров свободных колебаний: а) общий вид; б) аксонометрическая схема экспериментальной установки: 1 – загружающий рычаг; 2 – испытуемый образец; 3 – цилиндрический опорный шарнир; 4 – силомер; 5 – корзина; 6 – гири; 7 – страховочная конструкция; 8 – блок акселерометра; 9 – модуль обработки сигнала акселерометра; 10 – ноутбук для регистрации осциллограмм и результатов измерений вибрации; 11 – импульсное воздействие с помощью ударника.

Экспериментально установлено существенное влияние уровня продольного сжатия на собственные частоты и демпфирующие свойства. Увеличение сжимающей силы от 6,8 кН до 36,5 кН приводит к нелинейному росту собственной частоты колебаний на 74,4%, что связано с повышением эффективной жёсткости системы. Логарифмический декремент колебаний ε возрастает с 6,20 до 10,10. Столь высокие значения (по сравнению с $\varepsilon \approx 0,314$ для бетона и $\varepsilon \approx 0,08$ для стали) объясняются совместной работой разнородных материалов: упругая стальная оболочка и неупругий бетонный сердечник, различие их упругих свойств, а также трение на границе контакта приводят к интенсивному рассеиванию энергии. При увеличении продольной силы контактное давление возрастает, что усиливает диссипацию и дополнительно повышает декремент. На рис. 3 показана зависимость частоты свободных колебаний от осевой нагрузки.

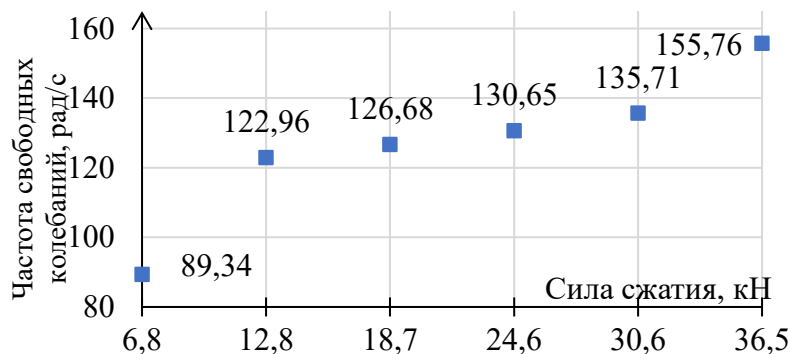


Рис. 3. График зависимости частоты свободных колебаний от осевой нагрузки.

На основе экспериментальных данных получена и аппроксимирована полиномиальная зависимость третьей степени влияния осевой нагрузки N на приведенный коэффициент E_N : $E_N(N) = c_3x^3 + c_2x^2 + c_1x + c$, которая количественно описывает совместное влияние

собственной упругости материала и продольной силы на жесткость системы. График зависимости приведенного коэффициента E_N от осевой нагрузки представлен на рис. 4.

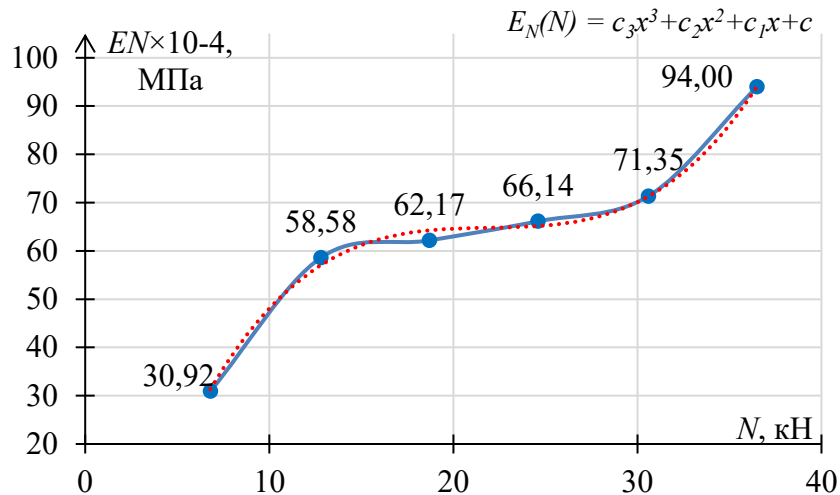


Рис. 4. График приведенного коэффициента в зависимости от осевой нагрузки с аппроксимирующей монотонной функцией $E_N(N)$.

Определены демпфирующие свойства трубобетона в сравнении с традиционными материалами. Коэффициент неупругой работы γ для трубобетона демонстрирует стабильность (вариация не более 7,5% при изменении нагрузки) и находится в диапазоне 0,129 – 0,139, что на 30–40% превышает показатель для железобетона и значительно (в 4-5 раз) превышает показатель для стали (табл. 1). Это обуславливает более пологую форму резонансных кривых (рис. 5) и подтверждает высокую эффективность трубобетона для динамически нагруженных конструкций.

Табл. 1. Показатели динамических характеристик трубобетонного образца

Сжимающая сила, ед. изм.	$N_1=6,8$ кН	$N_6=36,5$ кН
Декремент колебаний, ε	6,20	10,10
Коэффициент неупругой работы, γ	0,139	0,129

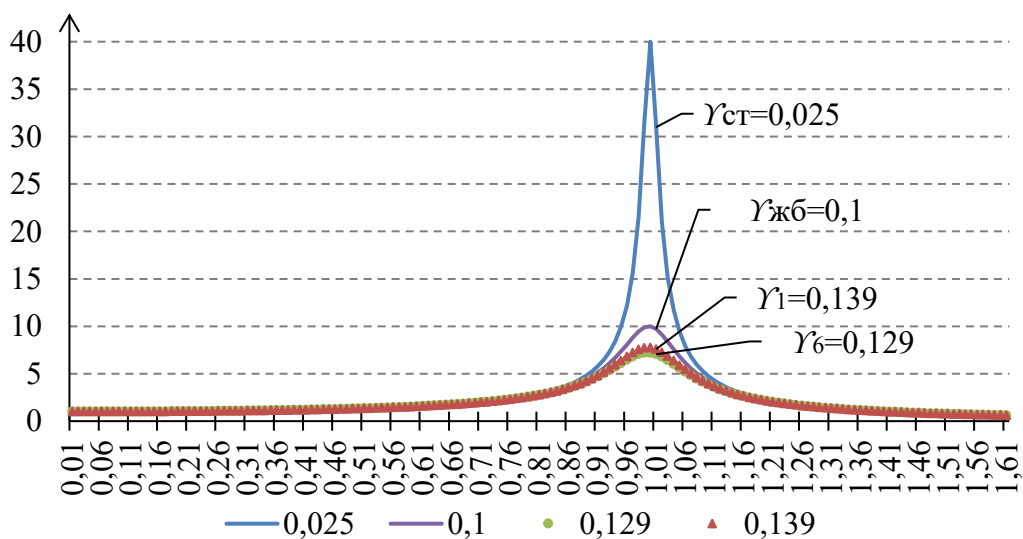


Рис. 5. График резонансных кривых различных материалов: $\gamma_{жб}$ – коэффициент неупругой работы железобетона, γ_c – коэффициент неупругой работы стали, γ_1, γ_6 – коэффициент неупругой работы трубобетона.

Исследование вынужденных колебаний (рис. 6) показало, что характер изменения частоты отклика при увеличении мощности (частоты возмущения) зависит от диаметра образца. Для образцов диаметром 60 и 76 мм частота вынужденных колебаний снижается на 15–50%, тогда как для образца диаметром 120 мм наблюдается её рост. В диапазоне сжимающих сил 12,8–18,7 кН для образцов 60–76 мм зафиксирован немонотонный характер изменения отклика, что может соответствовать прохождению резонансной зоны. На рис. 7 приведены зависимости частоты вынужденных колебаний от мощности двигателя (пропорциональной частоте возмущения) при различных уровнях сжимающей силы.

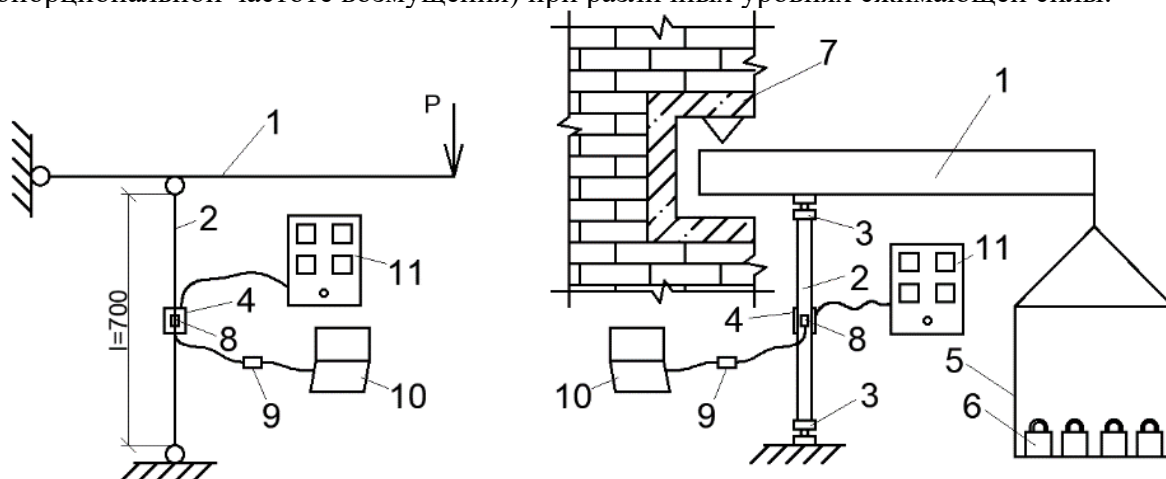
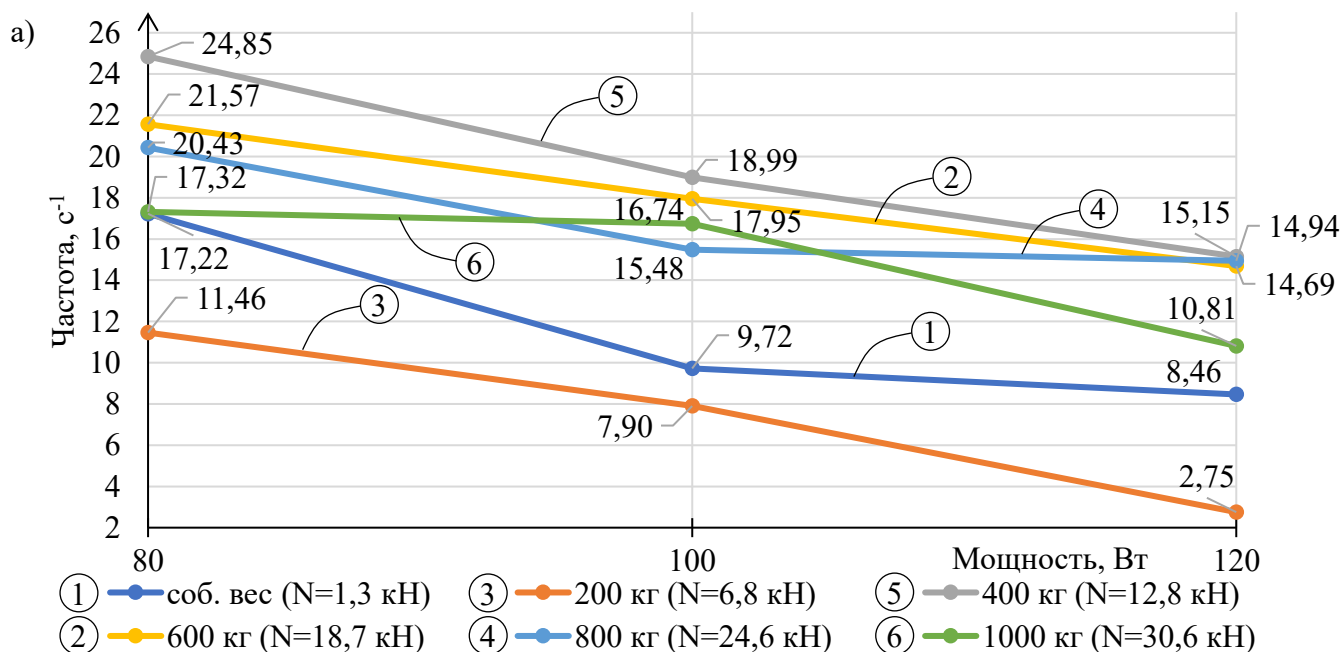


Рис. 6. Плоская схема и расчетная модель экспериментальной установки для исследования вынужденных колебаний сжатых трубобетонных образцов при различной частоте возмущающего воздействия (регулируемой изменением мощности двигателя): 1 – загружающий рычаг; 2 – испытуемый образец; 3 – цилиндрический опорный 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.



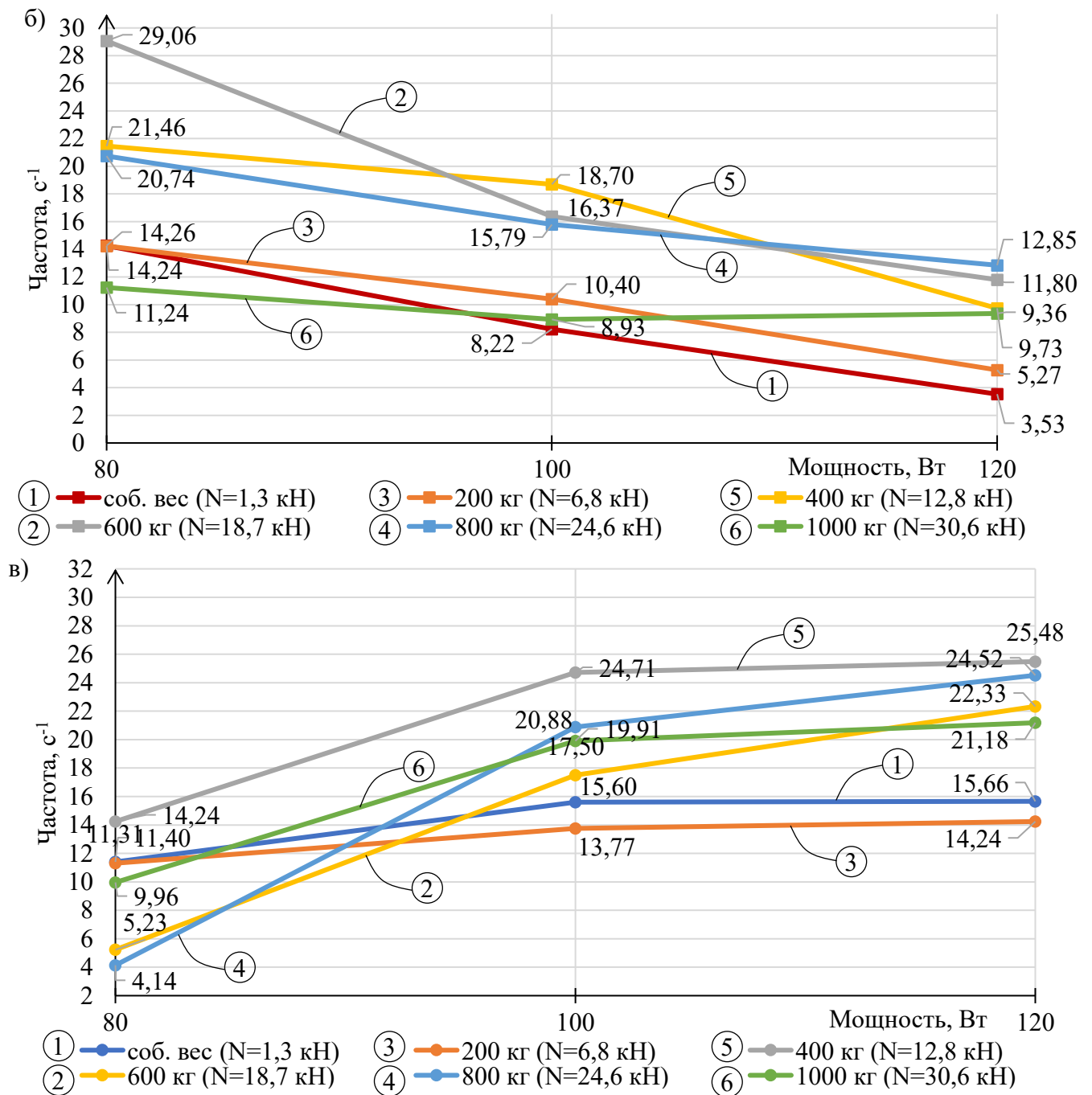


Рис. 7. Графики зависимости частоты колебаний образца от частоты возмущающего воздействия (регулируемой изменением мощности двигателя) при различной осевой нагрузке: а) диаметр образца 60 мм; б) диаметр образца 76 мм; в) диаметр образца 120 мм.

Таким образом, полученные результаты вносят вклад в механику композитных сред, предоставляя новые данные о поведении трубобетона при динамических воздействиях. Разработанные методики и установленные зависимости могут быть использованы для верификации численных моделей и оптимизации проектных решений динамически нагруженных конструкций.

Глава 3 посвящена экспериментальному сравнительному анализу динамических характеристик моделей каркасов промышленных зданий со сквозными трубобетонными колоннами. Исследование направлено на оценку повышения демпфирующих свойств стальных конструкций для эксплуатации подъемно-транспортных машин за счет внедрения бетонного сердечника. Для этого были изготовлены и испытаны две масштабные модели каркаса (масштаб 1:6): с полыми стержнями (МКП) и с трубобетонными стержнями (МКТ).

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.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 8.



Рис. 8. Экспериментальная установка для проведения исследования свободных затухающих 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.

Эксперименты проводились при различных сценариях: трех углах динамического воздействия (0° , 45° , 90°), трех уровнях жесткости пружинной системы (1, 2, 3, 4 пружины) и переменной нагрузке на каркас (0 кг, 10 кг, 20 кг). Регистрация колебаний осуществлялась с помощью трех трехосных акселерометров.

Ключевым результатом является подтверждение эффекта снижения собственной частоты колебаний каркаса при использовании трубобетонных колонн по сравнению с полыми. Это свидетельствует о снижении риска резонанса, а повышение демпфирующих свойств подтверждается отдельно рассчитанными значениями декремента колебаний. На рис. 9-11 показаны усредненные значения первой собственной частоты для двух типов каркасов при различной жесткости основания.

Эффективность внедрения бетонного сердечника количественно оценена через процентное изменение круговой частоты. Наибольшая эффективность (10,48%) была зафиксирована для системы с четырьмя пружинами при нагрузке 10 кг и угле воздействия 0° (поперек шага колонн). В табл. 2 представлены сводные данные по эффекту внедрения для различных условий.

Табл. 2. Эффективность внедрения бетонного сердечника в % при расположении макета под углом 0°

Нагрузка	Жесткость основания			
	4 пружины	3 пружины	2 пружины	1 пружина
0 кг	4,01	3,46	3,87	2,79
10 кг	10,48	5,40	4,23	3,60
20 кг	1,61	3,08	2,90	3,89

Анализ декремента колебаний показал, что бетонный сердечник значительно улучшает способность системы рассеивать энергию. При нагрузке 20 кг каркас МКТ демонстрирует увеличение декремента колебаний до 160,88% по сравнению с полым каркасом, что подтверждает его высокую эффективность в условиях значительных динамических воздействий.

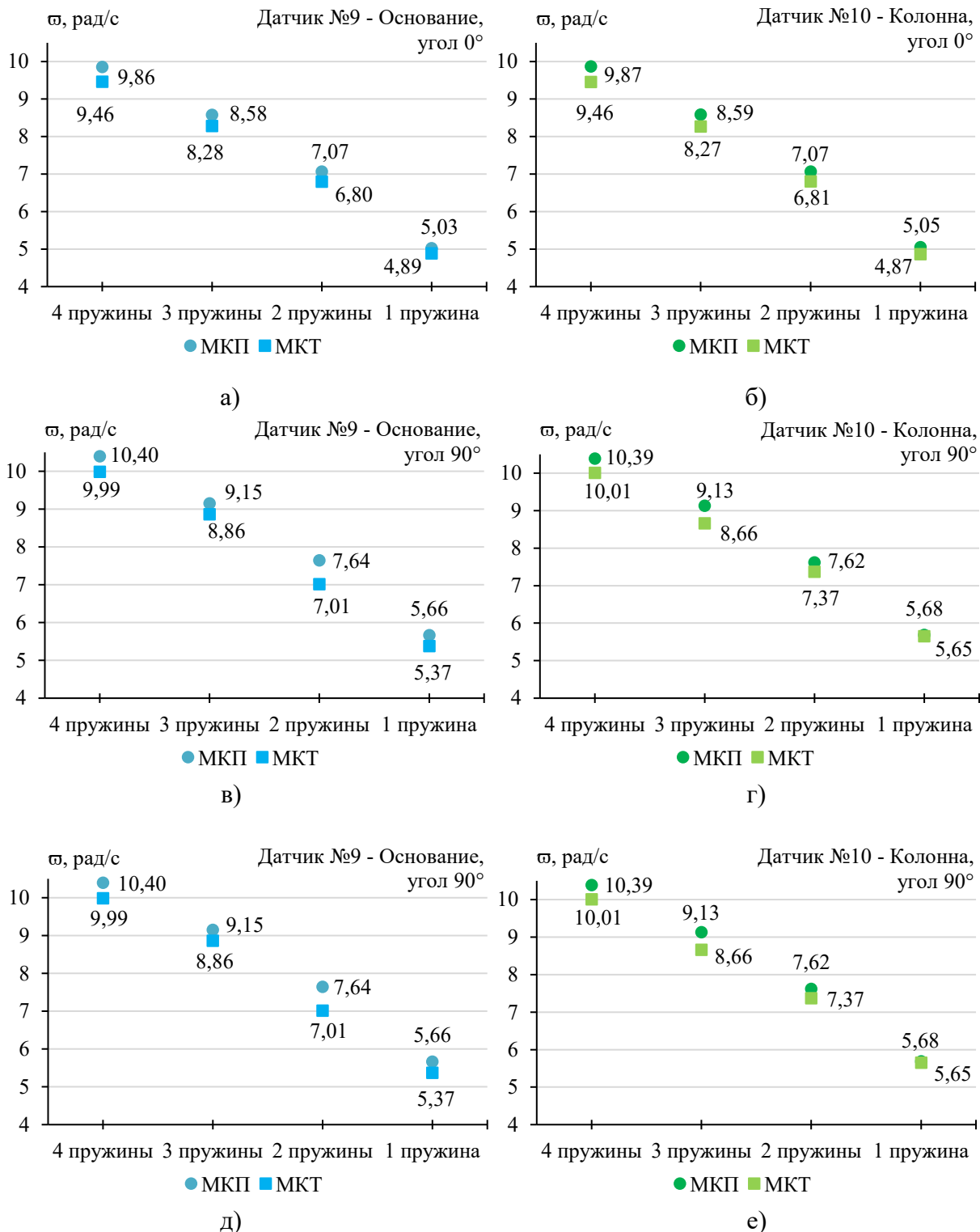


Рис. 9. Усредненные значения первой собственной частоты $\bar{\omega}$ колебаний моделей каркасов МКП и МКТ без нагрузки в зависимости от жесткости основания: (а), (в), (д) датчик №9, установленный на основание при положении каркаса на платформе под углами 0°, 45°, 90° соответственно; (б), (г), (е) датчик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

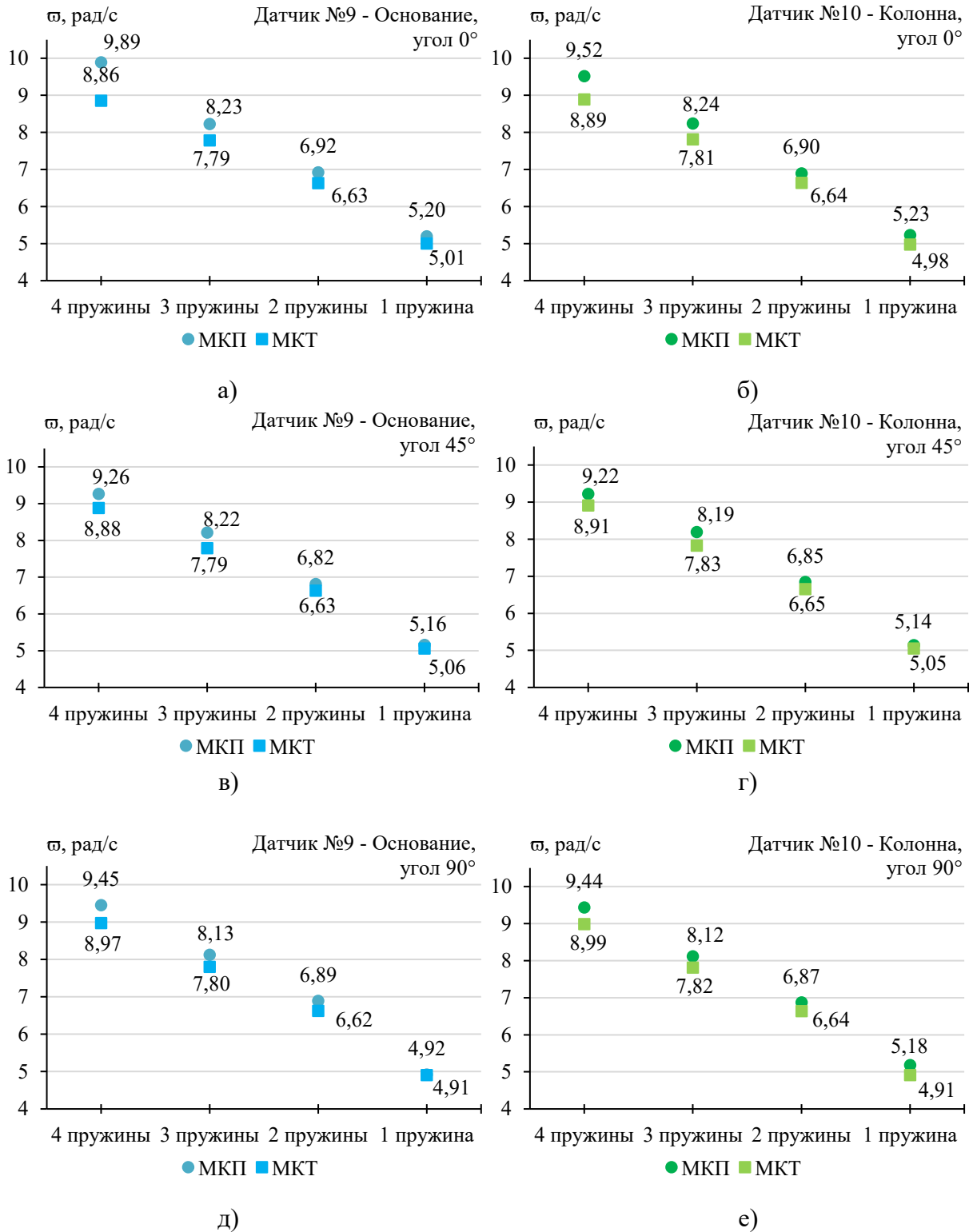


Рис. 10. Усредненные значения первой собственной частоты $\bar{\omega}$ колебаний моделей каркасов МКП и МКТ с нагрузкой 10 кг в зависимости от жесткости основания: (а), (в), (д) датчик №9, установленный на основание при положении каркаса на платформе под углами 0°, 45°, 90° соответственно; (б), (г),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

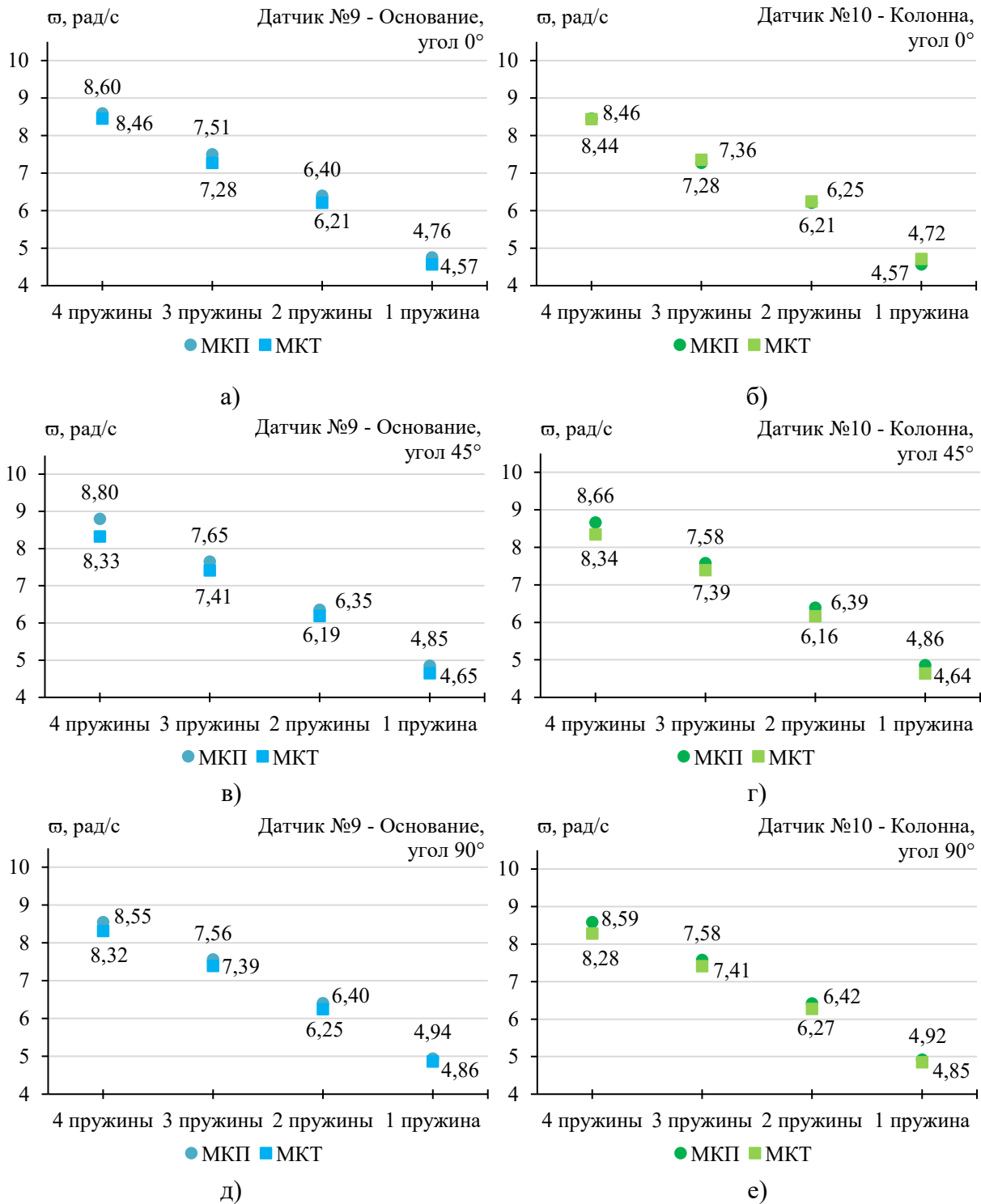


Рис. 11. Усредненные значения первой собственной частоты $\bar{\omega}$ колебаний моделей каркасов МКП и МКТ с нагрузкой 20 кг в зависимости от жесткости основания: (а), (в), (д) датчик №9, установленный на основание при положении каркаса на платформе под углами 0°, 45°, 90° соответственно; (б), (г), (е) датчик №10, установленный на колонну при положении каркаса на платформе под углами 0°, 45°, 90° соответственно.

Таким образом, экспериментально доказано, что внедрение бетонного сердечника в стальные стержневые элементы конструкций для эксплуатации подъемно-транспортных машин позволяет существенно повысить их демпфирующие свойства, что проявляется в уменьшении амплитуды вибраций и снижении собственной частоты колебаний. Наибольшая эффективность достигается при поперечных нагрузках и в системах с высокой жесткостью при умеренных массах (до 12 кг для модели). Апробированная методика масштабного моделирования с коэффициентом $\lambda = 6$ подтвердила свою достоверность и применимость для переноса результатов на реальные объекты.

Экспериментальные образцы, рассмотренные в предыдущих главах, представляли собой сплошные трубы ограниченной длины. Однако при переходе к полномасштабным конструкциям возникает необходимость соединения отдельных элементов, и одним из наиболее распространенных решений является фланцевый стык. В связи с этим **четвертая глава** посвящена разработке и апробации методов численного моделирования и сравнительного анализа стальных фланцевых соединений, а также экспериментальным методам назначения характеристик для моделирования труботетонных элементов.

С использованием программного комплекса *IDEA StatiCa* проведено численное моделирование и сравнительный анализ четырех вариантов фланцевых соединений круглых труб и шести вариантов для гнутосварных труб прямоугольного сечения с варьируемой толщиной фланца (25-40 мм). Схемы исследуемых узлов представлены на рис. 12, 13.

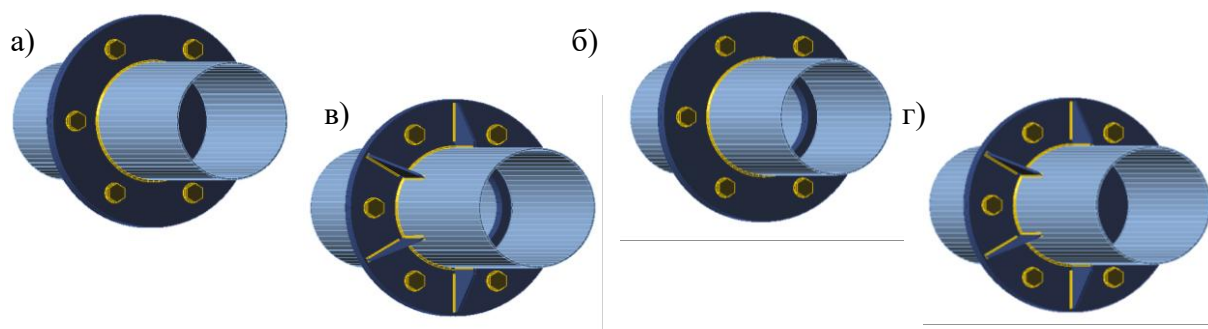


Рис. 12. Варианты конструкций фланцевого узла из круглых труб: а) непрорезной узел без ребер жесткости; б) прорезной узел без ребер жесткости; в) непрорезной узел с ребрами жесткости; г) прорезной узел с ребрами жесткости.

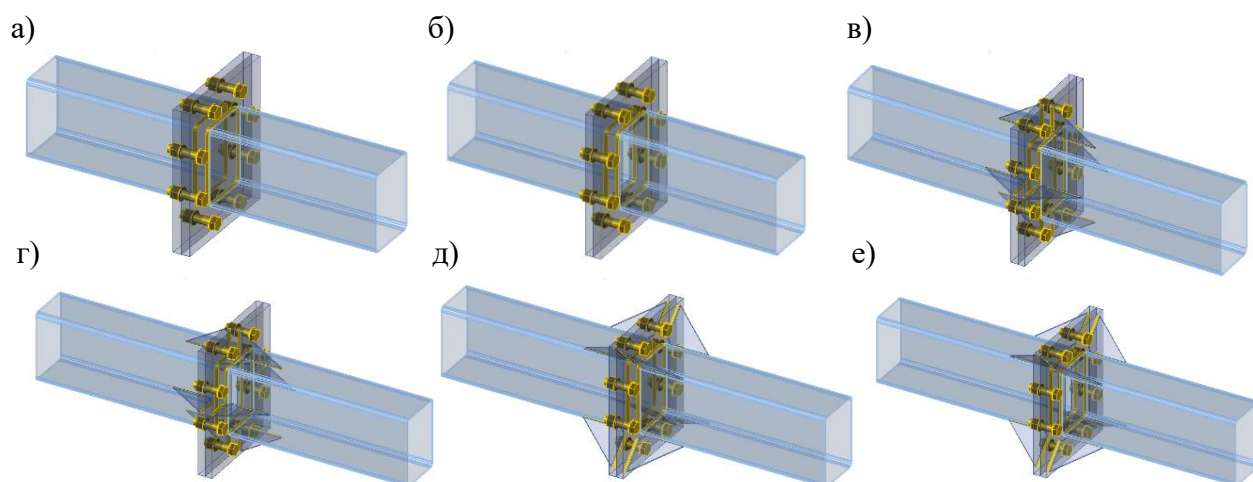


Рис. 13. Варианты конструкций фланцевого узла из гнутосварных труб прямоугольного сечения: а) непрорезной узел без ребер жесткости; б) прорезной узел без ребер жесткости; в) непрорезной узел с ребрами жесткости на гранях профиля; г) прорезной узел с ребрами жесткости на гранях профиля; д) непрорезной узел с ребрами жесткости по углам профиля; е) прорезной узел с ребрами жесткости по углам профиля.

Комплексный анализ по критериям «напряженно-деформированное состояние – несущая способность – материалоемкость» позволил выявить оптимальные конструктивные решения. Для круглых труб наибольшей несущей способностью ($\approx 194\%$) при умеренной материалоемкости обладает прорезной узел с ребрами жесткости. Для прямоугольных труб наилучшие характеристики демонстрирует прорезной узел с ребрами жесткости, расположенными по углам профиля (несущая способность $166,7\%$). На рис. 14 показана зависимость несущей способности от толщины фланца для ключевых вариантов.

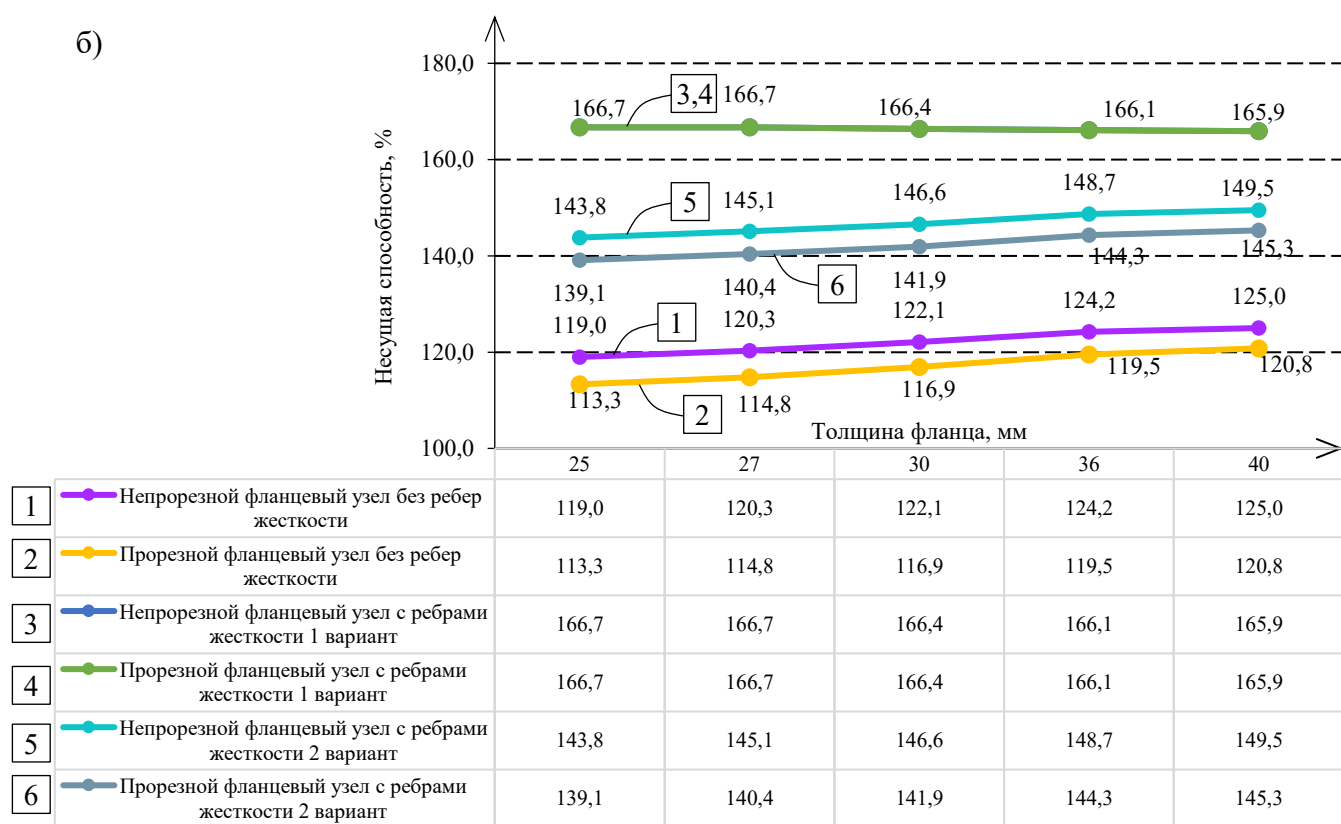
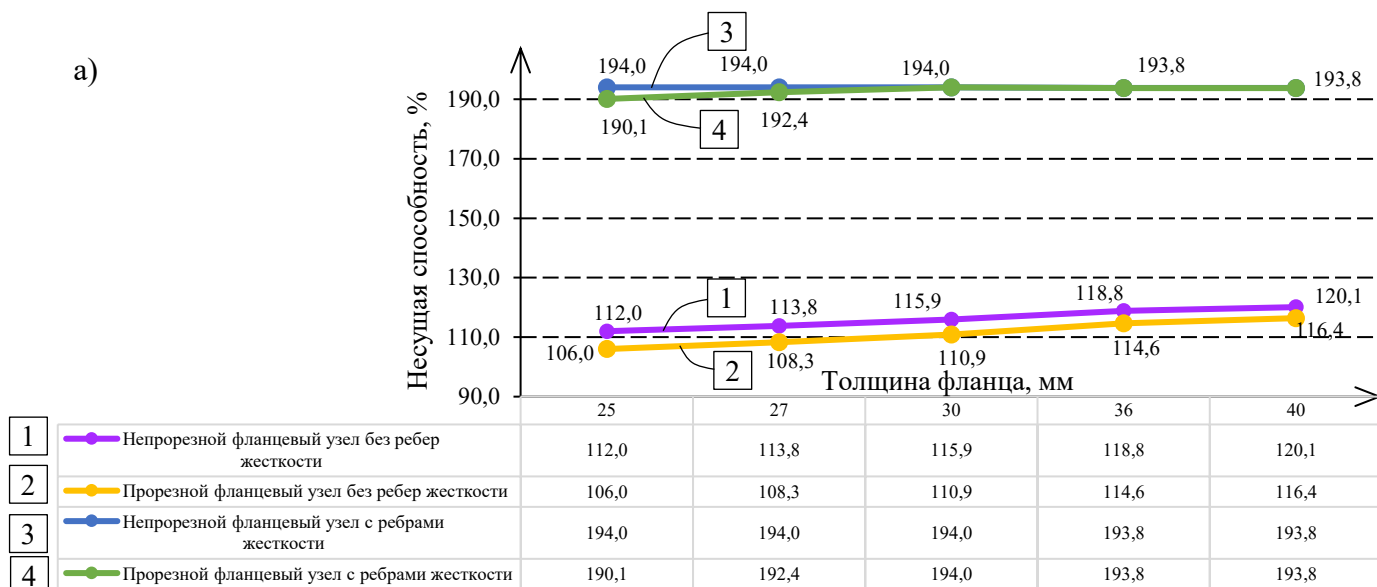
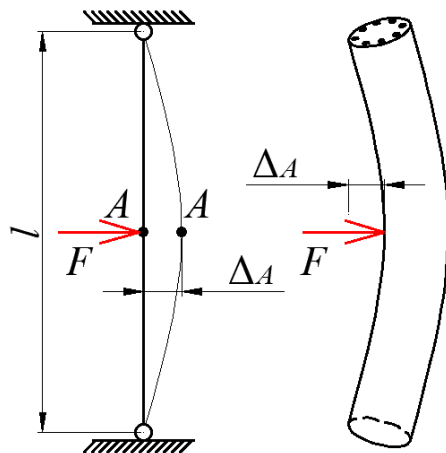


Рис. 14. Зависимость несущей способности фланцевого узла от толщины пластины фланца: а) для узлов из круглых труб; б) для узлов из гнутосварных труб.

Помимо исследования узлов соединения, важной задачей является корректное задание свойств самих трубобетонных элементов при численном моделировании. Для обеспечения достоверности расчетов в стержневых ПВК необходим экспериментальный подход к определению их жесткостных характеристик. В связи с этим в данной главе также разработана и апробирована экспериментальная методика определения продольной (EA) и изгибной (EI) жесткости трубобетона.

Методика основана на прямых физических испытаниях: изгибная жесткость определялась путем испытания длинных образцов на двухопорную схему, а продольная жесткость - в результате осевого нагружения коротких образцов (рис. 15).



а)



б)

Рис. 15. Испытания для определения жесткостных характеристик: а) схема определения изгибной жесткости; б) испытание короткого образца на осевое сжатие.

Назначение экспериментально полученных жесткостей в стержневую модель (рис. 16) и последующая проверка прочности по предложенной методике подтвердили ее адекватность. Расчет выявил, что наиболее нагруженным элементом колонны является стальная труба (запас прочности $\sim 5\%$), в то время как арматура имеет значительный резерв ($\sim 50\%$) (табл. 3).

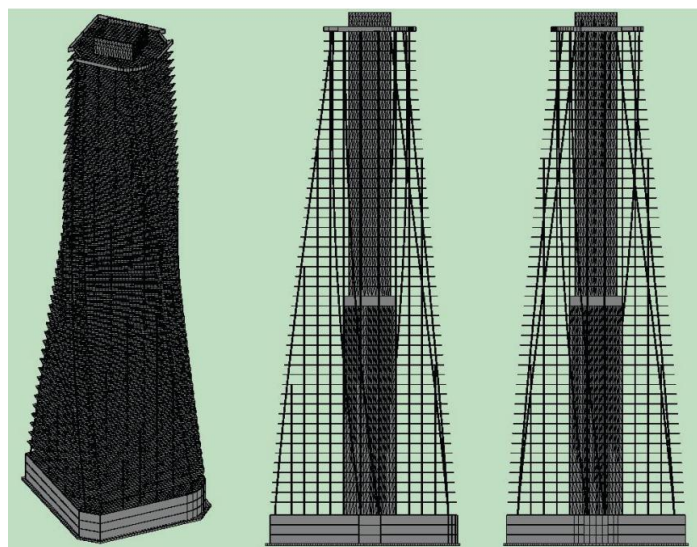


Рис. 16. Пространственная стержневая расчетная модель в ПВК SCAD.

Табл. 3. Проверка прочности элементов трубобетонной колонны

Комбинация	Элемент	Напряжение, МПа	Запас, %
M=245 кН·м N=16675 кН	Бетон	42,3	26
	Арматура	226,2	48
	Труба	253,0	5

Экспериментально подтвержден положительный эффект совместной работы материалов в трубобетоне: его разрушение носит пластичный характер с образованием зон выпучивания стальной оболочки, в отличие от хрупкого разрушения железобетона (рис. 17).



а)



б)

Рис. 17. Характер разрушения образцов: а) хрупкое разрушение железобетона; б) пластичное разрушение трубобетона.

Таким образом, в главе разработаны и апробированы инженерные методы, направленные на решение практических задач проектирования: алгоритм поиска рациональных параметров фланцевых соединений, обеспечивающий снижение материалоемкости на 10-15% без потери несущей способности, и экспериментальный метод назначения характеристик для надежного моделирования трубобетонных конструкций в стержневых ПВК.

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 74,4%. При гармоническом нагружении увеличение мощности воздействия (частоты возмущения) 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.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ 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:

1. **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 -No. 4. – P. 57-71 - DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-57-71. (**RSCI, Scopus (Q3)**). **Приравнивается к ВАК K1).**
2. **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 (K3)**).
3. 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 K1).**

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (приравнивается к ВАК категории K1):

4. 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».
5. 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:

6. **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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

11. 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.

12. 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:

13. 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:

14. **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.

15. **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.

16. **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.

17. **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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. **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.

22. **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.

23. **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.

24. **Шкода, И.В.** Сравнительный анализ деформативно-прочностных характеристик различных вариаций исполнений фланцевого узла из прямоугольных

гнуто сварных труб / И.В. Шкода // Сб. докл. X Всерос. фестиваль науки: сб. докл. - Нижний Новгород, 2020. – С. 90-93.

25. **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.

26. **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.

27. **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.