

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Таджикский технический университет имени академика М.С.Осими

УДК 624.042(575.3)

На правах рукописи



КАЛАНДАРЗОДА Ифтихор Имомёр

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПО РАСЧЁТУ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННЫХ ЗДАНИЙ МЕТОДОМ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук по специальности
2.1. Геология, геодезия, гидрология,
строительство и архитектура
(2.1.5. Строительная механика)

Душанбе – 2026

Диссертация выполнена в лаборатории сейсмостойкости зданий и сооружений Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ и на кафедре промышленного и гражданского строительства Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими

Научный консультант

Низомов Джахонгир Низомович, доктор технических наук, профессор, член - корр. НАНТ, заведующий лабораторией сейсмостойкости зданий и сооружений Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ

Официальные оппоненты:

Кузнецов Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «НИ Московский государственный строительный университет», заведующий кафедрой строительной и теоретической механики

Абдусаттаров Абдусамат, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики Ташкентского государственного транспортного университета Республики Узбекистан

Мирзоев Сайъало Хабибулович, доктор технических наук, профессор кафедры информатики Таджикского национального университета

Ведущая организация

Институт механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук РУз.

Защита состоится « 26 » мая 2026 г. в 14⁰⁰ часов на разовое заседание диссертационного совета 6D. КОА - 027 при Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими по адресу: 734042, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10^А
E-mail: dis.sia@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, www.ttu.tj

Автореферат разослан « » 2026г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор PhD



Шокиров Р.М.

Введение

Актуальность темы. Одной из отраслей органично сочетающей в себе самые современные достижения научно - технического прогресса и богатое культурное наследие народов, является строительство.

В условиях повышенной сейсмической активности обеспечение надёжности многоэтажных зданий и минимизация сейсмических рисков становятся ключевыми задачами. В Республике Таджикистан данное направление включено в перечень приоритетных научных исследований, утверждённый постановлением Правительства РТ №333 от 30 июня 2007 года.

В Республике Таджикистан активно ведётся строительство в зонах высокой сейсмической активности, при этом преимущественно применяются пассивные методы повышения сейсмостойкости. Однако такие подходы увеличивают жёсткость и массу зданий, что, в свою очередь, повышает нагрузку при землетрясениях. Одним из наиболее эффективных решений этой проблемы является сейсмоизоляция, позволяющая значительно снизить разрушительное воздействие подземных толчков. На данный момент теория расчёта сейсмоизоляции остаётся недостаточно разработанной. Многие из существующих технических решений считаются дискуссионными с точки зрения их безопасности и эффективности. Кроме того, отсутствуют единые рекомендации по выбору параметров сейсмоизоляции. В условиях масштабного строительства в сейсмоопасных районах страны обеспечение надёжной защиты зданий становится приоритетной задачей, от решения которой зависит безопасность жителей. Высотные здания значительно подвержены влиянию горизонтальных и вертикальных нагрузок, возникающих под воздействием сейсмической активности. В связи с этим актуальна задача, защиты зданий от резонансных колебаний.

Проблема обеспечения сейсмозащиты при интенсивных землетрясениях и снижения сейсмических нагрузок является актуальной задачей.

Идея сейсмоизоляция состоит в снижении воздействия землетрясений за счёт увеличения основного периода колебаний здания, позволяя избежать резонанса с доминирующими сейсмическими волнами. Расчёт зданий с учётом сеймики может быть выполнена на основе математической модели рассматриваемого объекта, которая включает в себя разработки алгоритма, составление компьютерной программы и решение задачи. Здания и сооружения, строящиеся в сейсмических районах, должны удовлетворять требованиям надёжности и экономичности. Сейсмоизоляция позволяет минимизировать разрушительное воздействие землетрясений, создавая условия, при которых здание менее восприимчиво к колебаниям почвы. Это достигается за счёт изменения динамических характеристик сооружения, что требует продуманного инженерного подхода и применения современных конструктивных технологий.

Достоверность результатов расчёта на сейсмические воздействия в значительной степени зависит от выбора расчётной модели и её соответствия фактическим условиям работы сооружения.

Степень научной разработанности темы. Исследования Акимова П.А. [2], Батэ К. [3], Габбасова Р.Ф. [7], Гольденблата И.И. [8], Додонова М.И. [10], Коренева Б.Г. [20], Мамина А.Н. [24], Мкртычева О.В. [25], Мондруса В.Л. [27], Низомова Д.Н. [29], Каландарбекова И. [14], Резникова Р.А. [35], Розина Л.А. [37], Ржаницын А.Р. [36], Смирнова А.Ф. [42], Филатова В.В. [48], Шапошникова Н.Н. [51] и других учёных внесли важный вклад в развитие численных методов при расчёте конструкций.

Исследования в области систем активной сейсмозащиты зданий и сооружений проводили такие учёные, как Я.М. Айзенберг [1], Т.Ж. Жунусов [13], А.В. Дукарт [11], Л.Ш. Килимник [17], Б.Г. Коренев [21], О.В. Мкртычев [26], Д.Н. Низомов [30], С.В. Поляков [34], Ю.Л. Рутман [38], О.А. Савинов [39], В.И. Смирнов [44], А.М. Уздин [47], Ю.Д. Черепинский [50], И. Каландарбеков [16], R.I. Skinner [56], W.N. Robinson [55], J.M. Kelly [54], А.К. Chopra [52], I. Hirokazu [53] и другие. Однако, несмотря на значительный объём проведённых исследований, данная проблема остаётся ещё не до конца решённой.

Сейсмоизоляции с резинометаллическими опорами рассмотрены в работах О.В. Мкртычева [26], Д.Н. Низомова [31], И. Каландарбекова [15], В.И. Смирнова [43], Т.О. Ормонбекова [32] и другие.

Усовершенствование методов расчёта конструкций взаимодействующих с упругим основанием посвящены труды учёных Болотина В.В. [4,5], Власова В.З. [6], Горбунов-Посадова М.И. [9], Дюкина Н.С. [12], Ляхова Г.М. [23], Киселева Ф.Б. [18], Коренева Б.Г. [20,21], Кузнецова С.В. [22], Пастернака П.Л. [33], Саргсяна А.Е. [40], Синицына А.П. [41], Тяпина А.Г. [45], Тимошенко С.П. [46], Хачиян Э.Е. [49] и др.

Связь исследования с программами (проектами) и научными темами. Рассматриваемое исследование тесно связано с тематикой научно-исследовательской работы кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими и государственной бюджетной темой «Исследование напряжённо-деформированного состояния зданий и сооружений, взаимодействующих с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях», проводимой лаборатории «Сейсмостойкость зданий и сооружений» Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана. В рамках этой темы проводятся научные работы в области сейсмостойкости и сейсмической защиты объектов. Проект рассчитан на 2021-2025 годы, регистрационный номер проекта - 0121ТJ1164 от 07.04.2021. Исследование также является частью государственной программы по снижению сейсмического риска на территории Республики Таджикистан (согласно постановлению Правительства РТ №385 от 18 мая 2017 года) и непосредственным образом связана со «Стратегия развития строительной отрасли Республики Таджикистан на период до 2030 года» утверждённый Правительством Республики Таджикистан от 27 апреля 2022 года за №203.

Общая характеристика исследования

Целью исследования - развитие эффективных методов расчёта сейсмоизолированных зданий на основе численного моделирования и экспериментальных исследований при различных внешних воздействиях.

Задачи исследования. Для достижения поставленной целью сформулированы следующие задачи:

- 1) Провести анализ современных методов расчёта несущих систем многоэтажных зданий модели и методов сейсмозащиты зданий, учёта податливости стыковых соединений в элементах зданий.
- 2) Провести спектрального анализа сейсмических колебаний и их влияния на динамику зданий.
- 3) Разработать математических моделей системы «платформа - модель здания» с различными типами сейсмоизоляции (скользящий пояс, резинометаллические опоры и фрикционно – маятниковые опоры).
- 4) Разработать алгоритм и компьютерную программу на языке ФОРТРАН для численного моделирования сейсмоизолированного здания с сухим трением.
- 5) Разработать алгоритм и компьютерную программу на языке ФОРТРАН для численного моделирования сейсмоизолированного здания с резинометаллическими опорами.
- 6) Разработать методики расчёта модели здания с учётом сейсмоизоляции на основе метода сосредоточенных деформаций.
- 7) Провести экспериментальных исследований на физических моделях для сравнения полученных параметров с результатами численного моделирования задачи сейсмоизолированных зданий.
- 8) Провести моделирования статической задачи балок, плит и фрагмента каркасного здания с учётом сейсмоизоляции и без неё с последующим определением коэффициентов подобия на основе теории подобия.

9) Провести моделирования динамической задачи балок, плит и фрагмента каркасного здания при наличии и отсутствии сейсмоизоляции с определением коэффициентов подобия на основе теории подобия.

10) Получить коэффициенты подобия, позволяющих переходить от модели объекта к его натуре.

Объектом исследования являются сейсмоизолированные здания с различными конструктивными схемами, подвергающиеся динамическим в том числе сейсмическим нагрузкам.

Предметом исследования является напряжённо-деформированное состояние сейсмоизолированных зданий от динамических воздействий.

Научная ценность работы определяется комплексным подходом к исследованиям, в результате которого разработаны алгоритмы и программы для решения прикладных задач строительной механики, имеющих важное значение для народного хозяйства.

Методология исследования. В диссертации использованы численные методы, основанные на фундаментальных положениях теории упругости и пластичности, принципах строительной механики, теории сейсмостойкости, а также классических гипотезах сопротивления материалов

Научная новизна исследования состоит в:

1. Комплексном подходе к моделированию сейсмоизолированных зданий с учётом нелинейных эффектов.

2. Сравнительном анализе различных типов сейсмоизоляции.

3. Разработке алгоритма численного решения задачи обратного преобразования Фурье.

4. Разработке алгоритма численного решения динамической модели сухого трения со многими степенями свободы.

5. Реализации математической модели Bouc - Wen для анализа нелинейной работы сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор.

6. Разработке методики расчёта модели сейсмоизолированного здания на основе метода сосредоточенных деформаций.

7. Экспериментальное подтверждение адекватности расчётных моделей.

8. Разработке алгоритмов моделирования статических задач балок, плит, и фрагмента каркасного здания с учётом сейсмоизоляции и без неё на основе теории подобия.

9. Разработке алгоритмов моделирования динамических задач балок, плит, и фрагмента каркасного здания с учётом сейсмоизоляции и без учёта сейсмоизоляции на основе теории подобия.

10. Получении коэффициентов подобия, позволяющих переходить от модели объекта к его натуре.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты численного решения задачи обратного преобразования Фурье.

2. Результаты численного моделирования здания с сейсмоизолирующим скользящим поясом со многими степенями свободы.

3. Результаты численного моделирования здания с сейсмоизоляцией в виде РМО при их линейной и нелинейной работе.

4. Результаты расчёта модели здания с учётом сейсмоизоляции на основе метода сосредоточенных деформаций.

5. Результаты экспериментальных исследований на модели сейсмоизолированного каркасного здания.

6. Результаты моделирования статических и динамических задач балок, плит, и фрагмента каркасного здания с учётом и без учёта сейсмоизоляции на основе теории подобия.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Получены научно-обоснованные результаты, диаграммы и зависимости применяемые при проектировании зданий; полученные результаты могут использоваться для дальнейших исследований в области сейсмостойкого строительства; результаты экспериментальных исследований по предлагаемой модели представляющее практический интерес при проектировании каркасных зданий с учётом сейсмоизоляции от сейсмических воздействий; предложенные методики расчёта и разработанные компьютерные программы дают возможность исследовать динамическое поведение зданий и сооружений с учётом сейсмоизоляции при различных воздействиях, включая сейсмические. Результаты работы имеют практическую значимость для научно-исследовательских и проектных организаций для оценки сейсмической безопасности различных объектов, испытывающих сейсмические воздействия с применением сейсмоизоляции; результаты исследований могут быть использованы для оптимизации конструктивных решений с применением современных сейсмозащитных технологий.

Достоверность представленных в диссертации результатов, подтверждается корректным применением теоретических положений и гипотез, анализом сходимости численных решений, сопоставлением с экспериментальными данными, а также многократной проверкой полученных результатов с использованием других методов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности ВАК при Президенте Республики Таджикистан: 2.1.5. Строительная механика.

Исследование охватывает следующие пункты паспорта специальности:

1. «Общие принципы расчёта сооружений и их элементов»;
2. «Методы расчёта на динамические и сейсмические нагрузки»;
3. «Экспериментальные исследования конструкций»;
4. «Численные методы расчёта сооружений и их элементов».

Личный вклад автора на соискание учёной степени состоит в постановке цели и задач исследования, выполнении численного моделирования для решения поставленных задач, участии в организации и проведении экспериментальных исследований, разработке и программной реализации численных методов, обработке полученных данных, формулировке ключевых выводов, подготовке материалов для публикации.

Апробация и реализации результатов исследования. Основные положения и результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены на ряде научно-практических конференций, в том числе: VIII международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования» (Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Душанбе, 3-4 ноября 2016 г.); республиканской научно-практической конференции «Инженерная геология и геоэкология: фундаментальные проблемы и прикладные задачи» (Таджикский национальный университет, Душанбе, 6 мая 2017 г.); международной конференции «Роль молодых учёных в развитии науки, инновации и технологий» (Академия наук Республики Таджикистан, Душанбе, 11-12 мая 2017 г.); Научной сессии «110 лет со дня Каратагского землетрясения (21 октября 1907 года) и современные проблемы геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии» (Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии, Душанбе, 25 октября 2017 г.); республиканской научно-практической конференции «Повышение сейсмической безопасности городов и населённых пунктов» (Комитет по архитектуре и строительству при Правительстве Республики Таджикистан, 17 ноября 2017 г.) Душанбе, 2017; международной конференции «Современные проблемы математики и её приложения» (Институт математики, НАНТ, 14-15 марта 2018 г.) Душанбе, 2018; республиканской научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии» (Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии, 15 марта 2018 г.) Душанбе, 2018; международной научно-практической конференции «Вода – важный фактор для устойчивого развития» (Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, 21 апреля 2018 г.) Душанбе, 2018; международной научно-практической конференции «Опыт, проблемы и перспективы повышения

качества строительных работ на основе лучших отечественных и зарубежных практик» (Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Душанбе, 11–12 мая 2018 г.), Душанбе, 2018; International conference for the «Decade Memory of the Wenchuan Earthquake» (Чэнду, Сычуань, Китай, 12–14 мая 2018 г.), Китай, 2018; International conference «30 years after the Spitak earthquake: experience and perspective» (Ереван, Армения, 3–7 декабря 2018 г.) Ереван, 2018; республиканской научно-практической конференции «Современные задачи градостроительства и архитектуры» (Комитет по архитектуре и строительству при Правительстве Республики Таджикистан, 27 ноября 2019 г.) Душанбе, 2019; международной научно-практической конференции. (Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Республики Таджикистан) Душанбе, 2019; международной научной конференции, (НАН Таджикистана, 14-15 сентября 2020) Душанбе, 2020; международной научно-практической конференции. «Теория и практика механики и моделирования», 23-24 декабря 2020 года) Махачкала, 2020, Российская Федерация; международной научно-практической конференции «Безопасность движения и инновационные тенденции в транспорте» посвящённая профессорам Турсунову А.А., Оеву А.М. и Сангинову О.К. (Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими. 25-26 октября 2020) Душанбе, 2020; международной научно-практической конференции «Электроэнергетика Таджикистана. Проблемы энергосбережения, энергоэффективности и использования возобновляемых источников энергии», (19 мая 2021 года, филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ») Душанбе, 2021; международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и градостроительства», 12 ноября 2021г. Комитет по Архитектуре и Строительству при Правительстве РТ, Душанбе, 2021; VII всероссийской научно-практической конференции, г. Пенза, Российская Федерация, 2021; XXV международной научно-практической конференции. г. Пенза, Российская Федерация, 2022; республиканской научно - практической конференции 115 лет со дня Каратагского землетрясения, 21 октября 1907 года, (21 октября 2022, Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана), Душанбе, 2022; международной научно - практической конференции «Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера, сегодня, завтра, посвящённая 60-летию образования архитектурной специальности. (Таджикский технический университет имени акад. М.С. Осими, 23 ноября 2022) Душанбе, 2022; международной научно-теоретической конференции «Развитие науки и образования в условиях глобализации на примере горных условий: проблемы, новые подходы и актуальные исследования», посвящённой 30 - летию сессии Верховного совета Республики Таджикистан и 30 - летию Хорогского государственного университета, (Хорогский государственный университет им. М. Назаршоева) Хорог, 2022; республиканской научно - практической конференции «Перспектива развития производства строительных материалов в Республике Таджикистан, 31 марта 2023, (Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими) Душанбе, 2023; VIII республиканской научно - практической конференции «Наука основа инновационного развития», 27-28 апреля 2023г., (Таджикский технический университета имени академика М.С. Осими) Душанбе, 2023; международной научно-технической конференции «Сейсмическая безопасность зданий и сооружений, энергоэффективность, инновационные технологии в современном строительстве», 22-23 октября 2024 г., Ташкент, 2024; международной научно-практической конференции «Новые направления развития науки в технических отраслях». ИТФ БНТУ-ТТУ имени акад. М.С.Осими, 10 -11 октября 2024 г., Душанбе, 2024; международной научно-практической конференции «Наука основа иновационного развития». ТТУ имени акад. М.С.Осими, 17 -18 апреля 2025 г., Душанбе, 2025; международной научно-практической конференции передовым технологиям в инженерии. ТГУТ, 8-10 октября 2025г., г. Ташкент, 2025; международной научно-практической конференции. Науки о земле: Современное состояние и их перспективы посвящённой «Двадцатилетию изучения и развития математических, точных и естественных наук в сфере науки и образования» - 2020-2040гг. и «2025 году – Международному году сохранения ледников», Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии, 22-23 октября 2025г. г. Душанбе, 2025; на заседании лаборатории «Сейсмостойкость зданий и сооружений» Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ,

Душанбе, 18 ноября 2025г.; на расширенном заседании кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, Душанбе, 18 декабря 2025 г.

Результаты диссертационного исследования внедрены в практику проектирования ОАО «НИПИИ САНИИОСП», ГУП НИПИ «Душанбешахрсоз». Теоретические и прикладные аспекты работы нашли применение в учебном процессе Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, где они использовались при преподавании лекционного курса «Численные методы» для магистров по специальности 700201 – «Промышленное и гражданское строительство» и 700201-05 – «Проектирование зданий и сооружений». Акты о внедрении результатов представлены в приложении к диссертации.

Публикации по теме диссертации: По теме диссертационной работы в 2025 г. издана монография «Численное моделирование динамических задач по расчёту зданий с учётом сейсмоизоляции» (в соавторстве с Низомовым Д.Н. и Каландарбековым И.К.). Основные результаты диссертации представлены в 84 статьях, в том числе в 7 статьях без соавторства и 32 статьях в соавторстве, опубликованных в Республики Таджикистан рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан, 2 статьях рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в Республики Беларусь, 4 статьи в международных журналах (Скопус) и 28 статей в сборниках и журналах, а также 1 патент и 8 авторское свидетельства.

Структура и объем диссертации: работа включает введение, шесть глав, общие выводы, список литературы, содержащий 340 наименования, из которых 51 на иностранном языке, приложения. Объем диссертации составляет 238 страниц основного текста, включая 95 рисунков и 13 таблиц.

Основное содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дан обзор литературы по динамическим расчётам конструкций зданий и сооружений, разработкой и исследованию сейсмоизоляции зданий и сооружений, излагаются цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, практическая ценность, достоверность полученных результатов и личный вклад автора.

В первой главе «АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА» приведён обзор работ по методы расчёта конструкций зданий с использованием дискретных моделей и методы сейсмозащиты зданий и сооружений. Изложен сопоставительный анализ численных методов решения динамических задач, а также рассмотрен учёт податливости стыковых соединений в элементах зданий. Глава состоит из 4 параграфов и заканчивается выводами.

Вторая глава «СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ» посвящена численному интегрированию, образованию Фурье, а также численному моделированию обратного преобразования Фурье и спектры реакций. Глава состоит из 8 параграфов и заканчивается выводами.

2.1. Преобразования Фурье. С помощью спектрального анализа определяются преобладающие периоды акселерограмм, зафиксированных во время землетрясений. Преобразования Фурье преобразовывают некоторую функцию переменного t в другую функцию переменного ω , и наоборот. Спектральная плотность $F(\omega)$ в общем случае имеет вид

$$F(\omega) = \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt. \quad (1)$$

Формула (1) с учётом $e^{-i\omega t} = \cos \omega t - i \sin \omega t$ имеет вид

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t dt - i \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t dt = a(\omega) - ib(\omega), \quad (2)$$

$$a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t dt, \quad b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t dt, \quad (3)$$

Модуль этой функции

$$|F(\omega)| = \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)}, \quad (4)$$

определяет амплитудный частотный спектр. Комплексную функцию $F(\omega)$ можно представить в виде

$$F(\omega) = |F(\omega)| (\cos \varphi + i \sin \varphi) = |F(\omega)| e^{i\varphi}, \quad (4,a)$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg}[b(\omega) / a(\omega)], \quad (5)$$

$$-\pi / 2 < \varphi(\omega) < \pi / 2.$$

Обратное преобразование Фурье описывается уравнением

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (6)$$

Уравнение (6) выражает функцию $f(t)$ через её преобразование Фурье. Уравнение (6) с учётом (4,a) представляется в виде

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)| e^{i(\omega t + \varphi)} d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)| \cos(\omega t + \varphi) d\omega + i \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)| \sin(\omega t + \varphi) d\omega. \end{aligned}$$

Поскольку заданная функция $|F(\omega)|$ является чётной, а синус - нечётной функцией частоты, интеграл от второго слагаемого равен нулю. В результате обратное преобразование Фурье можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |F(\omega)| \cos(\omega t + \varphi) d\omega = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\infty} A(\omega) \cos \omega t d\omega - \int_0^{\infty} B(\omega) \cos \sin \omega t d\omega \right], \quad (7) \\ A(\omega) &= |F(\omega)| \cos \varphi, \quad B(\omega) = |F(\omega)| \sin \varphi. \end{aligned}$$

Исследование спектральной характеристики прямоугольного импульса. Предполагается, что одиночный импульс имеет продолжительность τ , а интенсивность p .

С использованием формулы (1), получим

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt = p \int_{t=-\tau/2}^{\tau/2} e^{-i\omega t} dt = \\ &= -\frac{p}{i\omega} (e^{-i\omega\tau/2} - e^{i\omega\tau/2}) = p\tau \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2}, \quad (a) \end{aligned}$$

откуда следует, что спектральная характеристика (спектральная плотность) прямоугольного импульса является вещественной функцией и модуль этой функции

$$|F(\omega)| = p\tau \frac{|\sin(\omega\tau/2)|}{\omega\tau/2}. \quad (б)$$

Обратное преобразование Фурье (6) с учётом (б) приводит к интегральной функции синуса

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)| e^{-i\varphi(\omega)} e^{i\omega t} d\omega =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)| d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} p\tau \frac{|\sin(\omega\tau/2)|}{\omega\tau/2} d\omega = \\
&= \left| \begin{array}{l} \omega\tau/2 = x, \\ d\omega = (2/\tau)dx \end{array} \right| = \frac{p\tau}{\pi} \frac{2}{\tau} \int_0^{\infty} \frac{\sin x}{x} dx = \frac{2p}{\pi} \text{Si}(x). \quad (\text{в})
\end{aligned}$$

Таким образом, на примере тестовой задачи, где исходная функция представляется в виде одиночного прямоугольного импульса, показаны получения Фурье-образа функции $f(x)$ (а), (б) и прообраз функции $F(\omega)$ (в).

2.2. Численное интегрирование преобразования Фурье. Интегрирование преобразования Фурье можно выполнить с использованием численного метода. Для этого применим формулу Симпсона, которая обеспечивает повышенную точность не только для полиномов второй, но и третьей степени.

Численное интегрирование обратного преобразования по формуле (7) записывается в виде

$$\begin{aligned}
f(t) = \sum (\omega - 2\Delta\omega) + \Delta\omega^* [&|F(\omega_{i-2})| \cos(\omega_{i-2}t + \varphi_{i-2}) + \\
&+ 4|F(\omega_{i-1})| \cos(\omega_{i-1}t + \varphi_{i-1}) + |F(\omega_i)| \cos(\omega_it + \varphi_i)], \quad (8)
\end{aligned}$$

где $\omega_i = \omega$, $\omega_{i-1} = \omega - \Delta\omega$, $\omega_{i-2} = \omega - 2\Delta\omega$, $\Delta\omega^* = \Delta\omega / 3\pi$,
 $\varphi_i = \varphi(\omega)$, $\varphi_{i-1} = \varphi(\omega - \Delta\omega)$, $\varphi_{i-2} = \varphi(\omega - 2\Delta\omega)$.

Численное интегрирование обратного преобразования Фурье представляется в виде

$$\begin{aligned}
f(t) = \sum (\omega - 2\Delta\omega) + \\
+ \Delta\omega^* [&a(\omega_{i-2}) \cos(\omega_{i-2}t) + b(\omega_{i-2}) \sin(\omega_{i-2}t) + \\
&+ 4(a(\omega_{i-1}) \cos(\omega_{i-1}t) + b(\omega_{i-1}) \sin(\omega_{i-1}t)) + \\
&+ a(\omega_i) \cos(\omega_it) + b(\omega_i) \sin(\omega_it)]. \quad (9)
\end{aligned}$$

Реализации алгоритма численного решения преобразования Фурье. На основе разработанной компьютерной программы **SPECTR-15** получены результаты дискретного преобразования, которые сопоставлены с аналитическим решением (а)-(в). На рис.1 представлены графики изменения коэффициентов Фурье, полученные численным интегрированием (кривые 1 и 2), а также графики амплитудного спектра, полученные по формуле (4) и (4, а) (кривые 3 и 4 соответственно). Видно, что результаты численного моделирования практически совпадают с данными аналитического решения.

Обратное преобразование, выполненное с использованием косинус преобразования, приводит к следующему результату

0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25
0,974	0,992	1,021	1,021	0,991	0,973	0,992	1,024	1,024	0,989	0,989

где в первой строке указаны время, а на второй строке приведены соответствующие значения импульса. Максимальная погрешность по сравнению с аналитическим решением равна 3,4%.

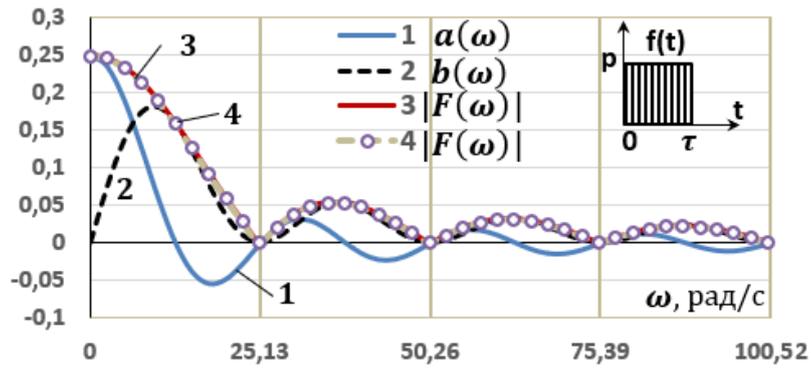


Рисунок 1. Коэффициенты Фурье и амплитудный спектр прямоугольного импульса

$$a(\omega) = p \int_{t=0}^{\tau} \cos \omega t dt, \quad b(\omega) = p \int_{t=0}^{\tau} \sin \omega t dt,$$

Разработана компьютерная программа на языке Фортран **SPECTRUM-12** и получены результаты численного интегрирования по определению амплитудного спектра для каждой акселерограммы.

2.3. Амплитудные спектры различных землетрясений. Алгоритм численного решения задачи построения амплитудных спектров рассмотрено на примере восьми акселерограмм землетрясений. Эти графики показывают ускорение в безразмерной виде \ddot{u}_0 / g . Также рассматривается одна синтезированная акселерограмма с кодом СА-482.

2.4. Энергетические спектры. Полная энергия землетрясения определяется из теоремы Парсеваля, согласно которой энергия при интегрировании квадрата временной функции во временном интервале равняется энергии при интегрировании квадрата модуля спектра амплитуд по всему интервалу частот $E_f = E_F$,

Результаты показывают, что только в случае с акселерограммой El Centro мы имеем точное совпадение энергии, а в остальных имеет место погрешность от 1,03% до 9,7%. Эти погрешности связаны с выбранном отрезке времени T , на котором строится амплитудный спектр.

2.5. Численное моделирование обратного преобразования Фурье. Рассмотрим обратное преобразование, где коэффициенты Фурье численно интегрируются в частотной области. Для этого задается $\Delta\omega$ и принимается $\omega_k = k\Delta\omega$,

$$\begin{aligned} a(\omega_k) &= \Delta\tau^* \left[f_{j-2} \cos \omega_k t_{j-2} + 4f_{j-1} \cos \omega_k t_{j-1} + f_j \cos \omega_k t_j \right], \\ b(\omega_k) &= \Delta\tau^* \left[f_{j-2} \sin \omega_k t_{j-2} + 4f_{j-1} \sin \omega_k t_{j-1} + f_j \sin \omega_k t_j \right], \\ k &= 0, 1, 2, \dots, N, \quad j = 2, 3, \dots, M, \quad M = 2L, \\ f(t_j) &= \Delta\omega^* \left[a_{k-2} \cos \omega_{k-2} t_j + 4a_{k-1} \cos \omega_{k-1} t_j + a_k \cos \omega_k t_j \right] + \\ &+ \Delta\omega^* \left[b_{k-2} \sin \omega_{k-2} t_j + 4b_{k-1} \sin \omega_{k-1} t_j + b_k \sin \omega_k t_j \right], \end{aligned} \quad (10)$$

На рис.2 приведены результаты численного моделирования обратного преобразования Фурье на примере синтезированной акселерограмме СА-482 (кривая 1), полученные при различных значениях $\Delta\omega$ (кривые 2,3,4). Сравнение показывает, что по амплитудным значениям есть совпадение, а по частотным характеристикам отличие значительное.

По вышеизложенному алгоритму выполнено обратное преобразование Фурье акселерограммы El Centro. На рис.3 представлены результаты, полученные при различных разбиениях частотной оси, которые сравниваются с заданной акселерограммой. Результаты обратного

преобразования, полученные на основе косинуса преобразования, практически совпадает с данными (10).

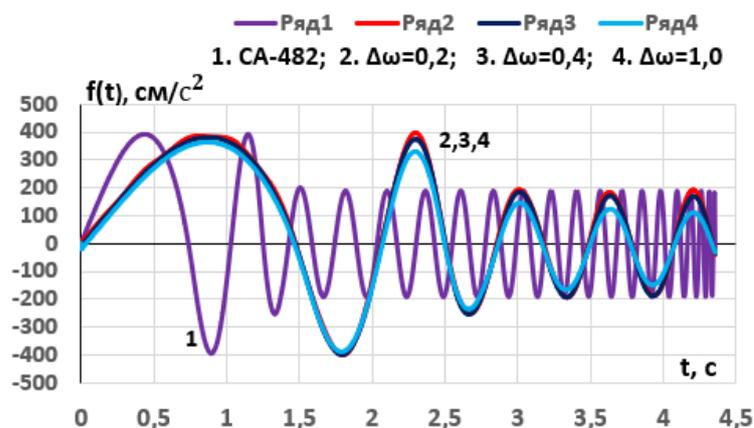


Рисунок 2. Сравнение результатов обратного преобразования

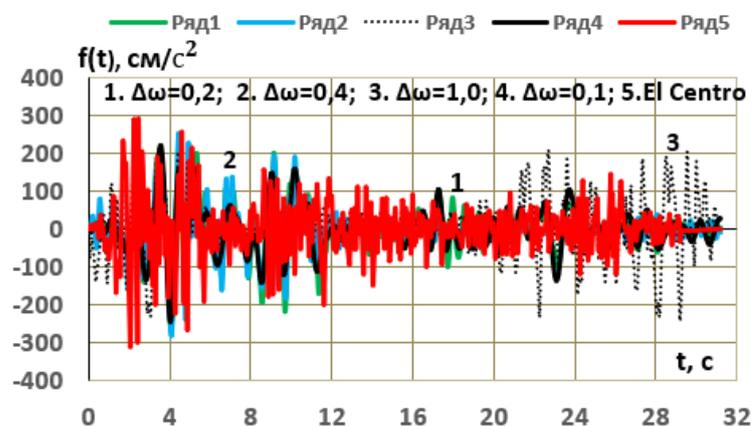


Рисунок 3. Результаты обратного преобразования акселерограммы El Centro

2.6. Спектр реакции. Расчёт спектров реакций основан на решении дифференциального уравнения сейсмических колебаний для системы с одной степенью свободы (рис. 4), имеющего следующий вид

$$\begin{aligned} m\ddot{u} + c\dot{u} + ku &= -m\ddot{u}_0(t), \\ \ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u &= -\ddot{u}_0(t), \end{aligned} \quad (11)$$

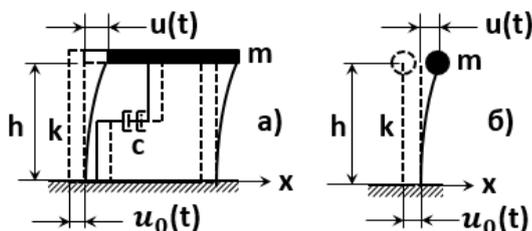


Рисунок 4. Система с одной степенью свободы

Решение уравнения (11) может быть получено с использованием интеграла Дюамеля, что представлено в работах Назарова А.Г. [28] и Клафа Р. [19], в следующем виде

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_1} \int_{\tau=0}^t \ddot{u}_0(\tau) \exp[-\xi\omega(t-\tau)] \sin \omega_1(t-\tau) d\tau, \quad (12)$$

где $\omega_1 = \omega\sqrt{1-\xi^2}$ – частота колебаний с учётом затухания.

Анализ уравнения (11) показывает, что при пренебрежении величиной $\omega^2 u$, которая на порядок меньше $2\xi\omega \dot{u}$, абсолютное ускорение массы относительно неподвижной системы координат ($\ddot{u}_1 = \ddot{u}_0 + \ddot{u}$) с учётом соотношения (12) может быть представлено в следующем виде

$$W(t, \xi, T) = \ddot{u}_1(t) = -\omega^2 u(t) - 2\xi\omega \dot{u} = \\ = -\omega^2(1 + 2\xi^2)[A(t)\sin\omega t - B(t)\cos\omega t] +$$

Спектры реакций количественно характеризуют динамическое поведение линейных систем с одной степенью свободы, обладающих определенным периодом колебаний T и коэффициентом демпфирования ξ , наглядно отображая их отклик на сейсмическое воздействие.

2.7. Построение спектров кинематических реакций. С использованием разработанной компьютерной программы на языке Фортран «R-SPECTRUM» были проведены численные эксперименты, в ходе которых получены спектры кинематических реакций для заданных акселерограмм землетрясений. Результаты, полученные при $\xi = 0,02$ и сравниваются с данными Чорга. Сравнение показывает практически полное совпадение результатов.

Было проведено отдельное исследование акселерограммы *Japan-2011*. Данная акселерограмма, оцифрованная с шагом $\Delta t = 0,08$ с, имеет продолжительность $t_A = 158,72$ с. Пиковые значения ускорений, равные $1,29g$ и $0,77g$, соответствуют моментам времени $95,68$ с и $96,48$ с. На рис.5 представлены спектры ускорений, скоростей и перемещений.

Максимальное значение спектра ускорений Японского землетрясения 11.03.2011 г. в два раза больше, чем спектр ускорения Иранского землетрясения 16.09.1978 г.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что разработанные алгоритмы и программы для численного построения спектров сейсмических колебаний позволяют проводить спектральный анализ сейсмических воздействий.

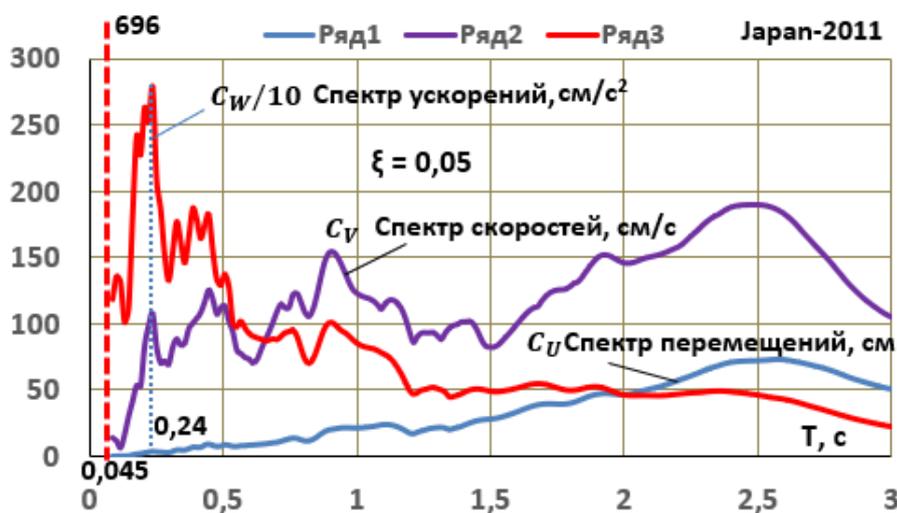


Рисунок 2.13. Спектры перемещений, скоростей и ускорений акселерограммы Японского землетрясения

2.8. Поэтажные спектры реакций. Для расчёта устойчивости ответственных промышленных объектов к сейсмическим воздействиям необходимо использовать так называемые поэтажные акселерограммы и поэтажные спектры реакций. Поэтажные спектры реакций рассчитываются в два этапа. На первом этапе с помощью численного решения системы дифференциальных уравнений

$$M\ddot{U} + D\dot{U} + KU = -M\ddot{u}_0(t), \quad (13)$$

На втором этапе реализуется алгоритм, в котором входит процедура вычисления спектров перемещений, скоростей и ускорений, где используются поэтажные акселерограммы, полученные численным моделированием (13).

Для формирования матрицы жёсткости, которая входит в уравнение (13), используется МСД. С целью численного решения используется МПА, при этом скорость и ускорение на дискретной ось времени представлены в виде

$$\dot{u}_j = \frac{2}{\tau_j}(u_j - u_{j-1}) - \dot{u}_{j-1}, \quad (14)$$

$$\ddot{u}_j = \frac{4}{\tau_j^2}(u_j - u_{j-1}) - \frac{4}{\tau_j}\dot{u}_{j-1} - \ddot{u}_{j-1}, \quad (15)$$

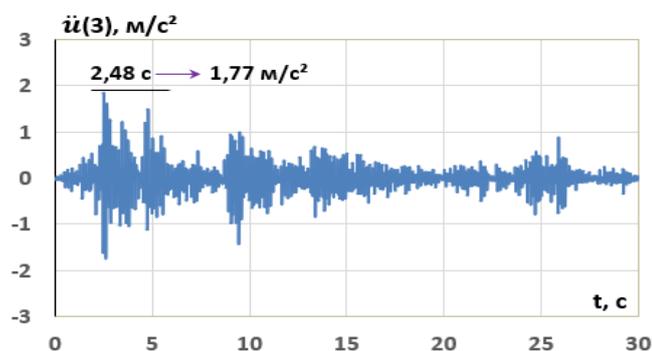
Внося (14) и (15) в (13), получим систему алгебраических уравнений

$$\mathbf{K}^* \mathbf{U}_i = \mathbf{F}_i, \quad (16)$$

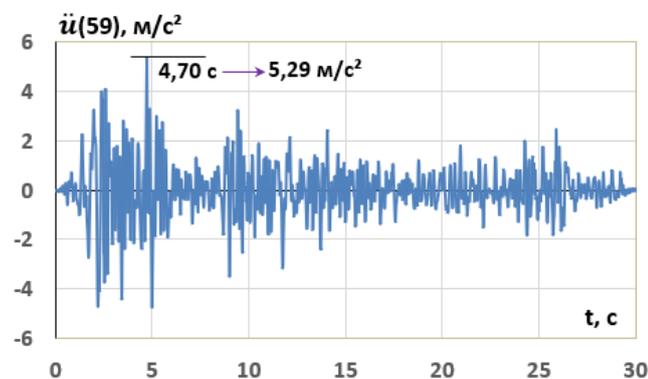
$$\mathbf{K}^* = \mathbf{K} + \frac{4}{\tau^2} \mathbf{M} + \frac{2}{\tau} \mathbf{D}, \quad (17)$$

$$\mathbf{F}_i = -\mathbf{M}^* \ddot{u}_0(t_i) + \mathbf{M} \left(\frac{4}{\tau^2} \mathbf{U}_{i-1} + \frac{4}{\tau} \dot{\mathbf{U}}_{i-1} + \ddot{\mathbf{U}}_{i-1} \right) + \mathbf{D} \left(\frac{2}{\tau} \mathbf{V}_{i-1} + \mathbf{D} \dot{\mathbf{U}}_{i-1} \right), \quad (18)$$

На рис. 6 представлены графики линейных ускорений на различных уровнях здания, полученных от заданной акселерограммы **El Centro**. Эти результаты получены с учётом податливости упругого основания.



а)



б)

а) - на уровне фундаментной плиты; б) – на уровне перекрытия на отметке 39 м.

Рисунок 6. Поэтажные акселерограммы

Сравнение показывает, что ускорение фундаментной плиты (рис.6, а) имеет максимальное значение $1,77 \text{ м/с}^2$, что более чем в полтора раза меньше, чем пиковое ускорение в акселерограмме **El Centro**. Были получены поэтажные спектры для расчётов на основе аналоговых (El Centro, Hollister, Иран, Гиссар) и синтезированной (СА-482) акселерограмм. Максимальные значения поэтажных спектров составляют: для Иранского землетрясения — $5,8g$, для СА-482 - $3,28g$, для El Centro - $1,72g$, для Hollister - $0,785g$, для Гиссарского землетрясения - $0,43g$. На рис. 7 показаны поэтажные спектры, полученные при различных условиях моделирования основания - с учётом и без учёта его податливости.

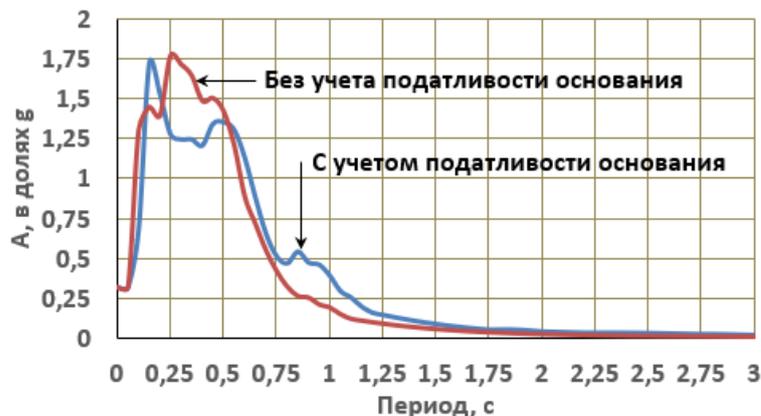


Рисунок 7. Спектры линейного ускорения на отметке 39 м.

Таким образом, можно заключить, что разработанные алгоритмы и компьютерные программы численного построения спектров Фурье и реакций позволяют проводить исследования по спектральному анализу сейсмических воздействий различной интенсивности.

В третьей главе «**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ПЛАТФОРМА - МОДЕЛЬ ЗДАНИЯ» С СЕЙСМОИЗОЛИРУЮЩИМ ПОЯСОМ**» исследуется динамической модели здания, а также свободные и вынужденные колебания платформа модель здания со скользящим поясом. Глава состоит из 11 параграфов и завершается выводами по главе.

3.1. Расчётная динамическая модель здания со скользящим поясом. Динамическая расчётная модель сооружения со скользящим поясом может быть представлена в виде системы с сосредоточенными массами, где конкретная конфигурация зависит от расположения плоскости скольжения.

3.2. Исследование модели зданий с жёсткой конструктивной схеме со скользящим поясам. Здесь рассматривается задача, в которой исследуется 5-этажное крупнопанельное здание на основе предложенной модели. Предполагается, что скольжение массы m_1 происходит в пределах зазора $\Delta = 3 \text{ см}$, при этом коэффициент жёсткости ограничителя $R = 6 \cdot 10^3 \text{ кН/м}$. Эффективность устройства сейсмоизолирующего скользящего пояса оценивается с помощью коэффициентов динамичности β_j , коэффициентами сейсмозащиты p_j и коэффициентами снижения упругой реакции γ_j для каждой массы.

Алгоритм и компьютерная программа, которые были разработаны, позволяют проводить численные эксперименты для анализа динамических характеристик зданий различных конструктивных схем с сейсмоизолирующим поясом при различных внешних воздействиях.

3.3. Многомассовая расчётная модель здания с элементами сухого трения. Рассматривается многомассовая расчётная модель здания с элементами сухого трения, где плоскость скольжения расположена между массами m_1 и m_2 . Масса m_2 расположена непосредственно над скользящим поясом. Предполагается, что модель здания в общем виде испытывает кинематическое возмущение в опорной части $z_0(t)$ и действие горизонтальной вибрационной

нагрузки $p(t)$, приложенной к массе m_1 . Между массами m_1 и m_2 существует связь в виде сил сухого трения при смещении массы m_2 относительно массы m_1 в пределах зазора Δ_1 (рис.8, а). Исходя из условий динамического равновесия масс m_1 и m_2 при скольжении (рис.8, б) в соответствии с принципом Даламбера, получим

$$-F_{I1} - F_{C1} - F_{S1} + F_{I2} + F_{S12} + p(t) = 0, \quad (19)$$

$$-F_{I2} - F_{C2} - F_{S2} - F_{21} - F_{S21} = 0. \quad (20)$$

Здесь $F_{I1} = m_1(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_0)$, $F_{C1} = c_1\dot{z}_1$, $F_{S1} = r_{11}z_1$, (21)

$$F_{I2} = m_2(\ddot{z}_2 + \ddot{z}_0), \quad F_{C2} = c_2\dot{z}_2, \quad F_{S2} = r_{22}z_2 + r_{23}z_3, \quad (22)$$

$$F_{I2} = F_{21} = F_F \text{sign}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1), \quad F_F = \mu N, \quad N = Mg, \quad M = m_2 + m_3 + \dots + m_n, \quad (23)$$

$$F_{S12} = F_{S21} = k_{12}(|z_2 - z_1| - \Delta_1) \text{sign}(z_2 - z_1) = F_R \text{sign}(z_2 - z_1), \quad (24)$$

$$F_R = k_{12}(|z_2 - z_1| - \Delta_1),$$

$$v_{21} = \dot{z}_2 - \dot{z}_1 \quad \text{sign}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) = \text{sign}(v_{21}) = \begin{cases} 1, & v_{21} > 0 \\ 0, & v_{21} = 0 \\ -1, & v_{21} < 0 \end{cases} \quad (25)$$

μ – коэффициент трения скольжения;

N – сила реакции опоры;

c_j – коэффициенты затухания;

F_F – сила трения скольжения;

M – суммарная масса здания.

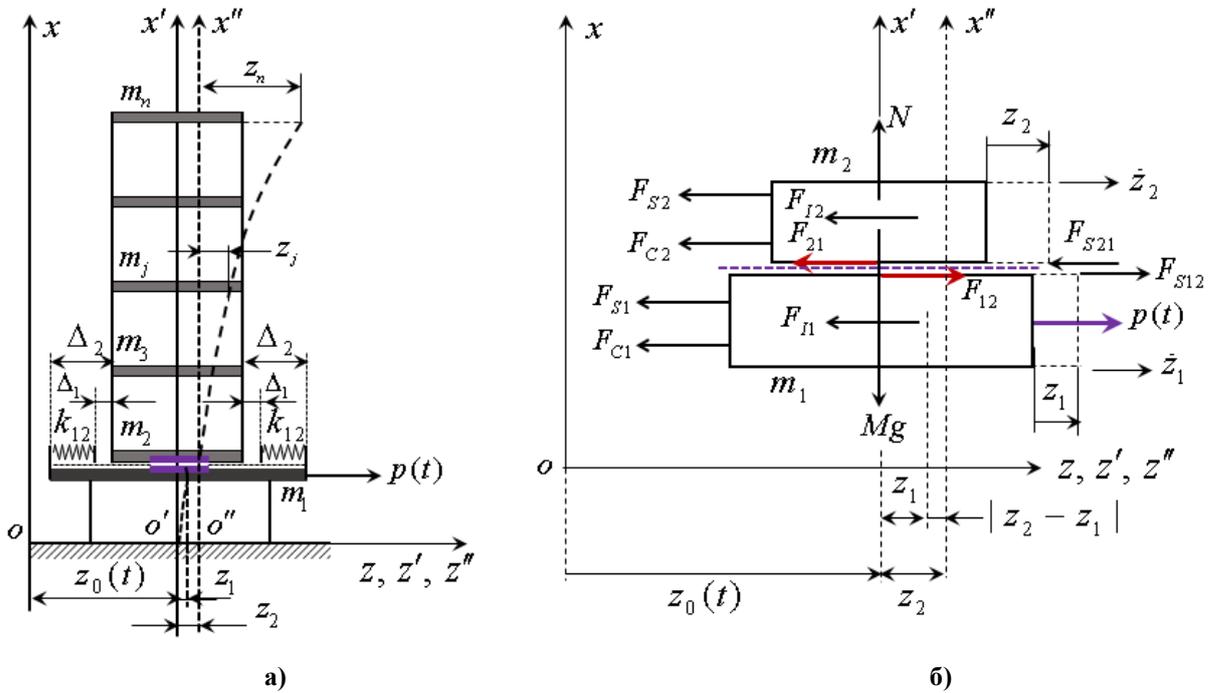


Рисунок 8. Модель здания с сейсмоизолирующим поясом (а) и сила трения скольжения между массами m_1 и m_2 (б)

Для остальных степеней свободы уравнения динамического равновесия записываются в виде

$$F_{I3} + F_{C3} + F_{S3} = 0, \quad (26)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$F_{In} + F_{Cn} + F_{Sn} = 0, \quad (27)$$

Внося (21) - (25) в (19), (20) и (26), (27), получаем систему дифференциальных уравнений

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \dot{z}_1 + r_{11} z_1 - F_F \operatorname{sign}(v_{21}) - F_R \operatorname{sign}(z_{21}) = -m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t), \quad (28)$$

$$m_2 \ddot{z}_2 + c_2 \dot{z}_2 + r_{22} z_2 + r_{23} z_3 + F_F \operatorname{sign}(v_{21}) + F_R \operatorname{sign}(z_{21}) = -m_2 \ddot{z}_0(t), \quad (29)$$

$$m_i \ddot{z}_i + c_i \dot{z}_i + \sum_{j=2}^n r_{ij} z_j = -m_i (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2), \quad i = 3, 4, \dots, n. \quad (30)$$

$$v_{21} = \dot{z}_2 - \dot{z}_1, \quad z_{21} = z_2 - z_1, \quad F_R = k_{02} (|z_{21}| - \Delta_1),$$

где r_{ij} – реакция, возникающая в i – й связи основной системы метода перемещений, при единичном перемещении связи j ;
 c_j – коэффициенты затухания.

Применяя метод последовательной аппроксимации по времени

$$\ddot{z}_i = \frac{\alpha_1}{\tau^2} (z_i - z_{i-1}) - \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{z}_{i-1} - \alpha_3 \ddot{z}_{i-1}, \quad (31)$$

$$\dot{z}_i = \frac{\beta_1}{\tau} (z_i - z_{i-1}) - \beta_2 \dot{z}_{i-1} - \tau \beta_3 \ddot{z}_{i-1}, \quad (32)$$

из (28) - (30) получим систему алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} r_{11}^* z_1 &= m_1 \cdot u_1 + c_1 \cdot v_1 + F_F \operatorname{sign}(v_{21}) + F_R \operatorname{sign}(z_{21}) - m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t), \\ r_{22}^* z_2 + r_{23} z_3 &= m_2 \cdot u_2 + c_2 \cdot v_2 - F_F \operatorname{sign}(v_{21}) - F_R \operatorname{sign}(z_{21}) - m_2 \ddot{z}_0(t), \\ r_{32} z_2 + r_{33}^* z_3 + r_{34} z_4 &= m_3 \cdot u_3 + c_3 \cdot v_3 - m_3 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2), \\ r_{43} z_3 + r_{44}^* z_4 + r_{45} z_5 &= m_4 \cdot u_4 + c_4 \cdot v_4 - m_4 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2), \\ &\dots\dots\dots \\ r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn}^* z_n &= m_n \cdot u_n + c_n \cdot v_n - m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2). \end{aligned} \quad (33)$$

$$r_{jj}^* = \left(m_j \frac{\alpha_1}{\tau^2} + c_j \frac{\beta_1}{\tau} + r_{jj} \right), \quad (34)$$

$$u_j = \frac{\alpha_1}{\tau^2} z_j + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{z}_j + \alpha_3 \ddot{z}_j, \quad (35)$$

$$v_j = \frac{\beta_1}{\tau} z_j + \beta_2 \dot{z}_j + \beta_3 \tau \ddot{z}_j, \quad (36)$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

3.4. Динамическое уравнение равновесия модель - здания со скользящим поясом на уровне фундаментной плиты. В случае, когда скользящая плоскость расположена на уровне фундаментной плиты (рис.9), или то же самое, если предположить, что жёсткости стоек виброплатформы (рис.8) стремятся к бесконечности, уравнение динамического равновесия массы m_1 (рис.9, б) представляется в виде

$$-F_{I1} - F_{C1} - F_{S1} - F_{I0} - F_{S01} + p(t) = 0, \quad (37)$$

где $F_{I1} = m_1 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1)$, $F_{C1} = c_1 \dot{z}_1$, $F_{S1} = r_{11} z_1 + r_{12} z_2$, $F_{I0} = F_F \operatorname{sign}(v_1)$,

$$F_{S01} = k_{01}(|z_1| - \Delta_1) \text{sign}(z_1) = F_R \text{sign}(z_1), \quad F_F = \mu M g, \quad (38)$$

$$F_R = k_{01}(|z_1| - \Delta_1),$$

v_1 — скорость движения массы m_1 .

Уравнение (37) с учётом (38) приобретает вид

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \dot{z}_1 + r_{11} z_1 + r_{12} z_2 + F_F \text{sign}(v_1) + F_R \text{sign}(z_1) = -m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t). \quad (39)$$

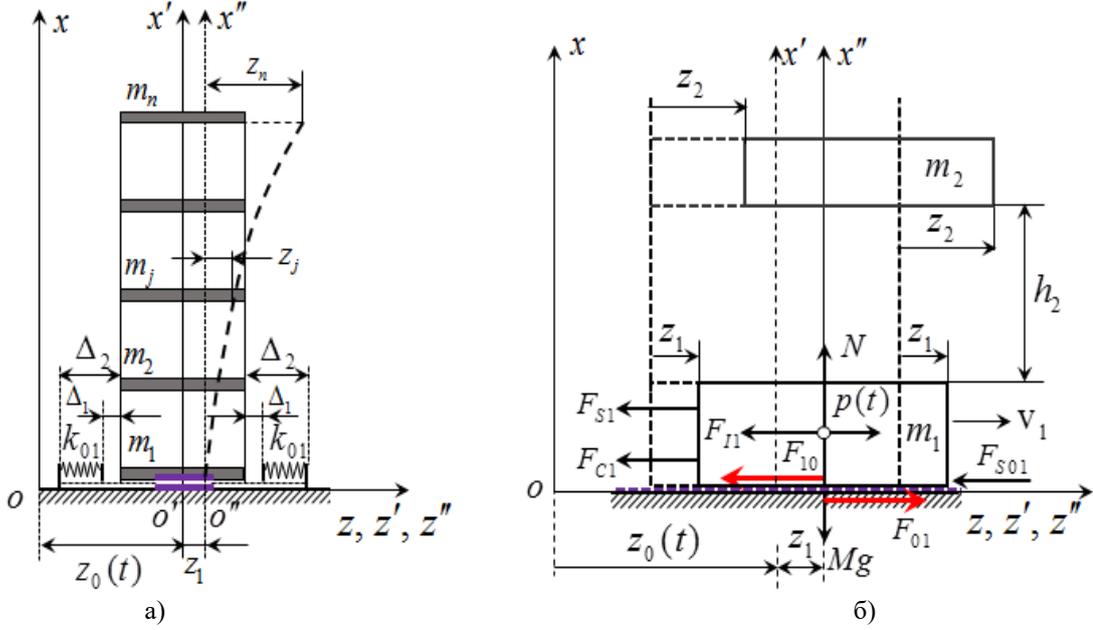


Рисунок 9. Модель здания со скользящим поясом на уровне фундаментной плиты

Уравнения движений остальных масс модели, представленной на рис.9, а, записываются в общем виде

$$m_j \ddot{z}_j + c_j \dot{z}_j + r_{j,j-1} z_{j-1} + r_{jj} z_j + r_{j,j+1} z_{j+1} = -m_j (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1), \quad (40)$$

$$j = 2, 3, \dots, n-1,$$

$$m_n \ddot{z}_n + c_n \dot{z}_n + r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn} z_n = -m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1). \quad (41)$$

Подставив (31) и (32) в (39) - (41) получим систему уравнений, которое имеет вид

$$r_{11}^* z_1 + r_{12} z_2 = m_1 \cdot u_1 + c_1 \cdot v_1 - p v_1 - p z_1 - m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t),$$

$$p v_1 = F_F \text{sign}(v_1), \quad p z_1 = F_R \text{sign}(z_1),$$

$$r_{21} z_1 + r_{22}^* z_2 + r_{23} z_3 = m_2 \cdot u_2 + c_2 \cdot v_2 - m_2 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1),$$

$$r_{32} z_2 + r_{33}^* z_3 + r_{34} z_4 = m_3 \cdot u_3 + c_3 \cdot v_3 - m_3 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1), \quad (42)$$

$$r_{43} z_3 + r_{44}^* z_4 + r_{45} z_5 = m_4 \cdot u_4 + c_4 \cdot v_4 - m_4 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1),$$

$$\dots$$

$$r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn}^* z_n = m_n \cdot u_n + c_n \cdot v_n - m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1).$$

Уравнений (34) и (42) можно представить в матричной форме

$$\mathbf{R} \mathbf{Z}_k = \mathbf{B}_k, \quad (43)$$

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{R} + \mathbf{R}_1, \quad \mathbf{R}_1 = \text{diag}(\kappa_1 \quad \kappa_2 \quad \dots \quad \kappa_n), \quad \kappa_j = \alpha_1 m_j / \tau^2 + \beta_1 c_j / \tau, \quad (44)$$

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{M}\mathbf{U}_{k-1}^* + \mathbf{C}\mathbf{V}_{k-1}^* + \mathbf{F}_{k-1} - \mathbf{M}\ddot{\mathbf{Z}}_{0,k} + \mathbf{P}_k, \quad (45)$$

$$\mathbf{U}_{k-1}^* = \frac{\alpha_1}{\tau^2} \mathbf{Z}_{k-1} + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \alpha_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}, \quad (46)$$

$$\mathbf{V}_{k-1}^* = \frac{\beta_1}{\tau} \mathbf{Z}_{k-1} + \beta_2 \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \tau\beta_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}, \quad (47)$$

$$\ddot{\mathbf{Z}}_{0,k} = \mathbf{I}\ddot{z}_0(t_k), \quad \mathbf{P}_n = \{p_1 \quad p_2 \quad \dots \quad p_n\}^T, \quad (48)$$

$$\mathbf{F}_{k-1} = \mathbf{F}_{1,k-1} + \mathbf{F}_{2,k-1},$$

$$k=1,2,3,\dots,K.$$

Векторы силы упругой реакции ограничителей для моделей, представленных на рис. 8 и 9, записываются в виде

$$\mathbf{F}_{2,k-1} = F_{21} \cdot \{ \text{sign}(z_{21}) \quad -\text{sign}(z_{21}) \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T, \quad (49)$$

$$\mathbf{F}_{2,k-1} = F_{10} \cdot \{ -\text{sign}(z_1) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T, \quad (50)$$

$$F_{21} = k_{12}(|z_2 - z_1| - \Delta_1), \quad F_{10} = k_{01}(|z_1| - \Delta_1).$$

где $z_{21} = z_2 - z_1$ – разность относительных перемещений масс m_2 и m_1 для модели здания, установленной на виброплатформе (рис.8), при условии $|z_{21}| \leq \Delta_1$,
 $F_{21} = 0$.

Сила упругой реакции F_{10} в (50) модели, представленной на рис.9, также будет равняться нулю, если $|z_1| \leq \Delta_1$. Следовательно, в случае, когда модули z_{21} и z_1 становятся больше заданной величине Δ_1 , в правой части системы уравнений появляется дополнительная сила.

Векторы относительных ускорений и скоростей, полученных путём последовательных аппроксимаций, представляются в виде

$$\mathbf{U}_k = \frac{\alpha_1}{\tau^2} (\mathbf{Z}_k - \mathbf{Z}_{k-1}) + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \alpha_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}, \quad (51)$$

$$\mathbf{V}_k = \frac{\beta_1}{\tau} (\mathbf{Z}_k - \mathbf{Z}_{k-1}) + \beta_2 \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \tau\beta_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}, \quad (52)$$

$$k=1,2,3,\dots,K.$$

Вектор полных ускорений определяется как сумма векторов

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{U}_k + \mathbf{I}\ddot{z}_{0,k}, \quad (53)$$

где \mathbf{I} – единичный вектор-столбец;

$\ddot{z}_{0,k}$ – ускорение основания, соответствующее моменту времени t_k .

Вектор-столбцы инерционных и упругих сил, а также изгибающий момент и поперечная сила в опорной части модели, соответствующие моменту времени t_k , могут быть представлены так

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{M}\mathbf{U}_k, \quad \mathbf{Q}_k = \mathbf{R}\mathbf{Z}_k, \quad M_{0,k} = \mathbf{X}\mathbf{S}_k, \quad Q_{0,k} = \mathbf{e}\mathbf{S}_k, \quad (54)$$

$$\mathbf{X} = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n), \quad \mathbf{e} = (1 \quad 1 \quad \dots \quad 1),$$

где \mathbf{X} – вектор-строка координат точек приложения сосредоточенных масс;

e – единичный вектор-строка.

Алгоритм (43) - (54) реализован на различных примерах по расчёту модели зданий со скользящим поясом.

3.5. Исследование свободных колебаний системы «виброплатформа-модель здания» без учёта скольжения. Рассматривается система с четырьмя степенями свободы при отсутствии скольжения, где $m_1 = m_1^*$ состоит из суммы двух масс – массы стола виброплатформы и массы конструкции опорной части модели. Эти массы находятся в состоянии «залипания». На рис.10 приведены графики свободных колебаний системы от действия мгновенного импульса.

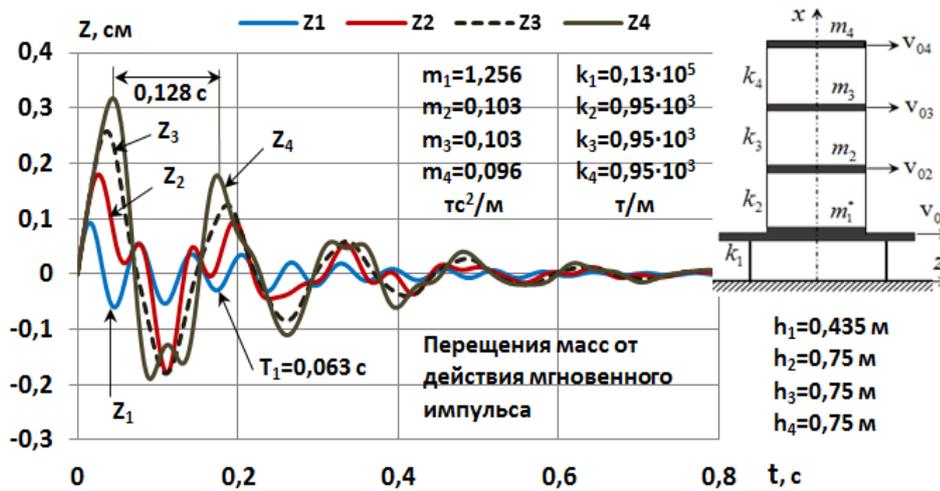


Рисунок 10. Свободные колебания системы

3.6. Исследование свободных колебаний системы «виброплатформа-модель здания» с учётом скольжения. Исследование свободных колебаний системы «виброплатформа-модель здания» с учётом скольжения проводилось на основе исходных данных, представленных в параграфе 3.5. Предполагается, что плоскость скольжения находится между массами m_1 и m_2 . В данной модели также учитывается воздействие мгновенного импульса, из-за которого все массы получают одинаковую начальную скорость, равную $v_0 = 0,1$ м/с, независимо от величин сосредоточенных масс. На рис.11 приведены графики свободных колебаний системы, полученные в результате начальной скорости при различных значениях массы платформы.

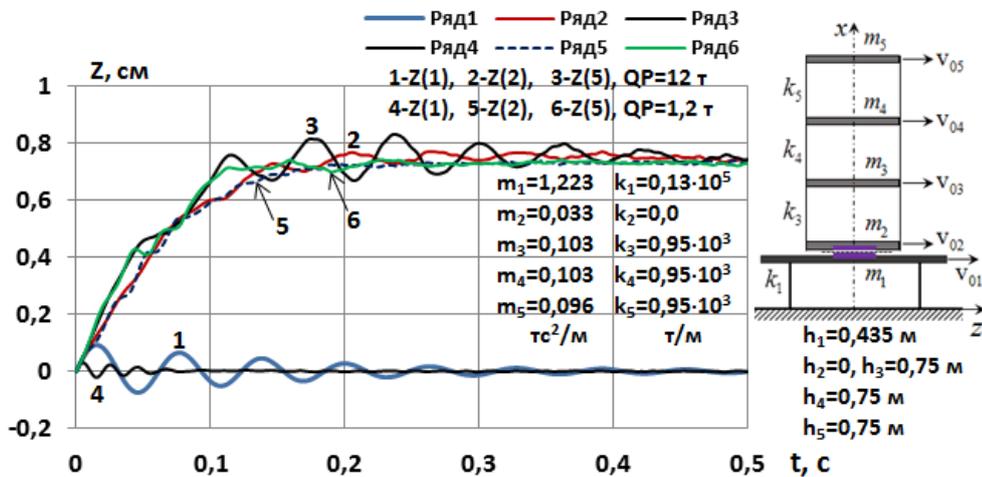


Рисунок 11. Графики изменения перемещений

Результаты получены при коэффициенте трения $\mu=0,1$ и параметре затухания $\xi = 0,05$. Кривые 1, 2, 3 получены при массе платформы $m_1 = 1,223 \text{ тс}^2/\text{м}$, а кривые 4, 5, 6 – при $m_1 = 0,1223 \text{ тс}^2/\text{м}$. На рис. 12 показаны графики изменения ускорений массы m_1 , m_2 и m_5 системы, полученные от заданной начальной скорости, где вес платформы $Q_p = 12 \text{ т}$, получены аналогичные результаты и при $Q_p = 1,2 \text{ т}$ (рис. 13). Сравнение показывает, уменьшение массы платформы приводит к значительному изменению ускорений платформы и модели.

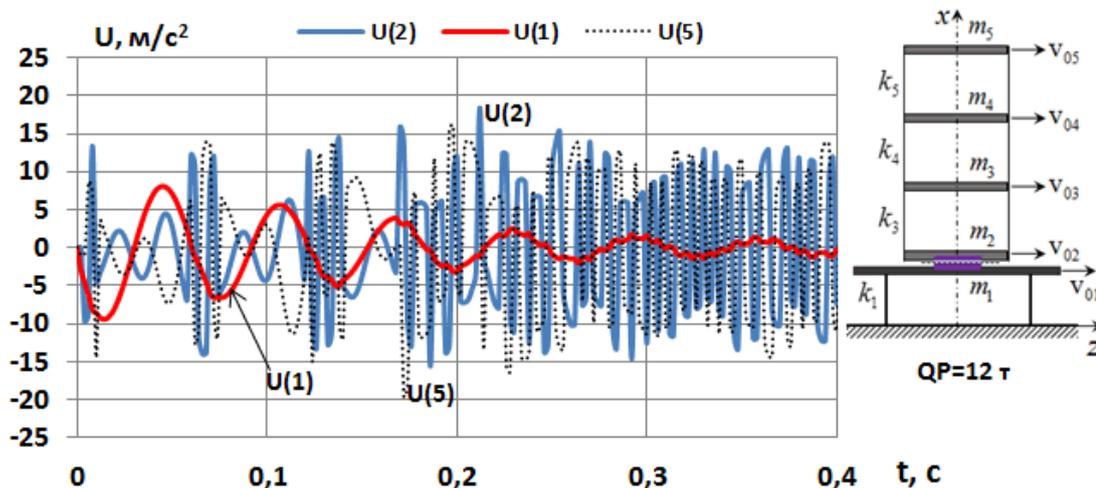


Рисунок 12. Графики ускорений и сил инерции ($Q_p = 12 \text{ т}$)
 $\mu = 0,1$

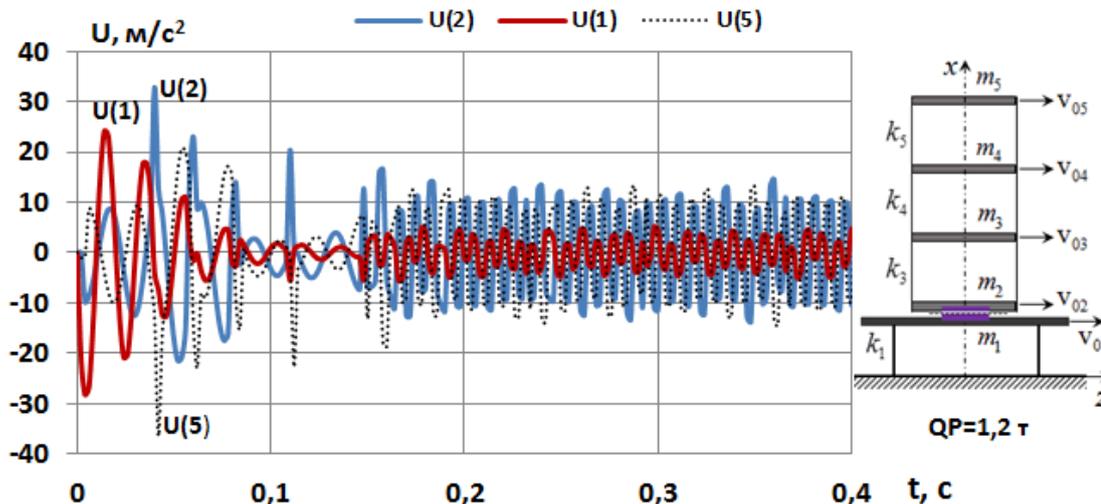


Рисунок 13. Графики ускорений и сил инерции ($Q_p = 1,2 \text{ т}$)
 $\mu = 0,1$

3.7. Исследование вынужденных колебаний системы «платформа-модель здания» от действия вибрационной нагрузки. Предполагается, что вибратор с двумя эксцентриками, установленный на нижнюю поверхность стола платформы, создаёт гармоническую нагрузку

$$p(t) = p_0 \sin \theta t, \quad p_0 = 2m_e e \theta^2, \quad \theta = 2\pi n_0 / 60,$$

где m_e – масса неуравновешенного груза;

e – эксцентриситет неуравновешенного груза;

n_0 – число оборотов двигателя в минуту;

θ – круговая частота вращения двигателя.

На рис.14 представлены полученные результаты вынужденных колебаний системы, при следующих данных: $m_e = 10$ кг, $e = 12$ см, $\theta = 62,8$ рад/с и $\mu = 0,1$. Из графиков видно, что колебания платформы (кривая z_1) имеет почти гармонический характер. В то время как колебания массы m_2 (кривая z_2) показывает более сложный характер изменения. Это, вероятно, связано с сильным влиянием силы трения-скольжения на массу m_2 , которая значительно меньше массы m_1 .

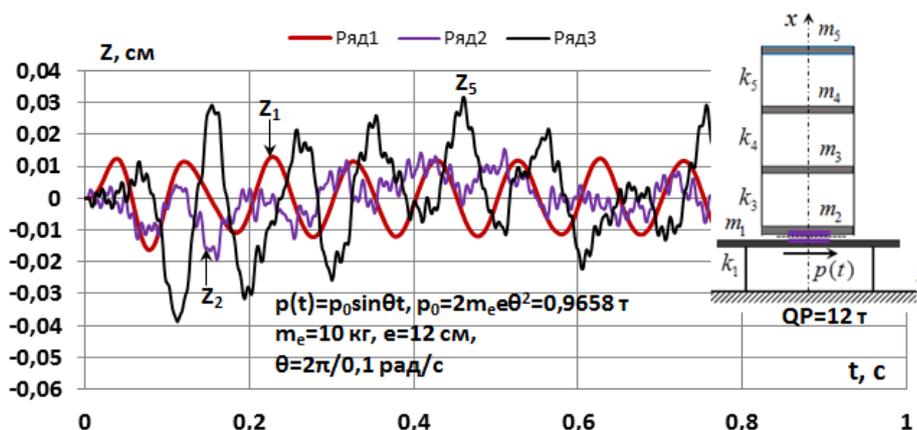


Рисунок 14. Графики перемещений ($QP = 12T$) $\mu = 0,1$

На рис.15 показаны результаты численного решения динамической задачи системы под действием вибрационной нагрузки в случае отсутствия скольжения, когда массы находятся в состоянии «залипания». На рис.16 представлены результаты численного решения по определению ускорений.

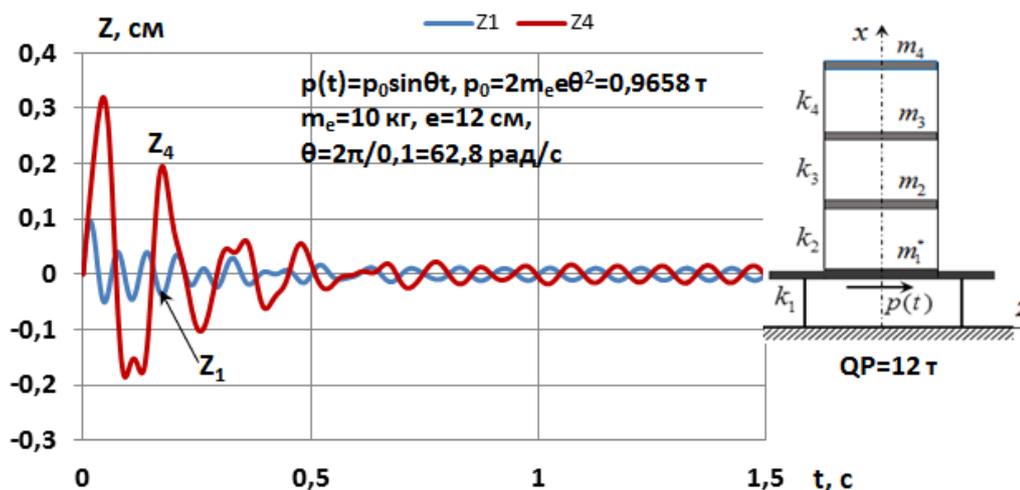


Рисунок 15. Графики перемещений ($QP = 12T$) $\mu = 0,1$

Легко можно заметить, что картина колебательного процесса системы значительно отличается от результатов, представленных на рис.14.

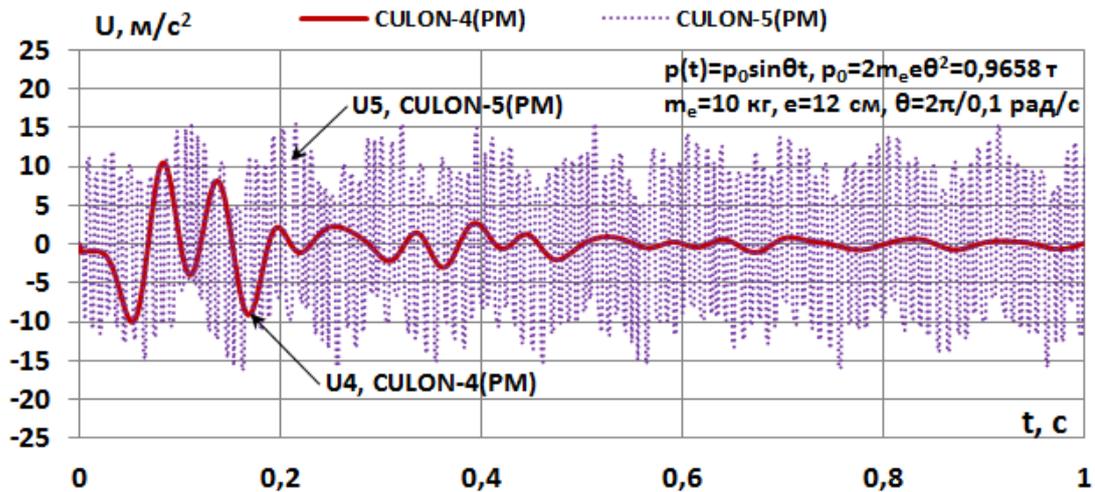


Рисунок 16. Графики ускорений ($QR = 12\tau$), $\mu = 0,1$

Из сравнения результатов, представленных на рис.13 следует, что график изменения ускорений в точке приложения массы m_5 модели со скользящим поясом значительно отличается от аналогичного графика для модели без учёта скольжения.

3.8. Исследование свободных и вынужденных колебаний модели здания со скользящим поясом. Предполагается, что плоскость скольжения расположена на уровне фундаментной плиты, что также соответствует случаю, когда жёсткость стоек платформы, на которой установлена модель здания, стремится к бесконечности. Исследуются свободные колебания данной модели в предположении того, что все сосредоточенные массы получают одинаковую начальную скорость, равную $0,1 \text{ м/с}$, а при этом начальные перемещения и ускорения равны нулю. Из полученных результатов (рис.17) следует, что при заданной одинаковой начальной скорости для всех масс, модель не совершает колебаний относительно нулевого перемещения. При этом ускорения массы m_1 имеет высокочастотный характер изменения.

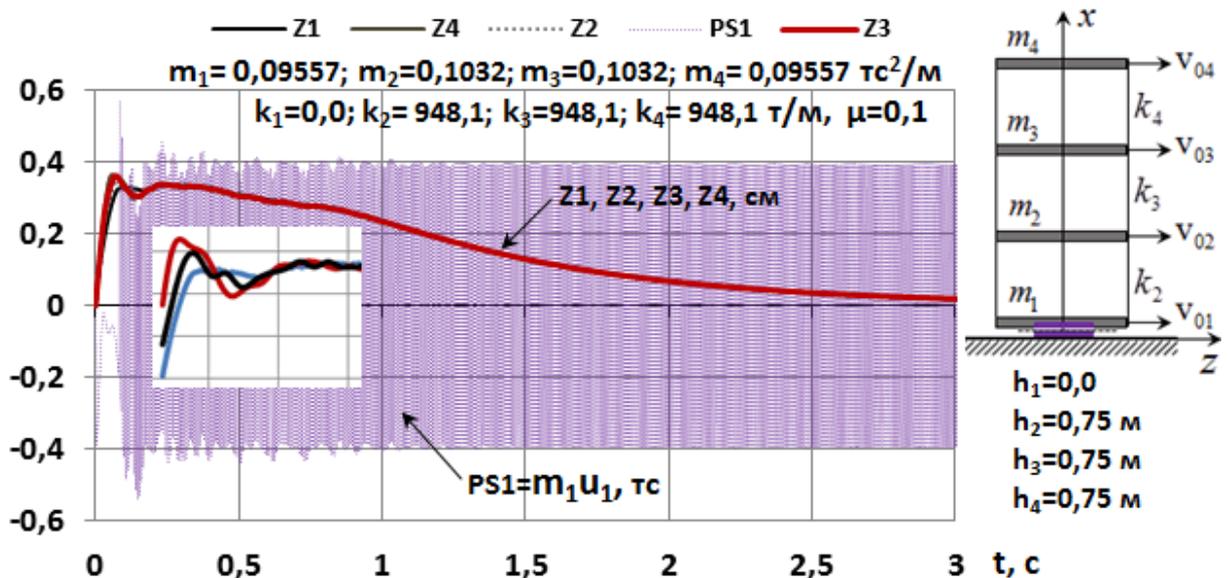


Рисунок 17. Графики свободных колебаний ($QR = 12\tau$)

Графики свободных колебаний модели, полученных от заданных начальных перемещений, распределённых по линейному закону, представлены на рис.18.

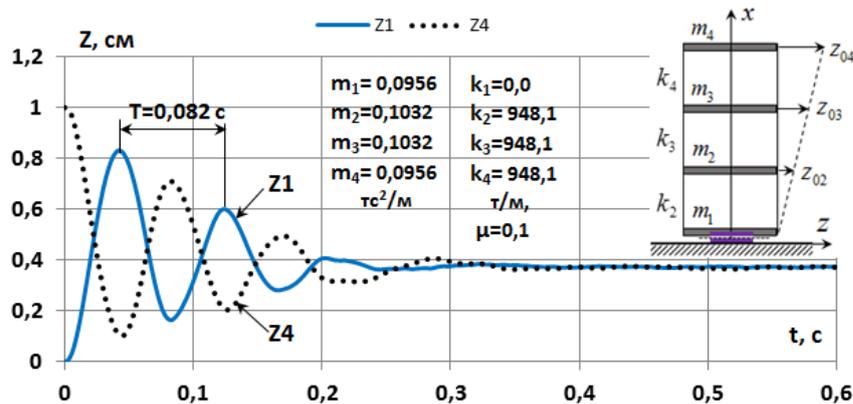


Рисунок 18. Графики свободных колебаний (QR = 12τ)

Здесь колебательный процесс также происходит не относительно нулевого перемещения, а со сдвигом вправо на величину $z_0 = 0,4$ см. На рис.19 приведены графики изменения ускорений во времени в точках приложения m_1 и m_4 от заданных начальных перемещений. Получены результаты численного решения динамической задачи, где модель здания испытывает действия кинематического возмущения.

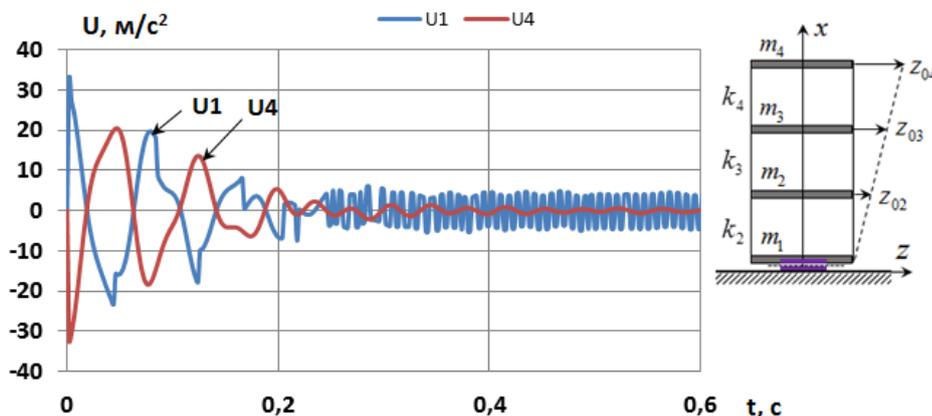


Рисунок 19. Графики ускорений (QR = 12τ)

На рис. 20 и 21 представлены графики изменения перемещений и ускорений во времени, полученные от заданного ускорения основания в виде функции $\ddot{z}_0(t) = A_0 \sin \theta t$,

где $A_0 = 4 \text{ м/с}^2$, $\theta = 2\pi/0,1 = 62,8 \text{ рад/с}$.

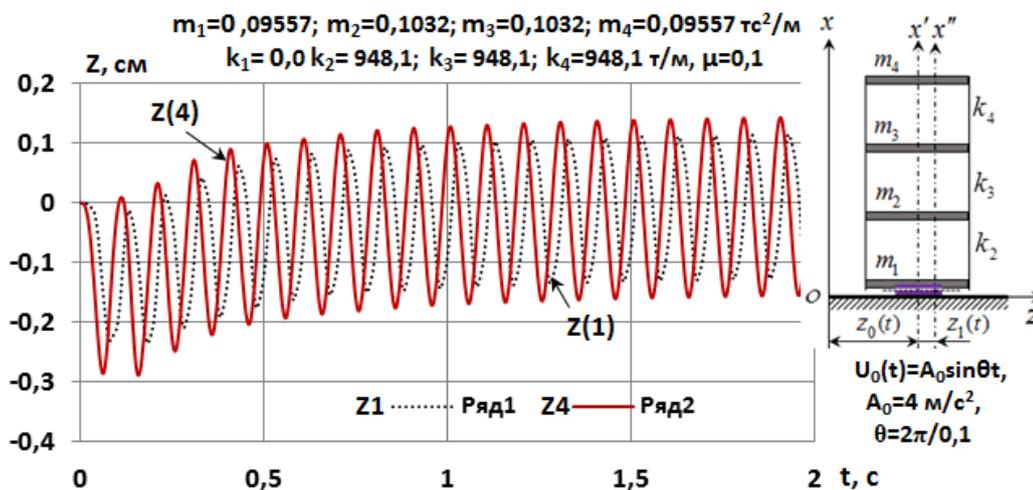


Рисунок 20. Графики перемещений (QR=12τ)

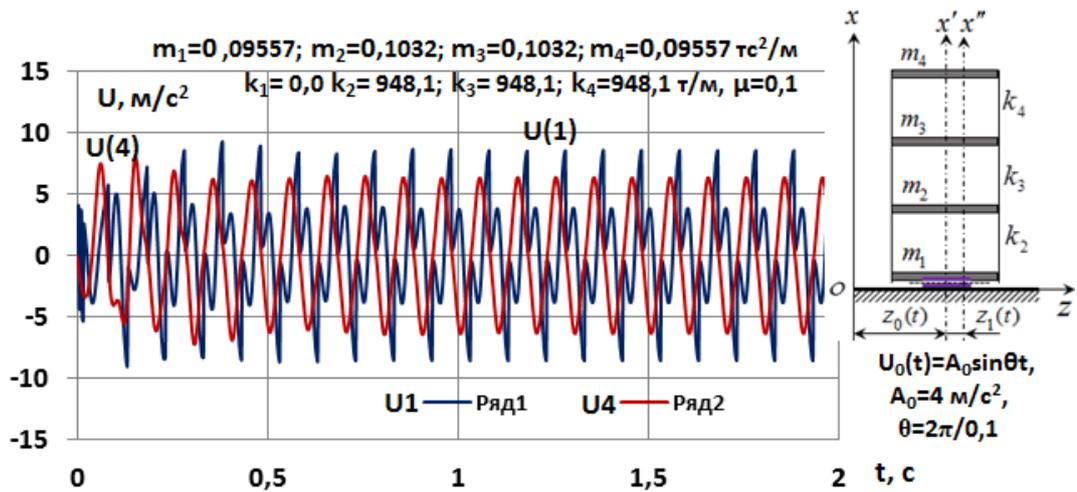


Рисунок 21. Графики ускорений (QR = 12т)

Кинематическое воздействие можно представить также в виде

$$z_0(t) = A_0 \sin \theta t, \quad \dot{z}_0(t) = \theta A_0 \cos \theta t, \quad \ddot{z}_0(t) = -\theta^2 A_0 \sin \theta t,$$

$$A_0 = 0,4 g / \theta^2, \quad \theta = 2\pi / T$$

где период колебаний T можно задавать в зависимости от T_1 – основного периода свободных колебаний исследуемого объекта. Например, если принять $\theta = 0,8 \omega$, то $T = 1,25 T_1$.

3.9. Исследование модель здания с тремя сосредоточенными массами жёстко связанной с основанием. Рассмотрим модель здания, которая жёстко связана с основанием. Графики свободных колебаний такой модели, полученные от начальной скорости, представлены на рис.22.

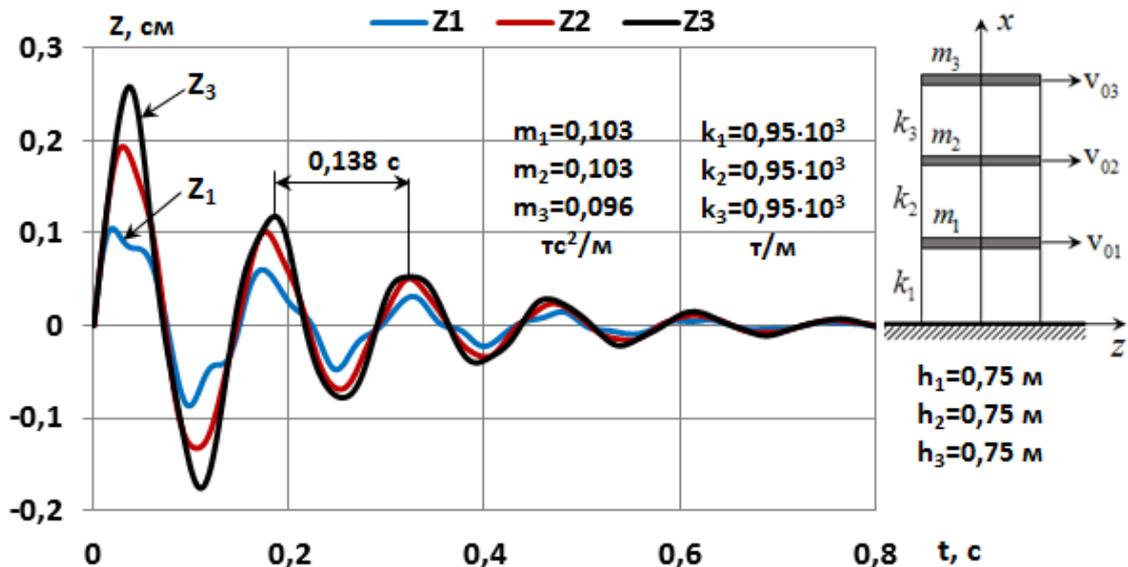


Рисунок 22. Графики свободных колебаний (QR = 12т)

На рис. 23 и 24 приведены графики перемещений и ускорений модели, полученных от кинематического возмущения основания

$$\ddot{z}_0(t) = A_0 \sin \theta t,$$

где

$$A_0 = 4 \text{ м/с}^2, \quad \theta = 2\pi / 0,1 = 62,8 \text{ рад/с.}$$

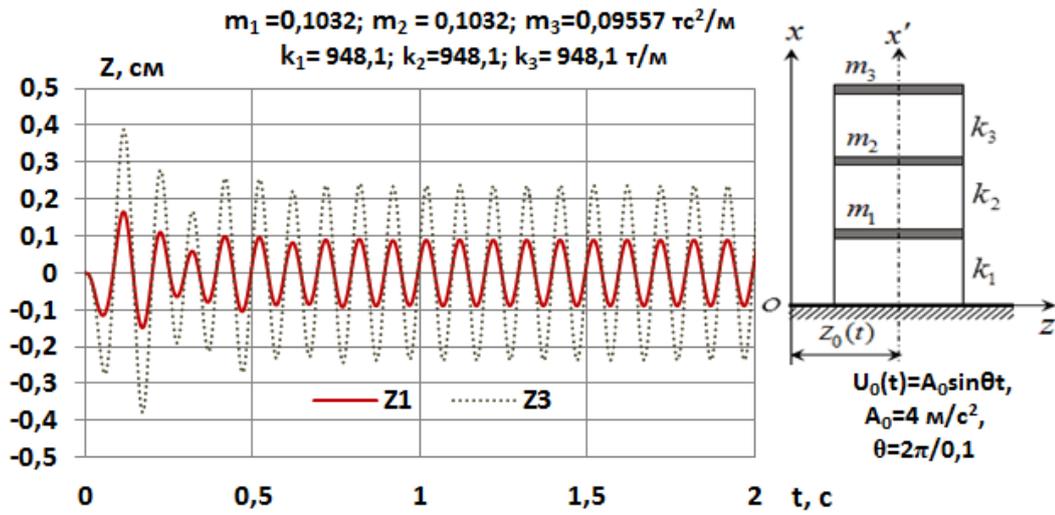


Рисунок 23. Графики перемещений (QP = 12τ)

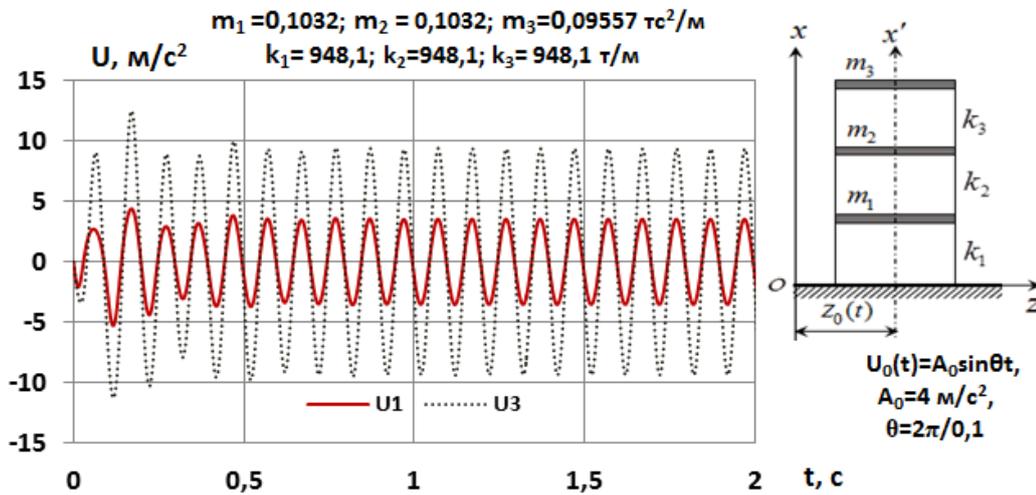


Рисунок 24. Графики ускорений (QP = 12τ)

3.10. Численное моделирование сейсмоизолированных зданий с маятниковыми скользящими опорами. Рассмотрим расчётную модель многоэтажного здания с маятниковыми скользящими опорами. Для получения уравнений движения системы используется метода перемещений. Для опорной массы $m_b = m_1$ с учётом демпфирования уравнение динамического равновесия принимает следующий вид

$$m_1(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1) + c_h \dot{u}_1 + F + r_{12} u_2 = 0, \quad (55)$$

Сила F , которая состоит из суммы двух сил, имеет вид

$$F = k_h \cdot u_1 + \mu Q \cos \alpha \cdot \text{sgn}(\dot{u}_0 - \dot{u}_1), \quad (56)$$

$$k_h = k_1 = Q/R,$$

где $\text{sgn}(\dot{u}_0 - \dot{u}_1)$ – кусочно-постоянная нечётная функция действительного аргумента с областью определения $(-\infty; +\infty)$ и областью значений $(-1; 0; +1)$,

\dot{u}_0 – скорость движения основания здания,

\dot{u}_1 – скорость движения массы m_1 .

Матричная форма системы уравнений представляется следующим образом

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}+\mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}+\mathbf{K}\mathbf{U}=-\mathbf{M}\mathbf{I}(\ddot{u}_0+\ddot{u}_1), \quad (57)$$

где $\mathbf{M} = \text{diag} (m_1 m_2 \dots m_n)$ – диагональная матрица масс,

\mathbf{I} – единичный вектор влияния,

\mathbf{C} – матрица затухания.

Численное моделирование задачи динамики здания с одномаятниковыми сейсмоизолирующими опорами реализуется методом последовательных приближений.

3.11. Исследование динамической модели здания от действия мгновенного импульса. В качестве объекта исследования принято 10-этажное каркасное здание.

На основе разработанной математической модели был реализован алгоритм, воплощённый в программе FPB-1 (Friction Pendulum Bearings). Проведены расчёты для двух вариантов конструкций: традиционного здания (модель M1) и здания с фрикционными опорами (модель M2). На рис. 25 представлены: для модели M1: перемещения масс m_1 (кривая 2) и m_{10} (кривая 1); для модели M2: перемещения опорной массы $m_b = m_1$ (кривая 4) и массы m_{11} (кривая 3)

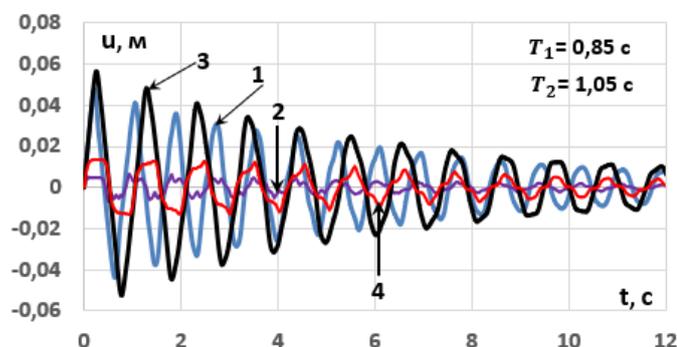


Рисунок 25. Сравнение результатов колебания модели здания

В четвёртой главе «**ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННЫХ ЗДАНИЙ МЕТОДОМ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**» рассматривается решение динамической задачи сейсмоизолированных зданий с применением метода сосредоточенных деформаций. Исследуется динамическая модель здания с сейсмоизоляцией при различных динамических воздействиях. Методом сосредоточенных деформаций сформирована матрица внешней жёсткости исследуемого объекта. Глава состоит из 10 параграфов и заканчивается выводами.

4.1. Исследование нелинейной работы сейсмоизоляции на основе гистерезисной модели Bouc-Wen. Динамическая модель здания включает три основных компонента: субструктуру, систему сейсмоизоляции и суперструктуру. Уравнение движения суперструктуры в рамках данной модели в матричной форме имеет вид

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{W}}_s + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{W}}_s + \mathbf{K}_s \mathbf{W}_s = -\mathbf{M}_s \mathbf{I}(\ddot{z}_g + \ddot{w}_b) \quad (58)$$

где $\mathbf{M}_s, \mathbf{C}_s, \mathbf{K}_s$ – диагональная матрица масс, матрицы затухания и жёсткости,

Уравнение движения массы m_b записывается в виде

$$m_b \ddot{w}_b + f_b - k_1 w_1 - c_1 \dot{w}_1 = -m_b \ddot{z}_g, \quad (59)$$

здесь f_b – восстанавливающая сила сейсмоизоляции,

k_1, c_1 – коэффициенты жёсткости и демпфирования первого этажа.

Для выполнения расчётов разработана компьютерная программа, с помощью которой получены результаты для динамической модели здания с резинометаллическими опорами.

4.2. Реализация нелинейной модели. В качестве объекта исследования рассмотрено 10-этажное каркасное здание. Сейсмозащита здания реализована с использованием 28 резинометаллических опор модели SI-H 500/102 производства "FIP Industriale". Предполагается, что массы сосредоточены на уровнях перекрытий и обладают только одной степенью свободы - в горизонтальном направлении. В связи с этим для формирования матрицы жёсткости используем основную систему метода перемещений.

Разработана компьютерная программа и получены результаты расчёта сейсмоизолированного здания от заданной акселерограммы.

4.3. Линейная модель с эффективной жёсткостью. В соответствии с требованиями Uniform Building Code, нелинейную зависимость восстанавливающей силы допустимо аппроксимировать эквивалентной линейной моделью, использующей параметры эффективной упругой жёсткости и эффективного вязкого затухания.

Система дифференциальных уравнений модели здания с резинометаллическими опорами, в предположении того, что каждая масса имеет одну линейную степень свободы, записывается в виде

$$\begin{aligned}
 m_b \ddot{w}_b + c_b \dot{w}_b + f_b - c_1 \dot{w}_1 - k_1 w_1 &= -m_b \ddot{z}_0, \\
 m_1 \dot{w}_1 + c_1 \dot{w}_1 + k_1 w_1 - c_2 (\dot{w}_2 - \dot{w}_1) - k_2 (w_2 - w_1) &= -m_1 (\ddot{z}_0 + \ddot{w}_b), \\
 m_j \ddot{w}_j + c_j (\dot{w}_j - \dot{w}_{j-1}) + k_j (w_j - w_{j-1}) - & \\
 -c_{j+1} (\dot{w}_{j+1} - \dot{w}_j) - k_{j+1} (w_{j+1} - w_j) &= -m_j (\ddot{z}_0 + \ddot{w}_b), \\
 j &= 2, 3, \dots, n-1, \\
 m_n \ddot{w}_n + c_n (\dot{w}_n - \dot{w}_{n-1}) + k_n (w_n - w_{n-1}) &= -m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{w}_b),
 \end{aligned} \tag{60}$$

где c_i, k_i – коэффициенты затухания и жёсткости,

4.4. Реализация линейной модели. В качестве объекта для исследования свободных колебаний рассматривается 10-этажное каркасное здание. Из полученных результатов следует, период колебаний модели с сейсмоизоляцией почти в три раза больше, чем для модели здания с заделкой в опорной части. При этом амплитуды ускорений отличаются примерно на 25%. Далее исследуется каркасная конструкция здания при гармоническом кинематическом воздействии на основание.

Также проведено численное моделирование динамического поведения сейсмоизолированного здания при сейсмическом воздействии, заданном акселерограммами. Разработанный алгоритм, позволил получить результаты для двух типов воздействий: синтезированной акселерограммы SA-482 и эталонной записи El Centro. Сравнительный анализ выявил двукратное превышение пиковых ускорений в жёсткой модели при синтезированном воздействии по сравнению с эталонным. Проведённые численные исследования с применением разработанного программного комплекса достоверно подтверждают эффективность резинометаллических сейсмоизолирующих опор для защиты зданий от сейсмических воздействий.

Для анализа влияния этажности на НДС зданий от сейсмических воздействий исследуются динамические модели сейсмоизолированных зданий различной этажности (10, 15, 20, 25 и 30 этажей), подвергающихся внешнему воздействию в виде заданной акселерограммы землетрясения. Исследуемый объект является каркасное здание с размерами в плане 12×30 м. Разработана компьютерная программа и исследованы свободные и вынужденные колебания динамических моделей зданий при различных значениях коэффициента эффективной жёсткости РМО и различных воздействиях.

Получены результаты от внешнего воздействия в виде аналоговой акселерограммы Спитакского землетрясения (07.12.1988) с пиковым ускорением 2,9 м/с² и шагом оцифровки 0,05 с, продолжительностью записи – 20 с. На рис. 26 и 27 представлены графики изменения ускорения массы m_n для зданий различной этажности, при других равных условиях.

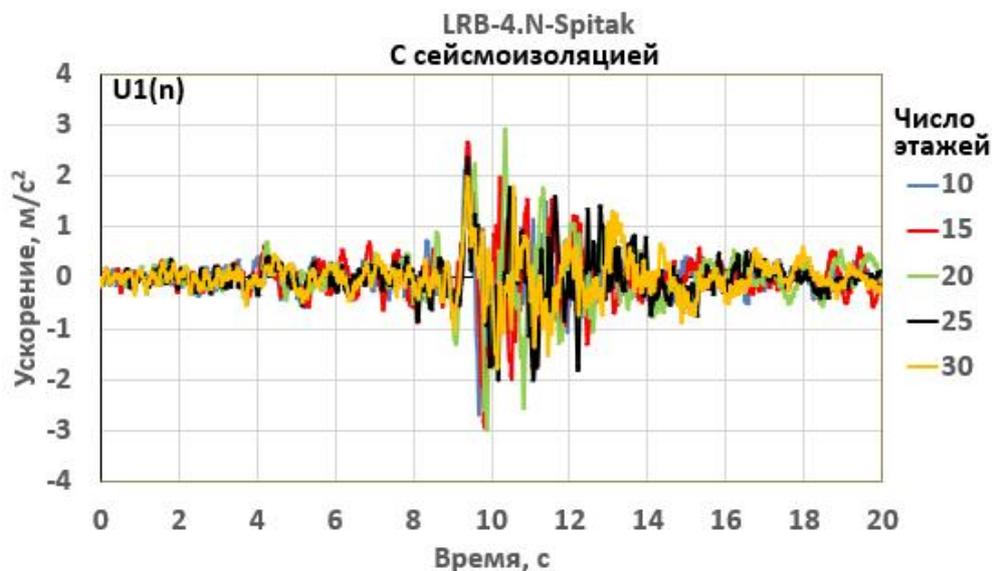


Рисунок 26. Графики ускорения массы m_n зданий с сейсмоизоляцией

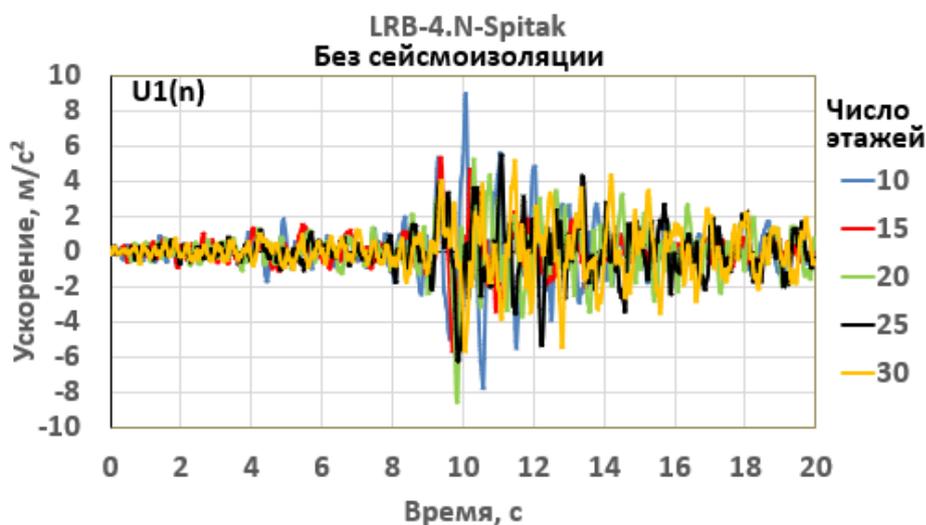


Рисунок 27. Графики ускорения массы m_n зданий без сейсмоизоляции

Сравнение показывает, что значения ускорений в сейсмоизолированных зданиях значительно меньше, чем в моделях зданий с жёстким опиранием. На рис. 28 и 29 приведены графики изменения относительных перемещений.

Сравнение показывает, что пиковые значения перемещений в моделях с сейсмоизоляции происходят несколько позже, чем в моделях без сейсмоизоляции (пиковое ускорение акселерограммы Spitak соответствует моменту времени $t = 9,4$ с). Следовательно, в зданиях с РМО реакция в виде горизонтального перемещения происходит с некоторым запаздыванием. Следует также отметить, что абсолютное перемещение в сейсмоизолированном состоит из суммы $W_b + W_n$, поэтому $W_{si} > W_{fb}$.

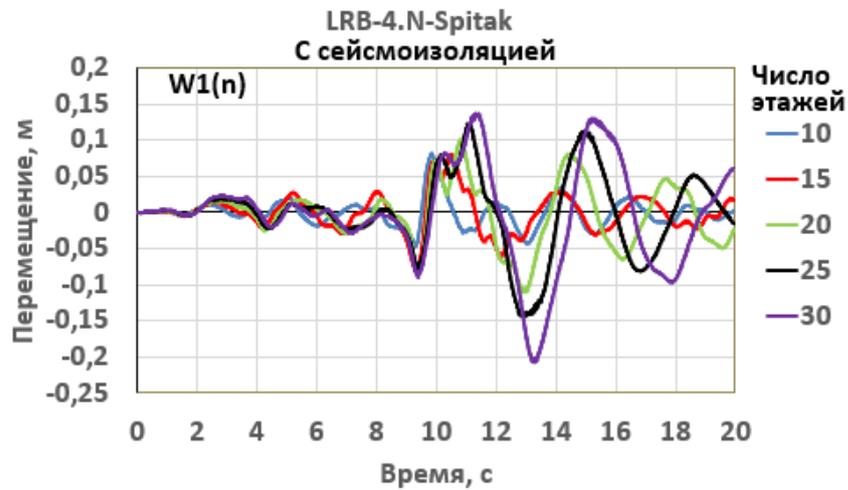


Рисунок 28. Графики перемещения массы m_n зданий с сейсмоизоляцией

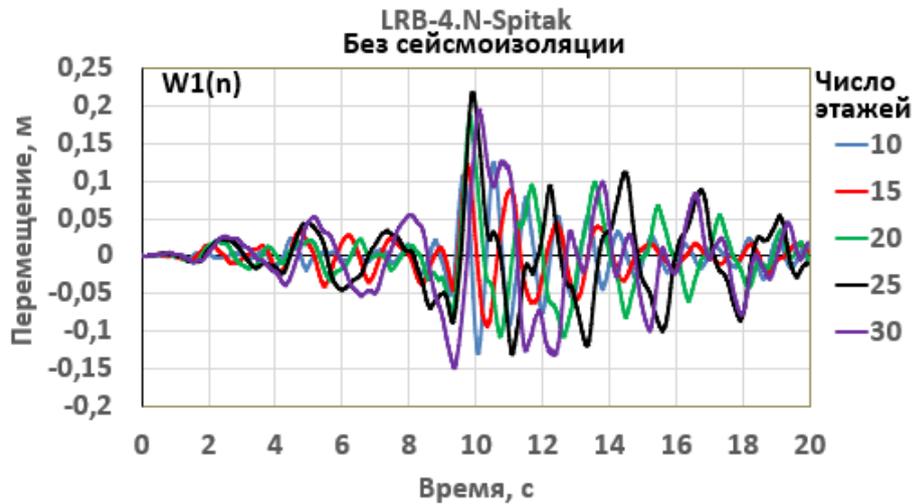


Рисунок 29. Графики перемещения массы m_n зданий без сейсмоизоляции

4.5. Моделирование взаимодействия здания с основанием методом сосредоточенных деформаций. В теории сейсмостойкости первостепенное значение приобретает задача разработки расчётных моделей системы «здание, сооружение-грунт основания». Предполагая, что сейсмическое воздействие на основание представляется однокомпонентным поступательным движением, примем расчётную модель, в которой каждая масса может иметь по четыре степени свободы.

Систему дифференциальных уравнений движения данной модели можно представить в матричной форме

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{V}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{K}\mathbf{V} = -\mathbf{P}. \quad (61)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \text{diag}(m_{1x}, J_{1y}, m_{1z}, J_{1x}, \dots, m_{nx}, J_{ny}, m_{nz}, J_{nx}), \\ \mathbf{P} &= (m_{1x} \times \ddot{u}_o, J_{y1} \times \ddot{\beta}_0, m_{1z} \times \ddot{w}_o, J_{x1} \times \ddot{\alpha}_0, \dots, \\ &\dots, m_{nx} \times \ddot{u}_o, J_{yn} \times \ddot{\beta}_0, m_{nz} \times \ddot{w}_o, J_{xn} \times \ddot{\alpha}_0), \\ \mathbf{V} &= (u_1, \varphi_1, w_1, \theta_1, \dots, u_n, \varphi_n, w_n, \theta_n), \\ \dot{\mathbf{V}} &= (\dot{u}_1, \dot{\varphi}_1, \dot{w}_1, \dot{\theta}_1, \dots, \dot{u}_n, \dot{\varphi}_n, \dot{w}_n, \dot{\theta}_n), \end{aligned}$$

$$\ddot{\mathbf{V}} = (\ddot{u}_1, \ddot{\varphi}_1, \ddot{w}_1, \dot{\theta}_1, \dots, \ddot{u}_n, \ddot{\varphi}_n, \ddot{w}_n, \dot{\theta}_n),$$

После замены векторов скоростей и ускорений в (61) соответствующими аппроксимирующими функциями

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{V}}_{n+1} &= \frac{\alpha_1}{\tau^2} (\mathbf{V}_{n+1} - \mathbf{V}_n) - \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{\mathbf{V}}_n - \alpha_3 \ddot{\mathbf{V}}_n, \\ \dot{\mathbf{V}}_{n+1} &= \frac{\beta_1}{\tau} (\mathbf{V}_{n+1} - \mathbf{V}_n) - \beta_2 \dot{\mathbf{V}}_n - \tau\beta_3 \ddot{\mathbf{V}}_n,\end{aligned}$$

получим систему уравнений

$$\mathbf{K}^* \mathbf{V}_{n+1} = \mathbf{P}_{n+1}^*,$$

в которой вектор свободных членов представляется в виде

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_{n+1}^* &= \mathbf{P}_{n+1} + \alpha_1^* \mathbf{M} \mathbf{V}_n + \alpha_2^* \mathbf{M} \dot{\mathbf{V}}_n + \alpha_3^* \mathbf{M} \ddot{\mathbf{V}}_n + \\ &+ \beta_1^* \mathbf{D} \mathbf{V}_n + \beta_2^* \mathbf{D} \dot{\mathbf{V}}_n + \tau\beta_3^* \mathbf{D} \ddot{\mathbf{V}}_n - \mathbf{M}^* \ddot{\Psi}_0(t),\end{aligned}\quad (62)$$

где $\alpha_1^* = \alpha_1 / \tau^2$; $\alpha_2^* = \alpha_2 / \tau$; $\beta_1^* = \beta_1 / \tau$;

$\alpha_1 = \alpha_2 = 4$, $\alpha_3 = 1$, $\beta_1 = 2$, $\beta_2 = 1$, $\beta_3 = 0$ - коэффициенты аппроксимации.

Вектор свободных членов (62) можно записать в форме

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_{n+1}^* &= \mathbf{P}_{n+1} + \mathbf{M} \mathbf{a}_n + \mathbf{D} \mathbf{b}_n - \mathbf{M}^* \ddot{\Psi}_0(t), \\ \mathbf{M}^* &= (\mathbf{m}_1^* \mathbf{m}_2^* \mathbf{m}_3^* \dots \mathbf{m}_n^*), \quad \mathbf{m}_i^* = \text{diag}(m_{ix} J_{iy} m_{iz} J_{ix}), \\ \ddot{\Psi}_0 &= (\ddot{u}_0 \ddot{\beta}_0 \ddot{w}_0 \dot{\alpha}_0), \\ \mathbf{a}_n &= \alpha_1^* \mathbf{V}_n + \alpha_2^* \dot{\mathbf{V}}_n + \alpha_3^* \ddot{\mathbf{V}}_n, \\ \mathbf{b}_n &= \beta_1^* \mathbf{V}_n + \beta_2^* \dot{\mathbf{V}}_n + \tau\beta_3^* \ddot{\mathbf{V}}_n,\end{aligned}\quad (63)$$

Решение системы динамических уравнений

$$\mathbf{K}^* \mathbf{V}_{n+1} = \mathbf{P}_{n+1}^* \quad (64)$$

может быть представлено итерационным способом. С этой целью (64) представим в виде

$$\sum_{j=1}^n k_{ij}^* v_j = p_i^*. \quad (65)$$

Тогда данная система эквивалентна приведённой системе

$$v_i = p_i + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} v_j. \quad (66)$$

Далее, предполагая, что k -е приближения $v_i^{(k)}$ корней известны, согласно Зейделю, будем строить $(k+1)$ -е приближения корней по формуле

$$v_i^{(k+1)} = p_i + \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij} v_j^{(k+1)} + \sum_{j=i}^n \alpha_{ij} v_j^{(k)}, \quad (67)$$

Из решения (67) определяются компоненты вектора перемещений, а затем вычисляются векторы деформаций и внутренних усилий. Особенность предлагаемой модели состоит в том, что она позволяет определять напряженно-деформированное состояние здания при многокомпонентном сейсмическом воздействии и с учётом поворота и кручения масс.

Разработана компьютерная программа **SEISM-14.4** на языке Fortran и получены результаты численного моделирования 14-этажного каркасного здания от сейсмического воздействия в виде заданной акселерограммы **El Centro**. На рис.30 и 31 показаны графики изменения ускорения фундаментной плиты и плиты покрытия.

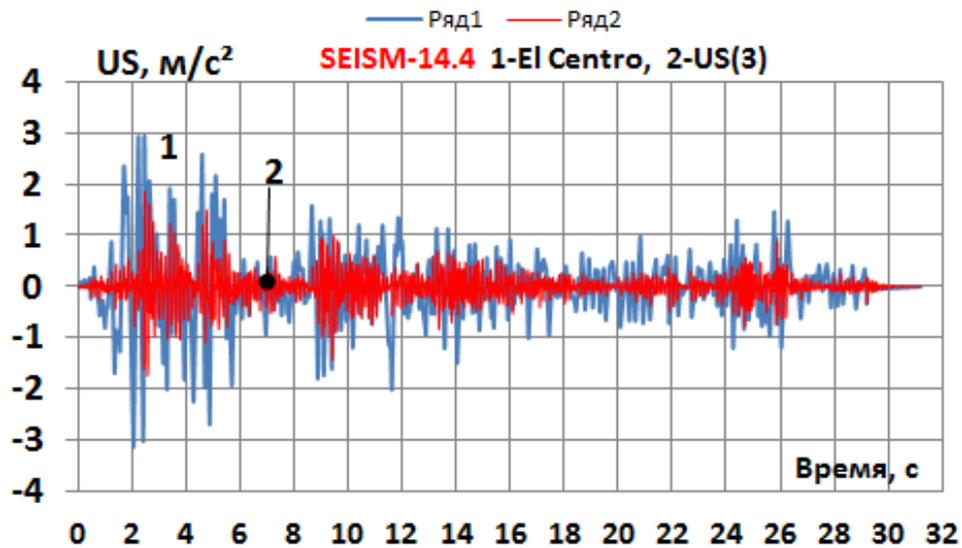


Рисунок 30. Линейное ускорение фундаментной плиты по оси ζ

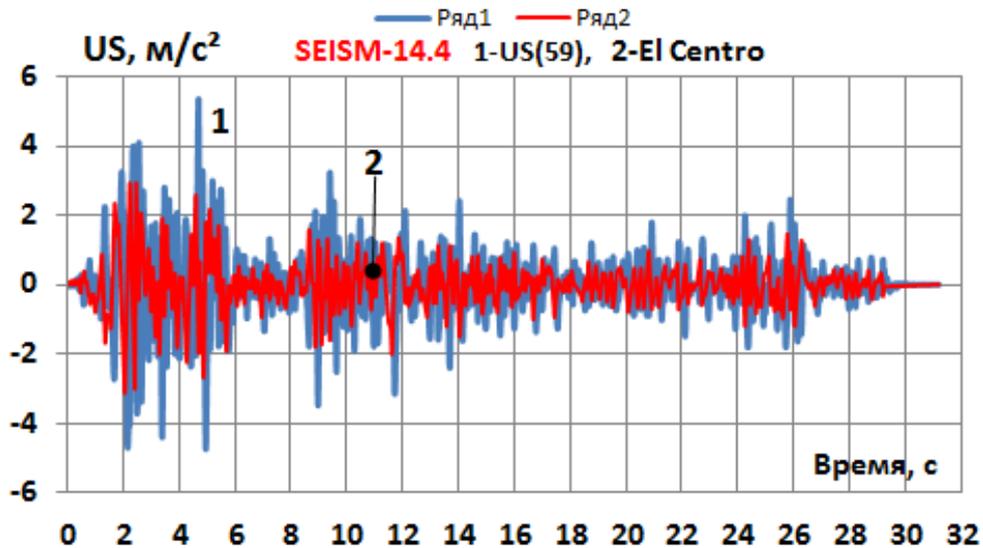


Рисунок 31. Линейное ускорение плиты покрытия оси ζ

Сравнение показывает, что максимальное ускорение фундаментной плиты примерно в полтора раза меньше, чем ускорения землетрясения, а максимальное ускорение плиты покрытия, наоборот, в полтора раза больше.

4.6. Многокомпонентное сейсмическое воздействие на основе метода сосредоточенных деформаций. Рассматриваемая расчётная модель сейсмоизолированного здания предполагает сосредоточение масс в уровнях перекрытий, где каждая инерционная масса обладает четырьмя степенями свободы: двумя угловыми (φ, θ) и двумя линейными (u, w). Динамическая модель учитывает многокомпонентное кинематическое воздействие на опорную часть конструкции, как показано на рис. 32.

$$\mathbf{U}_0(t) = (u_0 \ \beta_0 \ w_0 \ \alpha_0)^T,$$

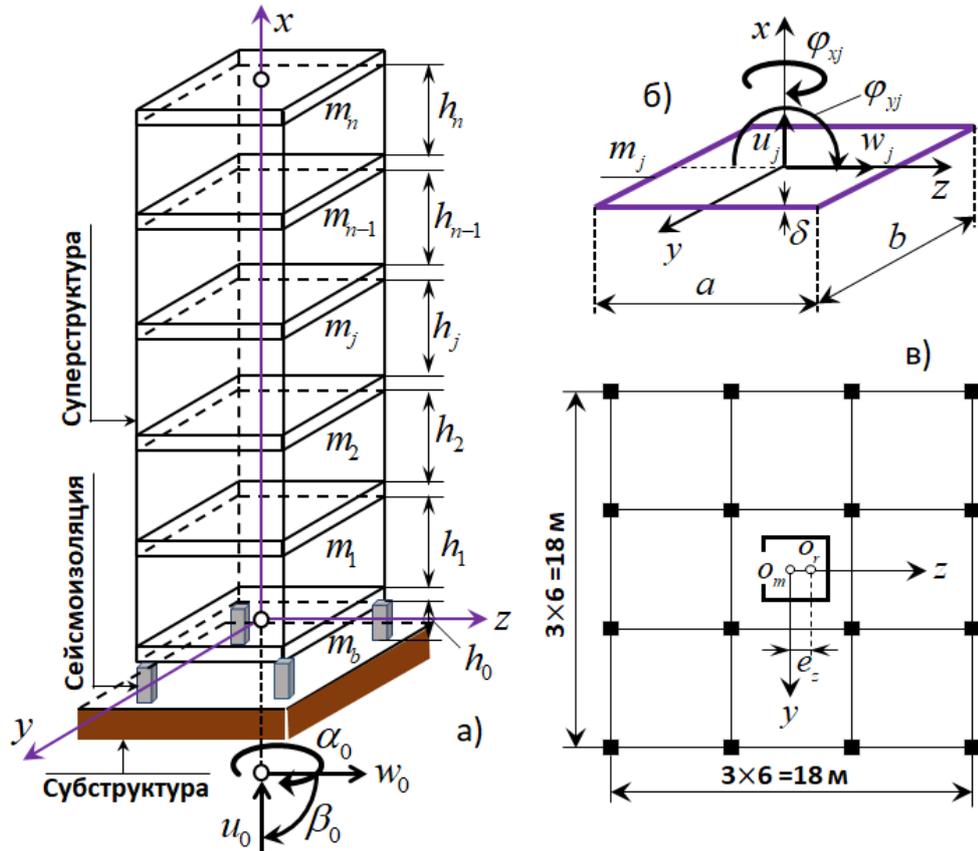


Рисунок 32. Динамическая модель сейсмоизолированного здания

Анализ динамического равновесия j -й инерционной массы здания, учитывающий эксцентриситет e_z между центрами масс o_m и жёсткостей o_r , позволяет на основе основной системы метода перемещений получить следующую матричную систему уравнений

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}[\ddot{\mathbf{U}}_0(t) + \ddot{\mathbf{U}}_b(t)], \quad (68)$$

$$\ddot{\mathbf{U}}_0(t) = (\ddot{u}_0 \ \ddot{\varphi}_0 \ \ddot{w}_0 \ \ddot{\theta}_0)_j^T, \quad \ddot{\mathbf{U}}_b(t) = (\ddot{u}_b \ \ddot{\varphi}_b \ \ddot{w}_b \ \ddot{\theta}_b)_j^T$$

$$\mathbf{M} = \text{diag}(m_x \ J_y \ m_z \ J_x)_j, \quad \mathbf{U} = (u \ \varphi \ w \ \theta)_j^T.$$

$$m_{xj} = m_{zj} = m_{pj} + m_{cj} + m_{wj} + m_{sj},$$

$$J_{yj} = \frac{\gamma \delta b a^3}{g \ 12} + \frac{\bar{m}_{vj}(h_j/2 + h_{j+1}/2)^3}{12}, \quad J_{xj} = \frac{\delta \gamma a b (a^2 + b^2)}{g \ 12},$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

Здесь $m_{pj}, m_{cj}, m_{wj}, m_{sj}$ – сосредоточенные массы плиты перекрытия, колонн, стен и ядра жёсткости соответственно на j -ом уровне;

\bar{m}_{vj} – сумма распределённых масс колонн, наружных стеновых панелей, перегородок и ядра жёсткости;

J_{yj} – момент инерции масс относительно оси y , проходящей через центр тяжести в j -ом уровне;

J_{xj} – полярный момент диска плиты перекрытия;

$\ddot{u}_0, \ddot{\varphi}_0, \ddot{w}_0, \ddot{\theta}_0$ – заданные линейные и угловые ускорения грунта основания.

Дифференциальные уравнения равновесия для массы m_b фундаментной плиты, записываются в следующей матричной форме

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}}_b + \mathbf{F}_b - \mathbf{K}_1 \mathbf{U}_1 - \mathbf{D}_1 \dot{\mathbf{U}}_1 &= -\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}}_0(t), \\ \mathbf{M}_b &= \text{diag}(m_x \ J_y \ m_z \ J_x)_b, \quad \mathbf{F}_b = \mathbf{K}_{eff} \mathbf{U}_b + \mathbf{D}_{eff} \dot{\mathbf{U}}_b, \\ J_{yj} &= \frac{\gamma_b h_b}{g} \frac{b a^3}{12}, \quad J_{xb} = \frac{h_b \gamma_b}{g} \frac{a b (a^2 + b^2)}{12}, \\ m_{xb} &= m_{zb} = \gamma_b a b h_b / g, \\ \mathbf{K}_{eff} &= \text{diag}(k_u \ k_\varphi \ k_w \ k_\theta), \quad \mathbf{D}_{eff} = \text{diag}(c_u \ c_\varphi \ c_w \ c_\theta), \\ \mathbf{K}_1 &= \text{diag}(k_{1u} \ k_{1\varphi} \ k_{1w} \ k_{1\theta}), \quad \mathbf{D}_1 = \text{diag}(c_{1u} \ c_{1\varphi} \ c_{1w} \ c_{1\theta}), \\ \mathbf{U}_b &= (u_b \ \varphi_b \ w_b \ \theta_b)^T, \quad \mathbf{U}_1 = (u_1 \ \varphi_1 \ w_1 \ \theta_1)^T. \end{aligned} \quad (69)$$

Здесь γ_b, h_b – объёмный вес и толщина фундаментной плиты;

$\mathbf{K}_{eff}, \mathbf{D}_{eff}$ – диагональные матрицы эффективных упругих жёсткостей и вязкого затухания;

$\mathbf{U}_b, \mathbf{U}_1$ – векторы перемещений инерционных масс m_b и m_1 соответственно;

$k_u, k_\varphi, k_w, k_\theta$ – заданные коэффициенты жёсткости резинометаллической опоры;

$k_{1u}, k_{1\varphi}, k_{1w}, k_{1\theta}$ – коэффициенты жёсткости, соответствующие элементам первого этажа;

\mathbf{F}_b – вектор восстанавливающих сил в РМО.

Одним из основных задач в решении динамических задач систем с конечным числом степеней свободы является формирование матрицы жёсткости. Здесь для построения матрицы жёсткости применяется метод сосредоточенных деформаций. Формирование матрицы жёсткости на основе метода сосредоточенных деформаций (МСД) сводится к следующему. Податливость связей, сосредоточенных по линиям между смежными i -м и $i+1$ -м элементами, включая крутильную составляющую, описывается матрицей следующего вида

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_i &= \text{diag} \left(\frac{1}{EF_{x,i,b}} \quad \frac{1}{EJ_{y,i,b}} \quad \frac{1}{GF_{z,i,b}} \quad \frac{1}{GJ_{x,i,b}} \right) b_i + \\ &+ \text{diag} \left(\frac{1}{EF_{x,i+1,b}} \quad \frac{1}{EJ_{y,i+1,b}} \quad \frac{1}{GF_{z,i+1,b}} \quad \frac{1}{GJ_{x,i+1,b}} \right) a_{i+1}. \end{aligned} \quad (70)$$

где E, G – модули Юнга и сдвига, $b_i = a_{i+1} = h_i / 2$.

Матрица внутренней жёсткости дискретной системы, сформированная методом сосредоточенных деформаций (МСД), имеет вид

$$\mathbf{C} = \text{diag}(\mathbf{C}_0 \ \mathbf{C}_1 \ \mathbf{C}_2 \ \dots \ \mathbf{C}_{n-1} \ \mathbf{C}_n). \quad (71)$$

Из матричных равенств

$$\mathbf{P} = -\mathbf{A}\mathbf{S}, \quad \mathbf{\Delta} = -\mathbf{A}^T \mathbf{U}, \quad \mathbf{S} = \mathbf{C}\mathbf{\Delta},$$

следует, что

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{A}^T \mathbf{U} = \mathbf{K}\mathbf{U}, \quad \mathbf{K} = \mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{A}^T, \quad (72)$$

здесь \mathbf{K} – матрица внешней жёсткости.

После построения матрицы \mathbf{K} – методом сосредоточенных деформаций становится возможным численное решение системы уравнений (68) и (69).

4.7. Динамическая модель сейсмоизолированного здания на основе метода сосредоточенных деформаций. В этом параграфе рассматривается решение динамической задачи сейсмоизолированных зданий с применением метода сосредоточенных деформаций.

Для динамической системы с конечным числом степеней свободы уравнения равновесия в матричной форме могут быть представлены в виде единой системы уравнений следующим образом

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{F} + \mathbf{P}, \quad (73)$$

где $\mathbf{M}, \mathbf{D}, \mathbf{K}$ – матрицы масс, демпфирования и жёсткости,

$\ddot{\mathbf{U}}, \dot{\mathbf{U}}, \mathbf{U}$ – векторы ускорений, скоростей и перемещений,

\mathbf{F} – вектор внешнего воздействия в основании здания на уровне субструктуры,

\mathbf{P} – вектор заданных динамических нагрузок.

Численное решение (73) приводит к системе алгебраических уравнений, которая решается шаговым методом.

4.8. Формирование матрицы жёсткости на основе метода сосредоточенных деформаций. Матрица жёсткости \mathbf{K} , формируется методом сосредоточенных деформаций. В качестве примера рассмотрим динамическую модели балки, разбитую на конечные элементы МСД. Податливость связей между соседними элементами i и $i+1$, включая крутильную составляющую, описывается диагональной матрицей \mathbf{B} .

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{i,i+1} = \mathbf{B}_{i,b} + \mathbf{B}_{i+1,a} = \text{diag} \left(\frac{1}{EF_{ib}}, \frac{1}{EJ_{yi,b}}, \frac{1}{GF_{zi,b}}, \frac{1}{GJ_{pi}} \right) \cdot b_i + \\ + \text{diag} \left(\frac{1}{EF_{i+1,a}}, \frac{1}{EJ_{y,i+1,a}}, \frac{1}{GF_{z,i+1,b}}, \frac{1}{GJ_{p,i+1}} \right) \cdot a_{i+1}, \end{aligned} \quad (74)$$

$$(i = 1, 3, \dots, n-1),$$

где $J_p = J_x$ – полярный момент инерции сечения бруса.

Матрица внутренней жёсткости конструкции, согласно работе Ржаницына, имеет следующий вид

$$\mathbf{C}_{i,i+1} = \mathbf{B}_{i,i+1}^{-1} = \text{diag} (EF_{i,i+1}, EJ_{yi,i+1}, GF_{zi,i+1}, GJ_{pi,i+1}) / h_i, \quad (75)$$

$$(i = 1, 3, \dots, n-1).$$

Матрица внутренней податливости для системы, с n конечных элементов методом сосредоточенных деформаций, принимает следующий вид

$$\mathbf{B} = \text{diag} (\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_{12}, \mathbf{B}_{23}, \dots, \mathbf{B}_{n-1,n}, \mathbf{B}_{n+1}).$$

Матрица внутренней жёсткости системы, состоящей из n конечных элементов МСД и $n+1$ сечений, с учётом уравнений (74) - (75) выражается следующим образом

$$\mathbf{C} = \text{diag} (\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3, \dots, \mathbf{C}_n, \mathbf{C}_{n+1}). \quad (76)$$

Для построения матрицы внешней жёсткости требуется предварительно сформировать матрицу коэффициентов уравнений равновесия.

Таким образом, вектор внешних сил выражается следующим образом

$$\mathbf{P} = -\mathbf{A}\mathbf{S} = -\mathbf{A}\mathbf{C}\Delta = \mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{A}^T\mathbf{U} = \mathbf{K}\mathbf{U}$$

$$\mathbf{K}\mathbf{U}=\mathbf{P}, \quad (77)$$

$$\mathbf{K}=\mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{A}^T, \quad (78)$$

здесь \mathbf{K} – матрица внешней жёсткости системы в статическом состоянии.

Для динамического анализа рассматривается система дифференциальных уравнений (73) с матрицей жёсткости \mathbf{K} , сформированной по (78). Численное интегрирование осуществляется методом последовательных аппроксимации, при этом векторы скоростей и ускорений, соответствующих моменту времени t_{n+1} , представляется в следующей форме

$$\dot{\mathbf{U}}_{n+1}=\beta_1(\mathbf{U}_{n+1}-\mathbf{U}_n)/\tau-\beta_2\dot{\mathbf{U}}_n-\tau\beta_3\ddot{\mathbf{U}}_n, \quad (79)$$

$$\ddot{\mathbf{U}}_{n+1}=\alpha_1(\mathbf{U}_{n+1}-\mathbf{U}_n)/\tau^2-\alpha_2\dot{\mathbf{U}}_n/\tau-\alpha_3\ddot{\mathbf{U}}_n, \quad (80)$$

$$(n=0,1,2,\dots,N),$$

где $\tau=t_{n+1}-t_n$ – шаг интегрирования по времени,

α_i, β_i – коэффициенты аппроксимации.

Вводя в дифференциальное уравнение матричной форме (73) в момент времени t_{n+1} уравнения (79) и (80), находим

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_1}{\tau^2}\mathbf{M}\mathbf{U}_{n+1}+\frac{\beta_1}{\tau}\mathbf{D}\mathbf{U}_{n+1}+\mathbf{K}\mathbf{U}_{n+1}=\mathbf{P}_{n+1}-\mathbf{F}_{n+1}+ \\ +\frac{\alpha_1}{\tau^2}\mathbf{M}\mathbf{U}_n+\frac{\alpha_2}{\tau}\mathbf{M}\dot{\mathbf{U}}_n+\alpha_3\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}_n+\frac{\beta_1}{\tau}\mathbf{D}\mathbf{U}_n+\beta_2\mathbf{D}\dot{\mathbf{U}}_n+\tau\beta_3\mathbf{D}\ddot{\mathbf{U}}_n, \end{aligned} \quad (81)$$

Уравнение (81) можно записать в стандартной форме

$$\mathbf{K}^*\mathbf{U}_{n+1}=\mathbf{P}_{n+1}^*, \quad (82)$$

$$\mathbf{K}^*=\mathbf{K}+\frac{\alpha_1}{\tau^2}\mathbf{M}+\frac{\beta_1}{\tau}\mathbf{D}, \quad (83)$$

$$\mathbf{P}_{n+1}^*=\mathbf{P}_{n+1}-\mathbf{F}_{n+1}+\mathbf{M}\mathbf{A}_n+\mathbf{D}\mathbf{V}_n, \quad (84)$$

$$\mathbf{A}_n=\left(\frac{\alpha_1}{\tau^2}\mathbf{U}_n+\frac{\alpha_2}{\tau}\dot{\mathbf{U}}_n+\alpha_3\ddot{\mathbf{U}}_n\right),$$

$$\mathbf{V}_n=\left(\frac{\beta_1}{\tau}\mathbf{U}_n+\beta_2\dot{\mathbf{U}}_n+\tau\beta_3\ddot{\mathbf{U}}_n\right).$$

Здесь $\mathbf{A}_n, \mathbf{V}_n$ – векторы псевдоускорений и псевдоскоростей.

Матрица затухания в выражения (83) и (84) может быть представлена по Релею

$$\mathbf{D}=a\mathbf{M}+b\mathbf{K}, \quad (85)$$

где a и b – произвольные коэффициенты пропорциональности.

На основе изложенного алгоритма разработана компьютерная программа **SI-MCD-EI Centro** на языке Fortran и получены результаты расчёта сейсмоизолированного здания с резинометаллическими опорами. С целью сравнения также получены результаты расчёта модели с жёстким защемлением и упругими опорами.

4.9. Примеры численного моделирования. Здесь рассматриваются конкретные примеры по реализации алгоритма метода сосредоточенных деформаций. Исследовано свободных и вынужденных колебаний сейсмоизолированных зданий методом сосредоточенных деформаций. В качестве примера рассматривается динамическая модель 9-этажного каркасного здания с ядром жёсткости.

Полученные результаты подтверждают, что разработанный математической модель и компьютерной программы обеспечивают эффективный анализ динамического поведения сейсмоизолированных конструкций при различных типах внешних нагрузок (рис. 33).

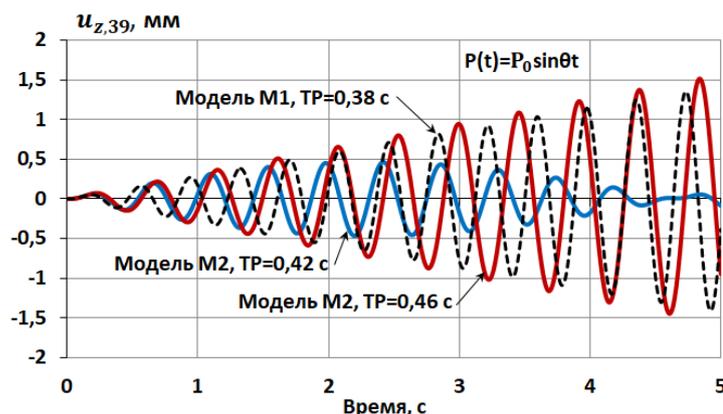


Рисунок 33. Действия гармонической нагрузки

На рис. 34 приведены графики колебаний сейсмоизолированной модели при различных значениях периода гармонической нагрузки.

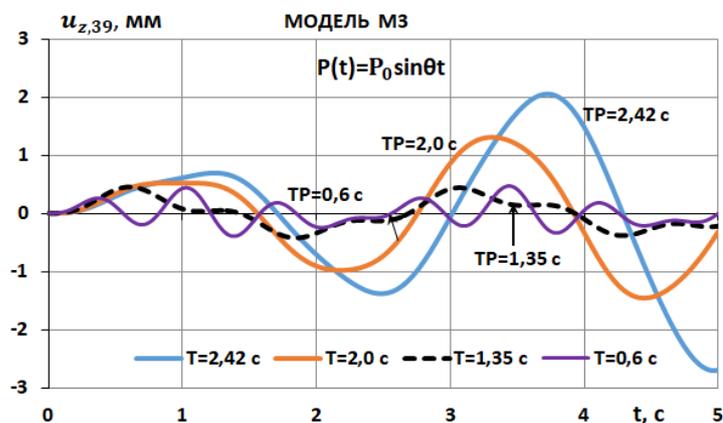


Рисунок 34. Колебания модели М3 при различных значениях частоты гармонической нагрузки

Разработанная методика динамического анализа обеспечивает комплексную оценку напряженно-деформированного состояния сейсмоизолированных зданий при различных воздействиях.

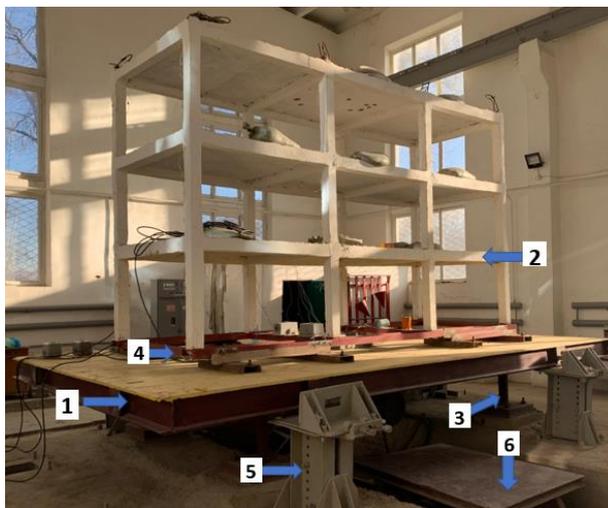
4.10. Оценка эффективности применения сейсмоизоляции из резинометаллических опор. Сейсмическая изоляция показала свою высокую эффективность и экономическую конкурентоспособность по сравнению с традиционными методами обеспечения сейсмостойкости различных сооружений. Оптимальный вариант, как правило, выбирается путём сопоставления технико-экономических показателей рассматриваемых вариантов, сравнения показателей нового проекта с эталоном или с построенным зданием. Принимается то решение, которое при прочих равных условиях для своего осуществления требует меньших затрат. Для анализа сравнения стоимости здания с сейсмоизоляцией и без неё приняты следующие размеры здания, конструктивное решение и несущие конструкции. Здание имеет прямоугольную форму в плане с размерами 30×19 метров по осям. Анализ показал, что внутренние силы в конструкциях сейсмоизолированного здания значительно уменьшаются по сравнению с зданием без сейсмоизоляции, что, в свою очередь, приводит к снижению площади горизонтальных сечений вертикальных конструкций. На основе этого были выбраны размеры поперечного сечения несущих элементов зданий. В здании без РМО расход арматуры превышает на 32%, а бетона - на 20,24%, по сравнению с зданием с РМО. Общая разница в стоимости между зданием с сейсмоизоляцией и без неё в части основных несущих конструкций составляет около 10%.

Пятая глава «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ПЛАТФОРМА - МОДЕЛЬ ЗДАНИЯ» С ЭЛЕМЕНТАМИ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ» посвящена экспериментальным исследованиям системы «платформа-модель здания». Глава состоит из 7 параграфов и заканчивается выводами.

5.1. Цель эксперимента. Целью данных экспериментальных исследований было определение деформированного состояния модели каркасного здания. Испытания проводились в лабораториях «Сейсмостойкость зданий и сооружений» и «Гидротехнические сооружения» Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана.

5.2. Конструкция испытательного стенда. Для проведения испытаний был использован спроектированный и изготовленный испытательный стенд в виде виброплатформы. Виброплатформа (рис. 35) представляет собой жёсткую ячеистую конструкцию размером 600×350×22 см, установленную на четырёх металлических опорах.

Виброплатформа моделируется как линейный осциллятор с сосредоточенной массой $m = Q / g = 12 / 9,81 = 12,23 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2 / \text{см}$ (рис. 36), при этом опорные стойки (рис. 36) могут рассматриваться в двух вариантах граничных условий: с жёстким защемлением в основании либо с шарнирным опиранием.



1-виброплатформа 6×3,5 м; 2- модель исследуемого объекта в масштабе 1:4; 3-стойка сечением 10×4 см, длиной 43,5 см; 4- опорная часть модели из швеллера №18; 5 – ограничительная опора, 6 – грузовая тележка.

Рисунок 35. Виброплатформа и модель фрагмента трёхэтажного каркасного здания

а) обе концы стоек защемлены (рис.36, а), тогда коэффициент жёсткости будет равен

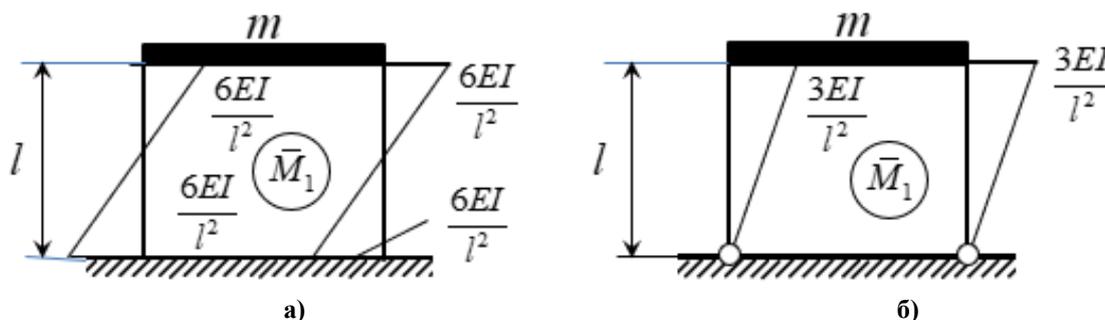


Рисунок 36. Динамические расчётные модели виброплатформы

$$r_{11} = \frac{12EI}{l^3} \quad (86)$$

б) одни концы стоек защемлены, а другие – шарнирно опёртые (рис.36, б), тогда коэффициент жёсткости будет равен

$$r_{11} = \frac{3EI}{l^3} \quad (87)$$

Для заданного веса и жёсткости колонн период собственных колебаний виброплатформы равен

$$T = 2\pi / \omega = 2\pi \sqrt{m/k} = 2\pi \sqrt{Q\delta_{11}/g} = 2\pi \sqrt{w_{cm} / g} ,$$

5.3. Свободные колебания платформы. На рис.37 представлен график свободных колебаний платформы в продольном направлении, полученный от ударного воздействия. Из этого графика следует, что период колебания платформы составляет $T = 0,11$ с, а логарифмический декремент $\delta = 0,218$. Если учесть, что коэффициент вязкого затухания ξ характеризует скорость затухания амплитуд свободных колебаний, то из зависимости

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \approx 2\pi\xi ,$$

получим

$$\xi \approx \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0,218}{6,28} = 0,0347 \rightarrow 3,47\% .$$

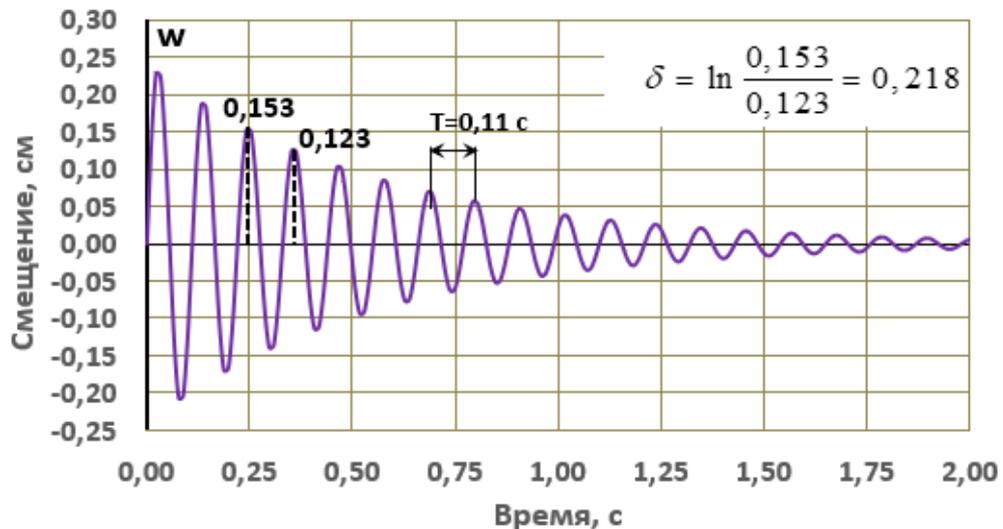


Рисунок 37. Собственные затухающие колебания виброплатформы

С увеличением высоты стоек период колебаний будет увеличиваться, а частота колебаний будет уменьшаться.

5.4. Методика проведения динамического испытания физической модели каркасного здания. Испытания проводились в соответствии с действующими нормативными документами на виброплатформе от динамического воздействия адекватные нагрузкам при землетрясении интенсивностью до 9 баллов. В процессе испытаний производились замеры смещений и ускорений модель здания в трёх направлениях. Для регистрации колебаний системы «платформа-модель здания» использовались вибродатчики. Колебание виброплатформы осуществляется при помощи вибратора, установленного снизу на платформе.

5.5. Измерительная аппаратура и приборы. Для проведения испытаний железобетонной модели использовались следующие контрольно-измерительные приборы: осциллограф Н-700, вибродатчики и вибратор. Колебательное воздействие на виброплатформу осуществляется с помощью вибратора, работающего в комплексе с асинхронным электродвигателем. Установленная аппаратура регистрировала колебания с использованием измерительных приборов (сейсмометр и осциллограф), на фотобумаге осциллографа фиксировались смещения колебаний.

5.6. Материалы и конструкции физической модели трёхэтажного каркасного здания. Особенность работы каркаса многоэтажных железобетонных зданий при воздействии горизонтальных сейсмических сил заключается в изменении знака усилий, которые в узлах рам имеют тенденцию быть близкими к кососимметричными. Объектом испытаний является однопролётная трёхэтажная модель железобетонного каркасного здания в масштабе 1:4 (рис. 35), верхнее строение которой представляет собой гибкую конструкцию каркасного типа, выполненную из железобетонных элементов размером 1,6 х 4,6 м и высотой 2,8 м, с общей массой 3 т. Эта конструкция установлена на систему сейсмоизоляции. В качестве сейсмоизоляции трёхэтажного фрагмента здания применялись резинометаллические опоры ОВ-31-М. Физическая модель трёхэтажного каркасного здания (рис. 35) включает следующие конструктивные элементы: железобетонные колонны квадратного сечения 10×10 см, ригели прямоугольного сечения 10×10 см, соединённые с монолитными плитами перекрытий толщиной 4 см, работающими по контурной схеме опирания. Основание модели представляет собой металлические швеллеры №20, соединённые с платформой. Арматура колонн приварена к закладным деталям (стальные пластины 10×10×1 см), которые фиксируются к швеллерам. Бетон всех элементов класса В7,5.

5.7. Результаты динамических испытаний модели фрагмента здания. Экспериментальные исследования трёхэтажной железобетонной каркасной модели при гармоническом нагружении позволили получить сравнительные данные по ускорениям и перемещениям для вариантов с сейсмоизоляцией и без неё. В ходе испытаний фиксировались амплитуды колебаний и горизонтальные смещения модели вдоль виброплатформы при варьировании массы эксцентров и частоты вращения ротора. Получены результаты экспериментальных исследований модели здания, установленной на виброплатформе, от действия гармонической нагрузки при различных значениях её частоты и амплитуды.

Анализ экспериментальных данных показывает, что пиковые значения горизонтальных ускорений в верхней части модели составляют примерно 2/3 от соответствующих параметров движения виброплатформы.

Таким образом, можно сделать вывод, что при сопоставлении результатов теоретических исследований с экспериментальными данными наблюдается их качественное совпадение.

Шестая глава «МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕОРИИ ПОДОБИЯ В СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ» посвящена вопросам моделирования на основе теории подобия. Реализация теории подобия рассмотрены на примерах различных систем. Глава состоит из 11 параграфов и заканчивается выводами.

6.1. Методы моделирования. Методы физического моделирования и принципы теории подобия находят широкое применение в различных сферах, в том числе при изучении поведения строительных конструкций и инженерных сооружений. Подобие означает возможность распространения результатов эксперимента с модели на оригинал. Теория подобия позволяет переносить результаты экспериментальных исследований, полученные на моделях, на реальные объекты.

Критерии подобия устанавливают правила для переноса результатов эксперимента с модели на реальный объект. Для определения безразмерных коэффициентов подобия используются следующие методы: 1) анализ дифференциальных уравнений, которые описывают исследуемый процесс (метод нормализации); 2) анализ размерностей параметров поставленной задачи.

В данной работе рассматриваем метод анализа дифференциальных уравнений, полученных на основе принципа Даламбера, которые описывают колебательные процессы в различных конструкциях.

Таким образом, система дифференциальных уравнений, преобразованная в безразмерную форму с учётом начальных и граничных условий, представляет собой математическое описание задачи как для натурального объекта, так и для модели.

6.2. Дифференциальные уравнения изгибных колебаний. Рассмотрим свободные и вынужденные колебания балки с распределённой массой (рис.38). Из условия равновесия элемента rs балки (рис.38, б), получим

$$\sum z = 0, \quad -Q + Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx - m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} dx - c \frac{\partial w}{\partial t} dx + q dx = 0, \quad (88)$$

$$\sum M_s = 0, \quad Q dx + M - M - \frac{\partial M}{\partial x} dx - q dx \frac{dx}{2} = 0. \quad (89)$$

Из зависимости между кривизной и прогибом (рис.38,а) следует, что $ds = \rho d\theta$, откуда при $ds \approx dx$ и $\theta \approx \text{tg} \theta \approx dw / dx$, получим

$$1 / \rho = d\theta / dx = d^2 w / dx^2. \quad (90)$$

Из деформации балки при изгибе следует равенство

$$1 / \rho = -M / EI, \quad (91)$$

Из (88), с учётом (89), где $Q = \partial M / \partial x$, получим

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - c \frac{\partial w}{\partial t} + q(x,t) = 0. \quad (92)$$

Приравнивая правые части (90) и (91) получим уравнение

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -\frac{M(x,t)}{EI}, \quad (93)$$

которое описывает линию прогибов балки. При совместном решении (92) и (93) определяются функции $w(x,t)$ и $M(x,t)$.

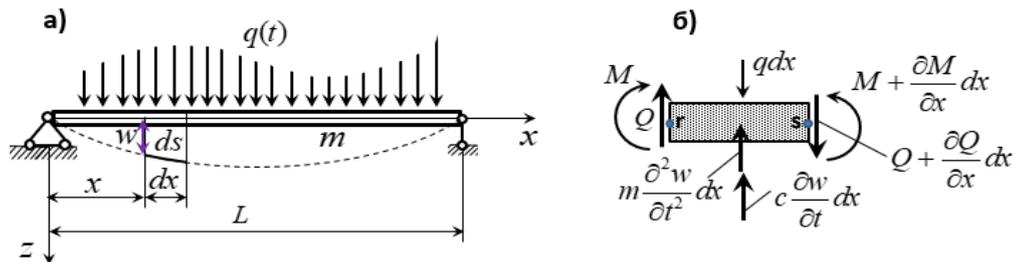


Рисунок 38. Линия прогибов изогнутой балки

При сейсмическом воздействии по оси z , уравнение (92) представляется в виде

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - c \frac{\partial w}{\partial t} = m \ddot{w}_0(t), \quad (94)$$

где $\ddot{w}_0(t)$ – заданное ускорение землетрясения.

Подставив (93) в (92), в случае призматического стержня ($EI = const$), получаем дифференциальное уравнение 4-го порядка относительно искомой функции $w(x,t)$

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} = q(x,t). \quad (95)$$

Из решения (94) определяется $w(x,t)$, а затем вычисляются изгибающий момент и поперечная сила

$$M(x,t) = -EI \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}, \quad Q(x,t) = \frac{\partial M(x,t)}{\partial x}. \quad (96)$$

Таким образом, для решения задачи поперечных колебаний балок можно использовать систему из двух уравнений второго порядка (92) и (93) или одно уравнение 4-го порядка (95), в зависимости от выбранного метода численного решения динамической задачи. Здесь будет рассмотрена система из двух уравнений второго порядка, для решения которой применяется метод последовательных аппроксимаций.

6.3. Методы преобразования дифференциальных уравнений. В теории подобия преобразование дифференциальных уравнений, а также соответствующих начальных и граничных условий к безразмерному виду может быть выполнено различными способами. Этот процесс преобразования также называют нормализацией физических уравнений. Исходя из равенства критериев подобия получим

$$\frac{L_m^2}{M_{0,m}} \frac{m_{0,m} w_{0,m}}{T_{1,m}^2} = \frac{L_n^2}{M_{0,n}} \frac{m_{0,n} w_{0,n}}{T_{1,n}^2}, \quad \rightarrow \quad \frac{w_{0,n}}{M_{0,n}} = \frac{w_{0,m}}{M_{0,m}} \frac{T_{1,n}^2}{T_{1,m}^2} \frac{m_{0,m}}{m_{0,n}} \frac{L_m^2}{L_n^2} = k^2 \frac{w_{0,m}}{M_{0,m}}, \quad (97)$$

$$\frac{L_m^2}{w_{0,m}} \frac{M_{0,m}}{EI_{0,m}} = \frac{L_n^2}{w_{0,n}} \frac{M_{0,n}}{EI_{0,n}}, \quad \rightarrow \quad \frac{M_{0,n}}{w_{0,n}} = \frac{M_{0,m}}{w_{0,m}} \frac{EI_{0,n}}{EI_{0,m}} \frac{L_m^2}{L_n^2} = \frac{1}{k^2} \frac{M_{0,m}}{w_{0,m}}, \quad (98)$$

$$\frac{L_m^2 c_{0,m}}{M_{0,m}} \frac{w_{0,m}}{T_{1,m}} = \frac{L_n^2 c_{0,n}}{M_{0,n}} \frac{w_{0,n}}{T_{1,n}}, \quad \rightarrow \quad c_{0,n} = c_{0,m} \frac{L_m^2}{L_n^2} \frac{w_{0,m}}{w_{0,n}} \frac{M_{0,n}}{M_{0,m}} \frac{T_{1,n}}{T_{1,m}}, \quad (99)$$

Из равенства критериев получим

$$\frac{T_{1,n} S_{0,n}}{w_{0,n} m_{0,n}} = \frac{T_{1,m} S_{0,m}}{w_{0,m} m_{0,m}} \quad \rightarrow \quad S_{0,n} = S_{0,m} \frac{T_{1,m}}{T_{1,n}} \frac{w_{0,n}}{w_{0,m}} \frac{m_{0,n}}{m_{0,m}}.$$

Таким образом, равенства безразмерных коэффициентов подобия позволяют получить параметры природы, которые затем могут быть использованы для расчёта исследуемого объекта, а также для сравнения с экспериментальными данными.

6.4. Моделирование статической задачи балки. Рассмотрим изгиб простой балки от действия сосредоточенной силы (рис.39). Дифференциальное уравнение изгиба балки представляется в виде

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -\frac{M(x)}{EI}, \quad (100)$$

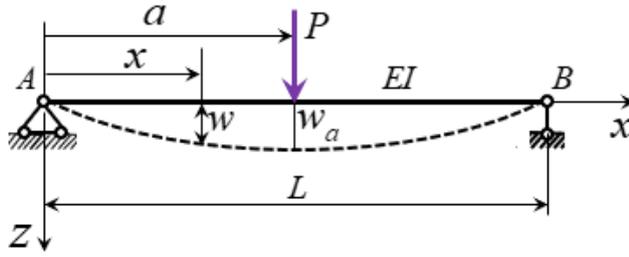


Рисунок 39. Изогнутая ось балки

Уравнение (100) с учётом безразмерные величины приобретает вид

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{w_0}{l_0^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2}, \quad \frac{M}{EI} = \frac{M_0}{E_0 I_0} \frac{\bar{M}}{\bar{EI}},$$

$$\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2} = -\pi \frac{\bar{M}}{\bar{EI}}, \quad \pi = \frac{M_0 l_0^2}{w_0 E_0 I_0}. \quad (101)$$

Безразмерный параметр подобия π представляется в виде

$$\pi = \frac{PL^3}{w_a EI} = c, \quad \Rightarrow \quad w_a = \frac{1}{c} \frac{PL^3}{EI}. \quad (102)$$

Из уравнения (102) видно, что зависимость максимального прогиба от других параметров задачи была получена без решения уравнения (88), с учётом постоянного коэффициента « c ».

Следует подчеркнуть, что безразмерное дифференциальное уравнение (101) имеет одинаковый вид как для модели, так и для природы. Следовательно, можно записать

$$\pi_m = \pi_n, \quad \rightarrow \quad \left(\frac{PL^3}{w_a EI} \right)_m = \left(\frac{PL^3}{w_a EI} \right)_n \quad \rightarrow \quad \frac{w_{a,m}}{w_{a,n}} = \frac{(P_m / P_n)(L_m^3 / L_n^3)}{(E_m / E_n)(I_m / I_n)}. \quad (103)$$

6.5. Моделирование динамической задачи балки. Рассмотрим свободных колебаний простой балки прямоугольного поперечного сечения с равномерно распределённой массой m (рис.40). В начальный момент времени середина пролёта балки получает начальное отклонение величиной δ , а затем балка совершает свободные колебания.

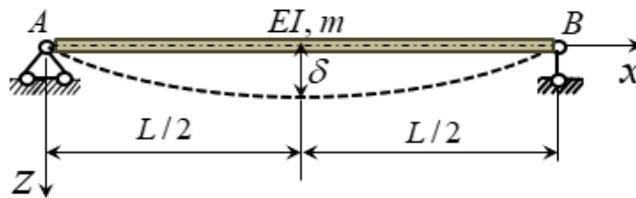


Рисунок 40. Балка с распределённой массой

Свободные колебания балки без учёта затухания описывается дифференциальным уравнением четвёртого порядка

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \quad (104)$$

Уравнение (104) с учётом начальных условий приобретает вид

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = EI \frac{\delta}{L^4} \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^4}, \quad m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = m \frac{\delta}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^4} + \pi_1 \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial t^2} = 0, \quad \pi_1 = \frac{mL^4}{T_1^2 EI}. \quad (105)$$

Исходя из принципа подобия модели и природы, чьи свободные колебания описываются уравнением (105), можно записать

$$\pi_{1,m} = \pi_{1,n}, \quad \rightarrow \left(\frac{L^2}{crT_1} \right)_m = \left(\frac{L^2}{crT_1} \right)_n, \quad T_{1,n} = T_{1,m} \frac{L_n^2}{L_m^2} \frac{c_m}{c_n} \frac{r_m}{r_n}. \quad (106)$$

Из полученной формулы (106) следует, что если из эксперимента на модели мы получили данные о свободных колебаниях с периодом $T_{1,m}$, то можно прогнозировать основной период свободных колебаний балки в натуре без решения дифференциального уравнения.

6.6. Вынужденные колебания. Рассмотрим вынужденных колебаний балки при действии вибрационной нагрузки. На балку с равномерно распределённой массой $m = \gamma A / g$ действует сила $P(t) = P \sin \theta t$ (рис.41). В случае балки с шарнирными опорами (рис.41), нормальные формы колебания $x_j(x)$ определяются синусоидами и ряд.

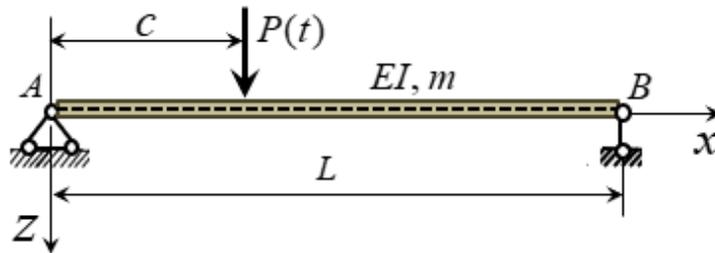


Рисунок 41. Действие вибрационной нагрузки

В этом случае интенсивность сил инерции, распределённых по длине колеблющейся балки, с учётом формы колебаний, записывается так

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = m \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\partial^2 z_j}{\partial t^2} \sin \frac{j\pi x}{L},$$

$$\pi_1 = \frac{T_1^2 \theta^4 \pi^4 EI}{mL^4}, \quad \pi_2 = \frac{2T_1^2 P_0}{mLz_0}, \quad \pi_3 = \theta T_1. \quad (107)$$

Безразмерные параметры подобия (107) позволяют провести сравнительный анализ между моделью и натурой.

6.7. Моделирование балки на вибрационную нагрузку. Рассматривается метод определения частот собственных колебаний конструкций с использованием вибратора (рис. 42).

Дифференциальное уравнение движения системы с учётом затухания имеет вид

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} + kw = P \sin \theta t, \quad (108)$$

$$P = 2m_0 r \theta^2, \quad k = 48EI / L^3.$$

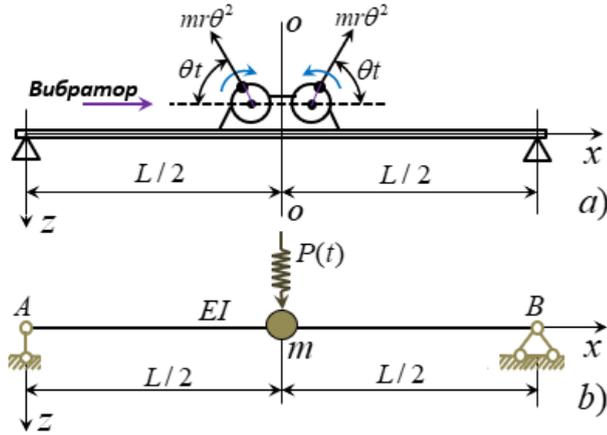


Рисунок 42. Вибрационное воздействие на балку

Безразмерное уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{t}} + \pi_2 \bar{w} = \pi_3 \sin(\pi_4 \bar{\theta} \bar{t}), \quad (109)$$

$$\pi_1 = \frac{cT}{m}, \quad \pi_2 = \frac{kT^2}{m}, \quad \pi_3 = \frac{PT^2}{mw_{st}}, \quad \pi_4 = \omega T. \quad (110)$$

Безразмерное уравнение (109) описывает динамический процесс как для модели, так и для природы. Следовательно, коэффициенты подобия (110) для модели и природы должны быть одинаковыми.

6.8. Моделирование здания. В качестве объекта исследования в данной работе рассматривается физическая модель трёхэтажного каркасного здания без сейсмоизоляции.

Система со многими степенями свободы.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{W}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{W}} + \mathbf{K}\mathbf{W} = \mathbf{P} \sin \theta t, \quad (111)$$

где $\ddot{\mathbf{W}}, \dot{\mathbf{W}}, \mathbf{W}, \mathbf{P}$ – векторы ускорений, скоростей, перемещений и нагрузки.

$\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ – матрицы масс, затухания и жёсткости

Уравнение (111) в матричной форме допускает представление в безразмерных величинах

$$\bar{\mathbf{M}} \ddot{\bar{\mathbf{Z}}} + \bar{\mathbf{C}} \dot{\bar{\mathbf{Z}}} + \bar{\mathbf{K}} \bar{\mathbf{Z}} = \bar{\mathbf{P}} \sin \theta \bar{t}$$

Для трёхмассовой системы (рис.43) с применением безразмерных параметров система дифференциальных уравнений (111) принимает следующую форму

$$\begin{aligned} \frac{m_0 w_0}{T_1^2} \bar{m}_1 \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 w_0}{T_1} \bar{c}_{11} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} + k_0 w_0 \bar{k}_{11} \bar{w}_1 + k_0 w_0 \bar{k}_{12} \bar{w}_2 &= 0, \\ \frac{m_0 w_0}{T_1^2} \bar{m}_2 \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 w_0}{T_1} \bar{c}_{22} \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \bar{t}} + k_0 w_0 \bar{k}_{21} \bar{w}_1 + k_0 w_0 \bar{k}_{22} \bar{w}_2 + k_0 w_0 \bar{k}_{23} \bar{w}_3 &= 0, \\ \frac{m_0 w_0}{T_1^2} \bar{m}_3 \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 w_0}{T_1} \bar{c}_{33} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + k_0 w_0 \bar{k}_{32} \bar{w}_2 + k_0 w_0 \bar{k}_{33} \bar{w}_3 &= P_0 \bar{P}_3 \sin \theta_0 \bar{\theta} T_1 \bar{t}, \end{aligned} \quad (112)$$

где $\bar{t} = t/T_1$, $\bar{w}_i = w_i/w_0$, $\bar{c}_{ii} = c_{ii}/c_0$, $\bar{k}_{ij} = k_{ij}/k_0$, $\bar{P}_3 = P_3/P_0$.

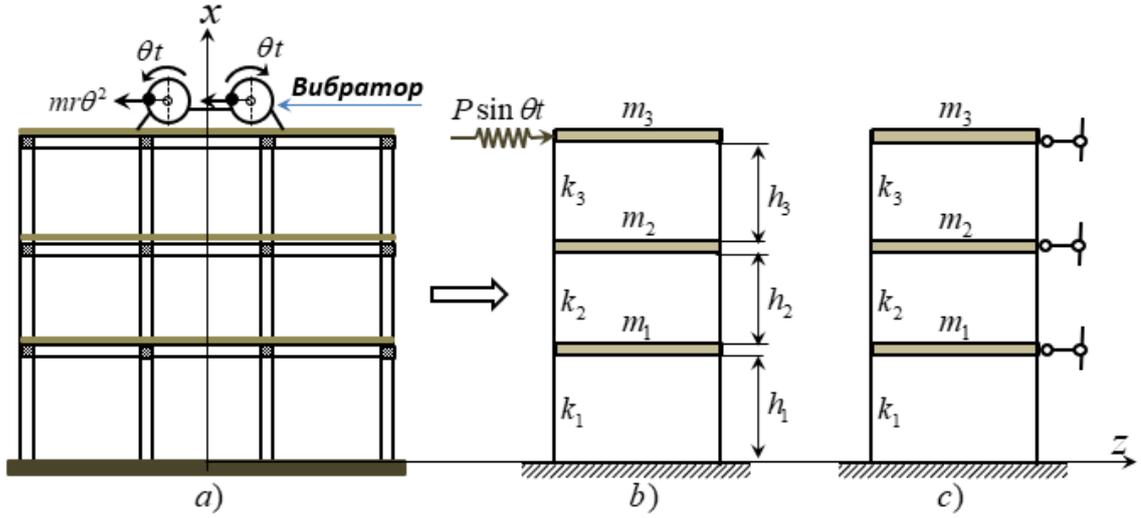


Рисунок 43. Моделирование здания от действия гармонической нагрузки

Здесь предполагается, что характерные параметры $t_0 = T_1, w_0, c_0, k_0, P_0$ имеют наибольшие значения для соответствующих величин. Поделив все члены системы уравнений (112) на $m_0 w_0 / T_1^2$, получаем

$$\begin{aligned}
 \bar{m}_1 \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \bar{t}^2} + \frac{T_1 c_0}{m_0} \bar{c}_{11} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{11} \bar{w}_1 + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{12} \bar{w}_2 &= 0, \\
 \bar{m}_2 \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \bar{t}^2} + \frac{T_1 c_0}{m_0} \bar{c}_{22} \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \bar{t}} + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{21} \bar{w}_1 + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{22} \bar{w}_2 + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{23} \bar{w}_3 &= 0, \\
 \bar{m}_3 \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \bar{t}^2} + \frac{T_1 c_0}{m_0} \bar{c}_{33} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{32} \bar{w}_2 + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{33} \bar{w}_3 &= \frac{T_1^2 P_0}{m_0 w_0} \bar{P}_3 \sin(\theta_0 T_1 \bar{t}). \\
 \bar{m}_1 \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{11} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{11} \bar{w}_1 + \bar{k}_{12} \bar{w}_2) &= 0, \\
 \bar{m}_2 \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{22} \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{21} \bar{w}_1 + \bar{k}_{22} \bar{w}_2 + \bar{k}_{23} \bar{w}_3) &= 0, \\
 \bar{m}_3 \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{33} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{32} \bar{w}_2 + \bar{k}_{33} \bar{w}_3) &= \pi_3 \bar{P}_3 \sin(\pi_4 \bar{t}),
 \end{aligned} \tag{113}$$

где параметры подобия записываются в виде

$$\pi_1 = \frac{c_0 T_1}{m_0}, \quad \pi_2 = \frac{k_0 T_1^2}{m_0}, \quad \pi_3 = \frac{T_1^2 P_0}{m_0 w_0}, \quad \pi_4 = \theta_0 T_1. \tag{114}$$

Можно заметить, что параметры подобия (114) совпадают с параметрами подобия для системы с одной степенью свободы.

6.9. Моделирование сейсмоизолированного здания. Для модели, представленной на рис. 44, а, которая включает суперструктуру, сейсмоизоляцию и субструктуру, в дополнение к системе уравнений (111), записывается уравнение, описывающее движение массы, связанной с сейсмоизоляцией.

$$m_b \ddot{w}_b + f_b - k_1 w_1 - c_1 \dot{w}_1 = 0, \tag{115}$$

Следовательно, здесь мы имеем систему с четырьмя степенями свободы.

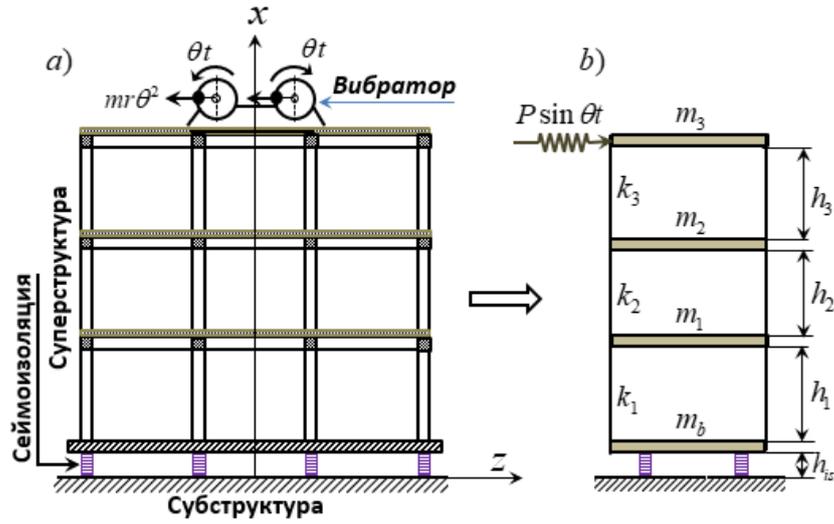


Рисунок 44. Моделирование сейсмоизолированного здания

Согласно Uniform Building Code нелинейный закон изменения восстанавливающей силы в (115) может быть заменён эквивалентной линейной модели на основе эффективной упругой жёсткости и эффективного вязкого затухания

$$f_b = k_{eff} w_b + c_{eff} \dot{w}_b, \quad (116)$$

Уравнение (115) с учётом (116) представляется в виде

$$m_b \ddot{w}_b + k_{eff} w_b + c_{eff} \dot{w}_b - k_1 w_1 - c_1 \dot{w}_1 = 0, \quad (117)$$

Введём дополнительные характерные величины k_{is} , c_{is} , соответствующие сейсмоизоляции, и уравнение (117) представим в безразмерном виде

$$\begin{aligned} \frac{m_0 \bar{m}_b w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_b}{\partial \bar{t}^2} + k_{is} \bar{k}_{eff} w_0 \bar{w}_b + \frac{c_{is} \bar{c}_{eff} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_b}{\partial \bar{t}} - k_0 \bar{k}_1 w_0 \bar{w}_1 - \frac{c_0 \bar{c}_1 w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} = 0, \\ \bar{m}_b \frac{\partial^2 \bar{w}_b}{\partial \bar{t}^2} + \frac{T_1^2 k_{is}}{m_0} \bar{k}_{eff} \bar{w}_b + \frac{T_1 c_{is}}{m_0} \bar{c}_{eff} \frac{\partial \bar{w}_b}{\partial \bar{t}} - \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_1 \bar{w}_1 - \frac{T_1 c_0}{m_0} \bar{c}_1 \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} = 0, \\ \bar{m}_b \frac{\partial^2 \bar{w}_b}{\partial \bar{t}^2} + \pi_{2b} \bar{k}_{eff} \bar{w}_b + \pi_{1b} \bar{c}_{eff} \frac{\partial \bar{w}_b}{\partial \bar{t}} - \pi_2 \bar{k}_1 \bar{w}_1 - \pi_1 \bar{c}_1 \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} = 0, \end{aligned} \quad (118)$$

$$\pi_{2b} = \frac{T_1^2 k_{is}}{m_0}, \quad \pi_{1b} = \frac{T_1 c_{is}}{m_0}, \quad \pi_2 = \frac{T_1^2 k_0}{m_0}, \quad \pi_1 = \frac{T_1 c_0}{m_0}. \quad (119)$$

Как следует из уравнения (118), в модели с сейсмоизоляцией, помимо параметров подобия (114), появляются дополнительные параметры π_{1b} и π_{2b} . Если в результате эксперимента на модели с сейсмоизоляцией были получены записи свободных колебаний, то, используя π_{1b} или π_{2b} в зависимости от заданных характеристик, мы можем определить период свободных колебаний для натуре.

6.10. Моделирование плит. Рассматривается колебания тонкой упругой прямоугольной плиты. Дифференциальное уравнение изгиба плиты, написанное в рамках известных допущений, имеет вид

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q^*}{D}; \quad (120)$$

при поперечных колебаниях

$$q^*(x, y, t) = q(x, y, t) - \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \quad (121)$$

и уравнения (120), с учётом (121), представим в безразмерном виде

$$\begin{aligned} \frac{w_0}{a^4} \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^4} + 2 \frac{w_0}{a^4} \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{w_0}{a^4} \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial y^4} + \mu_0 \frac{w_0 \bar{\mu}}{T_1^2 D_0 \bar{D}} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial t^2} &= \frac{q_0 \bar{q}}{D_0 \bar{D}}, \\ \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial y^4} + \pi_1 \frac{\bar{\mu}}{D} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial t^2} &= \pi_2 \frac{\bar{q}}{D}, \\ \pi_1 &= \frac{\mu_0 a^4}{D_0 T_{11}^2}, \quad \pi_2 = \frac{q_0 a^4}{D_0 w_0}, \quad D_0 = \frac{Eh}{12(1-\nu^2)}, \quad T_{11}^2 = \frac{4a^4 b^4}{\pi^2(a^2 + b^2) D} \frac{\mu}{D}. \end{aligned} \quad (122)$$

6.11. Модель, установленная на виброплатформе. Рассматривается сейсмоизолированная модель, установленная на виброплатформе (рис. 45, а). Расчётная модель этой системы представлена на рис. 45, б. Это создаёт систему с пятью степенями свободы. Система дифференциальных уравнений, описывающая движение системы, может быть представлена в соответствующем виде, учитывая динамические характеристики виброплатформы, сейсмоизоляции и других компонентов модели.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{w}_1 + c_{11} \dot{w}_1 + c_{12} \dot{w}_2 + k_{11} w_1 + k_{12} w_2 &= P \sin \theta t, \\ m_2 \ddot{w}_2 + c_{21} \dot{w}_1 + c_{22} \dot{w}_2 + c_{23} \dot{w}_3 + k_{21} w_1 + k_{22} w_2 + k_{23} w_3 &= 0, \\ m_3 \ddot{w}_3 + c_{32} \dot{w}_2 + c_{33} \dot{w}_3 + c_{34} \dot{w}_4 + k_{32} w_2 + k_{33} w_3 + k_{34} w_4 &= 0, \\ m_4 \ddot{w}_4 + c_{43} \dot{w}_3 + c_{44} \dot{w}_4 + c_{45} \dot{w}_5 + k_{43} w_3 + k_{44} w_4 + k_{45} w_5 &= 0, \\ m_5 \ddot{w}_5 + c_{54} \dot{w}_4 + c_{55} \dot{w}_5 + k_{54} w_4 + k_{55} w_5 &= 0. \end{aligned} \quad (123)$$

Коэффициенты затухания и жёсткости приобретают следующие значения

$$\begin{aligned} c_{11} &= c_1, \quad c_{12} = -c_2 = -c_{eff}, \quad k_{11} = k_1 + k_2, \quad k_{12} = -k_2 = -k_{eff}, \\ c_{21} &= c_{12}, \quad c_{22} = c_2 + c_3, \quad c_{23} = -c_3, \quad k_{21} = k_{12}, \quad k_{22} = k_2 + k_3, \quad k_{23} = -k_3, \\ c_{32} &= -c_3, \quad c_{33} = c_3 + c_4, \quad c_{34} = -c_4, \quad k_{32} = -k_3, \quad k_{33} = k_3 + k_4, \quad k_{34} = -k_4, \\ c_{43} &= -c_4, \quad c_{44} = c_4 + c_5, \quad c_{45} = -c_5, \quad k_{43} = -k_4, \quad k_{44} = k_4 + k_5, \quad k_{45} = -k_5, \\ c_{54} &= -c_5, \quad c_{55} = c_5, \quad k_{54} = -k_5, \quad k_{55} = k_5. \end{aligned} \quad (124)$$

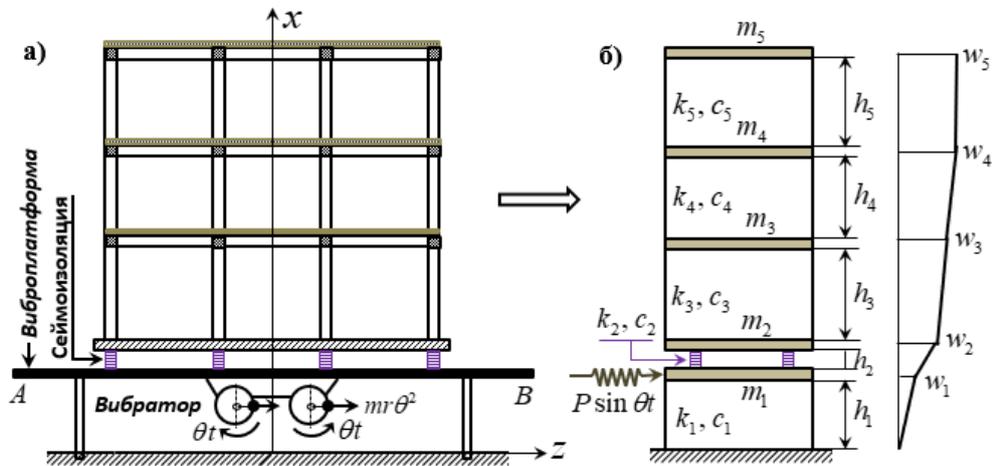


Рисунок 45. Система «виброплатформа-изоляция-модель»

$$\begin{aligned}
& \frac{m_0 \bar{m}_1 w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 \bar{c}_{11} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} + k_0 \bar{k}_{11} w_0 \bar{w}_1 + k_0 \bar{k}_{12} w_0 \bar{w}_2 = P_0 \bar{P} \sin \theta_0 \bar{\theta} T_1 \bar{t}, \\
& \frac{m_0 \bar{m}_2 w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 \bar{c}_{22} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \bar{t}} + k_0 \bar{k}_{21} w_0 \bar{w}_1 + k_0 \bar{k}_{22} w_0 \bar{w}_2 + k_0 \bar{k}_{23} w_0 \bar{w}_3 = 0, \\
& \frac{m_0 \bar{m}_3 w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 \bar{c}_{33} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + k_0 \bar{k}_{32} w_0 \bar{w}_2 + k_0 \bar{k}_{33} w_0 \bar{w}_3 + k_0 \bar{k}_{34} w_0 \bar{w}_4 = 0, \\
& \frac{m_0 \bar{m}_4 w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_4}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 \bar{c}_{44} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_4}{\partial \bar{t}} + k_0 \bar{k}_{43} w_0 \bar{w}_3 + k_0 \bar{k}_{44} w_0 \bar{w}_4 + k_0 \bar{k}_{45} w_0 \bar{w}_5 = 0, \\
& \frac{m_0 \bar{m}_5 w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_5}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 \bar{c}_{55} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_5}{\partial \bar{t}} + k_0 \bar{k}_{54} w_0 \bar{w}_4 + k_0 \bar{k}_{55} w_0 \bar{w}_5 = 0, \\
& \bar{m}_1 \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{11} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{11} \bar{w}_1 + \bar{k}_{12} \bar{w}_2) = \pi_3 \bar{P}_3 \sin(\pi_4 \bar{\theta} \bar{t}), \\
& \bar{m}_2 \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{22} \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{21} \bar{w}_1 + \bar{k}_{22} \bar{w}_2 + \bar{k}_{23} \bar{w}_3) = 0, \\
& \bar{m}_3 \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{33} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{32} \bar{w}_2 + \bar{k}_{33} \bar{w}_3 + \bar{k}_{34} \bar{w}_4) = 0, \\
& \bar{m}_4 \frac{\partial^2 \bar{w}_4}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{44} \frac{\partial \bar{w}_4}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{43} \bar{w}_3 + \bar{k}_{44} \bar{w}_4 + \bar{k}_{45} \bar{w}_5) = 0, \\
& \bar{m}_5 \frac{\partial^2 \bar{w}_5}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{55} \frac{\partial \bar{w}_5}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{54} \bar{w}_4 + \bar{k}_{55} \bar{w}_5) = 0, \\
& \bar{t} = t/T_1, \quad \bar{w}_i = w_i/w_0, \quad \bar{m}_i = m_i/m_0, \quad \bar{k}_{ij} = k_{ij}/k_0, \quad \bar{c}_{ii} = c_{ii}/c_0.
\end{aligned} \tag{125}$$

Параметры подобия π_i имеют вид (114) и (119). Таким образом, с увеличением степеней свободы, число параметров подобия не изменяется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена моделированию динамических задач при расчёте сейсмоизолированных зданий методом сосредоточенных деформаций, что является одним из актуальных направлений современной строительной механики и теории сейсмостойкости сооружений. В условиях повышенной сейсмической опасности особую значимость приобретает разработка эффективных методов расчёта, позволяющих достоверно оценивать напряжённо-деформированное состояние зданий и сооружений с учётом реальных динамических воздействий.

В работе разработана математическая модель сейсмоизолированного здания, основанная на представлении несущих элементов в виде системы сосредоточенных масс, жёсткостей и демпфирующих связей, реализованной в рамках метода сосредоточенных деформаций. Сформулированы уравнения движения сооружения при сейсмическом воздействии, учитывающие инерционные, упругие и демпфирующие характеристики системы, а также нелинейные свойства элементов сейсмоизоляции.

Реализованы численные алгоритмы решения динамических уравнений движения, основанные на современных методах интегрирования по времени. Выполнен спектральный и прямой динамический анализ отклика сейсмоизолированных зданий при различных типах сейсмических воздействий. Проведено сравнение результатов расчётов с традиционными методами проектирования, что позволило оценить эффективность применения сейсмоизоляции.

На основе выполненных численных экспериментов установлено, что применение систем сейсмоизоляции приводит к существенному снижению сейсмических усилий и ускорений, а также к повышению надёжности и эксплуатационной безопасности зданий. Полученные результаты могут быть использованы при вариантном проектировании и расчёте сейсмостойких зданий и сооружений в сейсмоопасных районах.

Работа имеет научную и практическую значимость и может быть использована в научно-исследовательской деятельности, а также при подготовке специалистов в области строительства и сейсмостойкого проектирования. Основные научные результаты диссертации:

1. Разработаны математическая модель и алгоритм обеспечивают комплексный анализ динамического поведения сейсмоизолированных зданий при различных типах нагрузок, включая сейсмические воздействия, задаваемые акселерограммами реальных землетрясений [1-А], [2-А], [7-А], [9-А], [10-А], [13-А], [15-А], [16-А], [17-А], [18-А], [19-А], [22-А], [26-А], [37-А], [47-А], [48-А], [50-А], [51-А], [60-А], [61-А], [64-А], [68-А], [72-А], [73-А].

2. Применение фрикционно-маятниковых опор в качестве сейсмоизолирующей системы обеспечивает значительное уменьшение внутренних силовых факторов в конструктивных элементах по сравнению с традиционными несущими системами без сейсмозащиты [1-А], [2-А], [15-А], [16-А], [18-А], [19-А], [20-А], [23-А], [27-А], [34-А], [35-А], [39-А], [42-А], [47-А], [48-А], [61-А], [75-А], [79-А].

3. Разработанный алгоритм и компьютерная программа позволяют проводить численные эксперименты для анализа динамических характеристик зданий различных конструктивных схем с сейсмоизолирующим поясом при различных внешних воздействиях. Предложенная методика предоставляет возможность исследовать физическую модель фрагмента каркасного здания [4-А], [5-А], [8-А], [11-А], [14-А], [21-А], [28-А], [32-А], [33-А], [43-А], [44-А], [53-А], [63-А], [66-А], [83-А].

4. Разработаны математическая модель и компьютерная программа для исследования НДС модели сейсмоизолированного здания с учётом нелинейной работе резинометаллических опор. Показано, что применение сейсмоизоляции существенно снижает ускорение и относительный межэтажный сдвиг, однако при этом увеличивает абсолютное перемещение здания по сравнению с аналогичным объектом без сейсмоизоляции [1-А], [22-А], [23-А], [26-А], [27-А].

A), [29-A], [32-A], [33-A], [38-A], [42-A], [47-A], [50-A], [55-A], [56-A], [68-A], [72-A], [74-A], [75-A], [82-A].

5. На основе метода последовательных аппроксимаций разработан вычислительный алгоритм для анализа динамической задачи с учётом сухого трения, позволивший исследовать влияние фрикционных сил на поведение конструкции. Исследовано влияние силы трения на динамическое поведение объекта [1-A], [6-A], [27-A], [35-A], [36-A], [50-A], [51-A], [55-A].

6. Метод сосредоточенных деформаций успешно адаптирован для решения динамических задач расчёта сейсмоизолированных зданий при сейсмических воздействиях. Разработанный программно-алгоритмический комплекс обеспечивает комплексное исследование как свободных, так и вынужденных колебаний защищённых конструкций при различных видах динамических нагрузок. Полученные результаты численного моделирования достоверно подтверждают высокую эффективность резинометаллических сейсмоизолирующих опор [1-A], [11-A], [12-A], [13-A], [15-A], [37-A], [39-A], [40-A], [41-A], [47-A], [53-A], [64-A], [65-A], [77-A], [78-A], [80-A], [81-A].

7. Предлагается динамическая расчётная модель многоэтажного каркасного здания с системой сейсмоизоляции, учитывающая продольных, поступательных, изгибных и крутильных перемещений масс методом сосредоточенных деформаций. Решение задачи о колебаниях сейсмоизолированного высотного здания, полученное на основе МСД, выявило возникновение высокочастотных горизонтальных колебаний при учёте крутильных воздействий на основании. Применение данного подхода позволяет проводить комплексный анализ динамического поведения сооружений при сложных многокомпонентных сейсмических воздействиях [1-A], [9-A], [10-A], [12-A], [19-A], [15-A], [22-A], [26-A], [30-A], [31-A], [36-A], [39-A], [42-A], [77-A], [78-A], [81-A].

8. Экономическая эффективность систем сейсмоизоляции становится особенно значительной при землетрясениях, превосходящих расчётные параметры, поскольку они существенно снижают повреждения несущих конструкций и дорогостоящего оборудования, что приводит к значительному уменьшению затрат на последующие восстановительные и усиливающие мероприятия [1-A], [24-A], [32-A], [38-A], [57-A], [58-A].

9. Применяя теорию подобия, были получены результаты моделирования плит и фрагмента многоэтажного здания как с учётом, так и без учёта сейсмоизоляции. Определены коэффициенты подобия, которые позволяют перенести данные с модели на оригинал объекта [1-A], [3-A], [6-A], [16-A], [18-A], [22-A], [34-A], [54-A].

10. Создание эффективных сейсмостойких конструкций для сложных инженерно-геологических условий Таджикистана требует усовершенствования современных методов расчёта на сейсмические воздействия. В условиях г. Душанбе наиболее оптимальным решением доказано применение резинометаллических опор в качестве эффективной системы сейсмозащиты [1-A], [3-A], [6-A], [16-A], [20-A], [25-A], [49-A], [76-A], [82-A], [84-A].

Рекомендации по практическому использованию результатов исследования

Предложенные методики расчёта и разработанные компьютерные программы позволяют исследовать динамическое поведение многоэтажных зданий с учётом сейсмоизоляции и без неё при различных воздействиях, включая сейсмические. Эти материалы диссертации могут быть использованы конструкторами - расчётчиками проектных организаций при разработке проектов многоэтажных зданий различных конструктивных систем с учётом сейсмоизоляции и без неё, а также в научно-исследовательских работах.

Разработанный программный комплекс, реализующий метод сосредоточенных деформаций и прямой динамический анализ, внедрён в практику проектирования ОАО «НИПИИ САНИ-ИОСП», ГУП НИПИ «Душанбешахрсоз». для выполнения сравнительных расчётов каркасных зданий на сейсмические воздействия без учёта сейсмоизоляции. Перспективное применение данной методики позволит оптимизировать проектные решения многоэтажных зданий по параметрам прочности и жёсткости, что обеспечит снижение стоимости строительства и сокращение сроков выполнения монтажных работ.

Разработанные компьютерные программы в дальнейшем будут использованы при расчёте и проектировании многоэтажных зданий различных конструктивных систем, включая здания, выполненные из пластинчатых систем. Научные результаты диссертационного исследования внедрены в образовательный процесс Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими при подготовке магистров и докторантов PhD, а также применяются при экспертной оценке рабочих проектов многоэтажных каркасных зданий [приложение №1 в диссертации].

Получены авторские свидетельства на восемь, разработанные компьютерных программ и один малый патент № TJ 1453 от 04 декабря 2023 года [приложение №2 в диссертации]:

1. Программа численного моделирования сейсмоизолированного здания при многокомпонентном воздействии методом сосредоточенных деформаций;
2. Программа численного моделирования зданий с резинометаллическими опорами;
3. Программа численного решения динамической задачи сейсмоизолированного здания со скользящим поясом;
4. Программа численного решения статических и динамических задач балок методом сосредоточенных деформаций;
5. Программа расчета многоэтажных зданий на сейсмические воздействия методом сосредоточенных деформаций;
6. Программа расчёта многоэтажных зданий на сейсмические воздействия с учётом динамического гасителя;
7. Программа расчета балок на упругом основании методом сосредоточенных деформаций.
8. Программа численного решения системы «Платформа – модель здания» при действии вибрационной нагрузки
9. Малый патент № TJ 1453 от 04 декабря 2023 года на изобретение стенда для моделирования сейсмического воздействия на физической модели здание и сооружение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Айзенберг, Я.М. Сейсмоизоляция. Теория и реальное поведение при землетрясениях: сейсмоизоляция зданий и сооружений [Текст] / Я.М. Айзенберг // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2006. - №4. - С. 28 -33.
- [2]. Акимов, П.А. Дискретно-континуальные методы расчета строительных конструкций: дис. докт. техн. наук : 05.23.17 / П.А.Акимов; Москов. гос. стр. ун-т. - Москва, 2005. - 460 с.
- [3]. Батэ, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст] / К. Батэ, Р. Вильсон. - М. Стройиздат. 1982. – 447с.
- [4]. Болотин, В.В. Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений [Текст] / В.В.Болотин. - М.: Стройиздат. 1982.
- [5]. Болотин, В.В. Применение статистических методов для оценки прочности конструкций при сейсмических воздействиях [Текст] /В.В. Болотин // Инженерный сборник, т.27., М., Изд-во АН СССР, 1960. - С.55-65.
- [6]. Власов, В.З. Балки, плиты, оболочки на упругом основании [Текст] / В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев // М.: Физматгиз, 1966.
- [7]. Габбасов, Р.Ф. Численное построение разрывных решений задач строительной механики [Текст] / Р.Ф. Габбасов, А.Р. Габбасов, В.В. Филатов. - М.: Издательства АСВ, 2008. - 277с.
- [8]. Гольденблат, И.И. Расчёт конструкций на действие сейсмических и импульсивных сил [Текст] / И.И. Гольденблат, Н.А. Николаенко. – М.: Госстройиздат. 1961. – 320 с.
- [9]. Горбунов-Посадов, М.И. Расчёт конструкций на упругом основании [Текст] / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин. - М.: Стройиздат, 1984. - 679с.
- [10]. Додонов, М.И. Развитие и применение метода сосредоточенных деформаций к расчёту проёмных диафрагм многоэтажных зданий [Текст] / М.И. Додонов // Строительная механика и расчёт сооружений, 1984. - № 6. - С. 65 - 69.
- [11]. Дукарт, А.В. Задачи теории ударных гасителей колебаний [Текст] / А.В. Дукарт. - М.: АСВ, 2006. - 205 с.
- [12]. Дюкина, Н.С. Численное моделирование взаимодействия заглубленных сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях [Текст]: - дисс. на соиск. учен. степ. кан. физ. мат наук/ Н.С. Дюкина. - Нижний Новгород, 2009. - 118с.
- [13]. Жунусов, Т.Ж. Исследования каркасного здания на сейсмоизолирующих опорах [Текст] / Т.Ж. Жунусов, Ю.Г. Шахнович, И.Г. Горовиц, А.Н. Королёв. – Бетон и железобетон, 1985. – №7. – С. 42 – 43.
- [14]. Каландарбеков, И. Развитие метода сосредоточенных деформаций применительно к расчётам конструкций с учётом податливости соединений [Текст]: дисс. докт. техн. наук/ И. Каландарбеков. - М., 2009. - 425 с.
- [15]. Каландарбеков, И.К. Сравнительный анализ различных типов сейсмоизоляции в многоэтажных зданиях [Текст] / И.К. Каландарбеков, Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков // Известия АН РТ. Отд. физ - мат., хим., геолог. и техн. наук, 2016. - №4 (165). - С. 58 – 64.
- [16]. Каландарбеков, И. Исследование влияния сухого трения в здании со скользящим поясом [Текст]/ И. Каландарбеков, Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков М.Б. Марамов // Научно-технический журнал Машиноведение - Бишкек, Республика Кыргызистан, 2022. - С. 93- 104.
- [17]. Килимник, Л.Ш. Анализ работы зданий со скользящим поясом с использованием многомассовой расчётной модели [Текст] / Л.Ш. Килимник, Л.Л. Солдатова, Л.И. Ляхина //Строительная механика и расчёт сооружений, 1986. - №6. - С. 69 -73.
- [18]. Киселев, Ф.Б. Численное моделирование в задачах механики грунтов [Текст]: дисс. на соиск. учён. степени к.ф.-м.н. / Ф.Б. Киселев. - Москва. 2006.-135с
- [19]. Клаф, Р. Динамика сооружений [Текст] / Р. Клаф, Дж. Пензиен. - М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.

- [20]. Коренев, Б.Г. Динамический расчёт сооружений на специальные воздействия [Текст] / Б.Г. Коренев И.М. Рабинович. - М.: Стройиздат, 1981. – 232 с
- [21]. Коренев, Б.Г. Динамические гасители колебаний. Теория и технические приложения [Текст] / Б.Г. Коренев, Л.М. Резников. - М.: Наука, 1988. – 304 с.
- [22]. Кузнецов, С. В. Волны Лэмба в анизотропных средах: шестимерный формализм Коши // Математическое моделирование. - 2017. - Т. 29, № 10. - С. 86 -94.
- [23]. Ляхов, Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах [Текст] / Г.М. Ляхов. - М.: Наука. 1982. -288с.
- [24]. Мамин, А.Н. Сопротивление перекрытий из плит безопалубочного формирования кручению и деформированию в плоскости [Текст]: авторе. дисс. канд. техн. наук/ А.Н. Мамин. - М. -1986. - 20с.
- [25]. Мкртычев, О.В. Проблемы учёта нелинейностей в теории сейсмостойкости. (гипотезы и заблуждения) [Текст] / О.В. Мкртычев, Г.А. Джинчвелашвили. - Монография. МГСУ, 2012, 192с.
- [26]. Мкртычев, О.В. Надёжность железобетонных зданий с системой сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор при землетрясении [Текст] / О.В. Мкртычев, А.А. Бунов. - М.: Издательство АСВ, 2016. - 121 с.
- [27]. Мондрус, В. Л. Статистические характеристики сейсмических волн в случайно-неоднородной упругой среде: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.03 / В.Л. Мондрус; Моск. инж. - строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. - Москва, 1988. -179 с.
- [28]. Назаров, А.Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил [Текст] / А. Г. Назаров. - Ереван, 1959. - 286 с.
- [29]. Низомов, Д.Н. Метод граничных уравнений в решении статических и динамических задач строительной механики [Текст]/Д.Н. Низомов - М.: Издательство АСВ, 2000. - 282с.
- [30]. Низомов, Д.Н. Численное моделирование динамических задач по расчёту сейсмоизолированных зданий [Текст] / Д.Н. Низомов // Материалы международной научной конференции. - НАНТ, Душанбе, 14-15 сентября 2020. - С. 62-70.
- [31]. Низомов, Д.Н. Численное решение задачи со скользящим поясом в системе «платформа - модель здания». [Текст] / Д.Н. Низомов, И.К. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков // Международной научно-практической конференции «Новые направления развития науки в технических отраслях» Таджикский технический университет
- [32]. Ормонбеков, Т. Слоистые эластомерные конструкции [Текст] / Т. Ормонбеков, У. Бегалиев, Г.Максимов // - Бишкек, Издательский центр «МОК», 2004. - 144 с.
- [33]. Пастернак, П.Л. Основы нового метода расчёта фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели [Текст] / П.Л. Пастернак. - М.: Госстройиздат, 1964.
- [34]. Поляков, С.В. Современные методы сейсмозащиты зданий [Текст] / С.В. Поляков, Л.Ш. Килимник, А.В.Черкашин - М.: Стройиздат, 1989. - 320 с.
- [35]. Резников, Л.М. Эффективность динамического гасителя колебаний при нестационарных случайных воздействиях [Текст] / Л.М. Резников, Г.М. Флишман // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1981. – № 1. – С. 56 – 59.
- [36]. Ржаницын, А.Р. Расчёт сплошных конструкций методом упругих сосредоточенных деформаций [Текст] / А.Р. Ржаницын //Стр. мех. и расч. соор., 1980. – № 5.– С. 15 – 20.
- [37]. Розин, Л.А. Основы метода конечных элементов в теории упругости [Текст] / Л.А. Розин. - Л., 1972. -77с.
- [38]. Рутман, Ю.Л. Определение оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции [Текст] / Ю.Л. Рутман, Н.В. Ковалева, Г.В. Давыдова //Инженерно – строительный журнал. – СПбГПУ, 2013. – №5 (40). – С. 107 – 115.
- [39]. Савинов, О.А. Сейсмоизоляция сооружений. [Текст] / О.А. Савинов //Избранные статьи и доклады. Динамические проблемы строительной механики. – СПб., 1993. – С.155 – 178.
- [40]. Саргсян, А.Е. Строительная механика [Текст] / А.Е. Саргсян // Высшая школа,

Москва, 2004

[41]. Сеницын, А. П. Метод конечных элементов в динамике сооружений: [Текст] / А. П. Сеницын. - М: Стройиздат, 1978. - 231с.

[42]. Смирнов, А.Ф. Расчёт сооружений с применением вычислительных машин [Текст] / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лашеников, Н.Н. Шапошников. - М.: Стройиздат, 1964. - 380с.

[43]. Смирнов, В.И. Испытания зданий с системами сейсмоизоляции динамическими нагрузками и реальными землетрясениями [Текст] / В.И. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – М., 2009. – № 4.– С. 23 – 28.

[44]. Смирнов, В.И. Сейсмоизоляция для вновь проектируемых и усиления существующих зданий [Текст] / В.И. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2004. - № 4. - С. 49 -54.

[45]. Тяпин, А.Г. Сочетание двух моделей в расчётах сейсмической реакции сооружения, взаимодействующего с грунтовым основанием [Текст] / А.Г. Тяпин // Строительная механика и расчёт сооружений. №1, 2006. - С.43-47.

[46]. Тимошенко, С.П. Статические и динамические проблемы теории упругости [Текст] / С.П. Тимошенко. – Киев, «Наукова думка», 1975. – 564 с.

[47]. Уздин, А.М., Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений [Текст] / А.М. Уздин, Т.А. Сандович, М.С. Аль Насер. - СПб.: Издательство ВНИИГ, 1993. - 176 с.

[48]. Филатов, В.В. Развитие теории и разработка численной методики расчёта составных стержней и пластин [Текст]: автореф. дис. д – ра. техн. наук / В.В. Филатов. - М.: МГСУ, 2015, 38 с.

[49]. Хачиян, Э.Е. Сейсмические воздействия на высотные здания и сооружения [Текст] / Э.Е. Хачиян. - Ереван: Айастан, 1973. - 328с.

[50]. Черепинский, Ю.Д. Сейсмоизоляция зданий. Строительство на кинематических опорах [Текст] / Ю.Д. Черепинский. // (Сборник статей). - М.: Blue Apple, 2009. - 47 с.

[51]. Шапошников, Н.Н. Расчёт пластинок на изгиб по методу конечного элемента [Текст] / Н.Н. Шапошников // Труды МИИТ, вып. 260, М.: Изд. литературы по строительству. - 1968. - С. 134 - 144.

[52]. Chopra, A.K. Dynamic of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. [Text] / A.K. Chopra // – New Jersey: Prentice – Hall, 2006. – 794p.

[53]. Hirokazu, I. Optimum design of resilient sliding isolation system to protect equipments [Text] / I. Hirokazu, T. Taghikhany // Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. – 2004. – Reference paper. – P.1362.

[54]. Kelly, J.M. Earthquake resistant design with rubber [Text] / J.M. Kelly. – London: Springer – Verl., 1997. – 243 p.

[55]. Robinson, W.H. A lead – rubber shear damper. [Text] / W.H. Robinson Bull // N. Z. Natl. Soc. Earthq. Eng., 1977. – 3. – PP. 93 – 101.

[56]. Skinner, R.I., An Introduction to Seismic Isolation; [Text] / R.I. Skinner, W.H. Robinson, G.H. Mc. Verry // John Wiley and Sons Inc.: New York, NY, USA, 1993.

Основные результаты работы опубликованы в следующих изданиях
Монография

[1-А]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование динамических задач по расчёту зданий с учётом сейсмоизоляции/ Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков//Душанбе, Дониш, 2025. – 286с.

**Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан,
ВАК Российской Федерации**

[2-А]. **Каландарбеков, И.И.** Численное построение спектров сейсмических колебаний [Текст]/ Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков// Доклады НАНТ 2025, том 68, №6. - С. 588-597.

[3-А]. **Каландарбеков, И.И.** Экспериментальные исследования моделей железобетонных балок на основе теории подобия [Текст]/ Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, У.М.Махмадиев, И.И.Каландарбеков, И.Ш.Ашуров// Доклады НАНТ 2025, том 68, №6. - С. 578-587.

[4-А]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование обратного преобразования Фурье [Текст]/ Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков // Доклады НАНТ 2025, том 68, №5. - С. 496-504.

[5-А]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование системы «платформа-модель здания»с сейсмоизолирующим поясом [Текст]/ Низомов Д. Н., Каландарбеков И. К., Каландарбеков И. И. // «Вестник гражданских инженеров»- Санкт-Петербург, 2025, № 3 (110). - С. 60-67. doi: 10.23968/1999-5571-2025-22-3-60-67.

[6-А]. **Каландарзода, И.И.** Критерии подобия как результат преобразования дифференциальных уравнений для моделирования строительных конструкций [Текст] / Каландарзода И.И. // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук ТНУ Душанбе. 2025, № 3. - С. 99-106. ISSN: 2664-1534

[7-А]. **Каландарзода, И.И.** Модели и методы анализа динамических задач взаимодействия здания с грунтовым основанием при сейсмическом воздействии. [Текст] / Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарзода И.И.// Политехнический вестник, Серия «Инженерные исследования». Душанбе, №3 (71), 2025. - С. 144-151.

[8-А]. **Каландарзода, И.И.** Амплитудные спектры различных землетрясений. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарзода И.И.// Политехнический вестник, Серия «Инженерные исследования». Душанбе, №2 (70), 2025. - С. 188-195.

[9-А]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование свободных колебаний сейсмоизолированного здания на основе линейной модели [Текст] / Каландарбеков И.И. // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. ТНУ, Душанбе. 2025, № 2. - С. 92-98. ISSN: 2664-1534

[10-А]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование системы «платформа – модель здания» [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.// Моделирование системы «платформа – модель здания». *НАУКА и ТЕХНИКА*. Минск. Республика Беларусь. 2025, 24(4):297-306. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-297-306>

[11-А]. **Каландарбеков, И.И.** Численное решение статической задачи по расчёту дисков перекрытий методом сосредоточенных деформаций. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Исвалиев Д.Дж., Каландарбеков И.И.// Политехнический вестник, Серия «Инженерные исследования». Душанбе, №1 (69). - 2025. - С. 134-137.

[12-А] **Каландарбеков, И.И.** Динамический расчёт рам методом сосредоточенных деформаций [Текст]/ Каландарбеков И.И. // Известия НАН Таджикистана. Отделение физико-

математических, химических, геологических и технических наук. Душанбе: НАНТ, 2024, № 3 (196). - С. 67-74.

[13-A]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование изгиба плит с защемленными краями методом сосредоточенных деформаций [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.И., Каландарбеков И.К. // Известия НАН Таджикистана. Отделение физико – математических, химических, геологических и технических наук. – Душанбе: НАНТ, 2024, № 2 (195). – С. 25-31. ISSN 0002-3485

[14-A]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование динамических задач полой оболочкой [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И., Джонмамадова М.Т., Мамаднабиева А.П. // Научный журнал. Политехнический вестник, (серия инженерные исследования) - Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2024, №1 (59). – С. 127-130. ISSN 2520-2227

[15-A]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование сейсмоизолированных зданий [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.И., Каландарбеков И.К. // Известия НАНТ. Отделение физико – математических, химических, геологических и технических наук. – Душанбе: НАНТ, 2023, № 2(191) – С.133-140. ISSN 0002-3485

[16-A]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование каркасных зданий с элементами сейсмоизоляции на основе теории подобия [Текст]/ Каландарбеков И.И.// Доклады НАНТ. 2023, том 66. № 7-8. - С. 434-438.

[17-A]. **Каландарбеков, И.И.** Проблема сейсмической безопасности глинобитных домов на территории Республики Таджикистан [Текст]/ Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Шарифзода А.Ш. // Научный журнал. Политехнический вестник, Серия инженерные исследования. - Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, №2 (62) – 2023. – С. 214-219. ISSN 2520-2227

[18-A]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование сейсмоизолированных зданий на основе теории подобия [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И. // Известия НАНТ. Отделение физико – математических, химических, геологических и технических наук. – Душанбе: НАНТ, 2023, № 1(190). – С.109-116. ISSN 0002-3485

[19-A]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование динамической модели здания с дискретными параметрами при гармоническом колебании основания [Текст]/ Каландарбеков И.И.//Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2022, № 3 (59). - С. 121-127.

[20-A]. **Каландарбеков, И.И.** О некоторых полученных результатах экспериментальных исследований физической модели здания из железобетона. [Текст]/ Каландарбеков И.И. // Научный журнал. Политехнический вестник, Серия инженерные исследования. Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2022, №1 (57). – С.142-148. ISSN 2520-2227

[21-A]. **Каландарбеков, И.И.** Анализ точности и сходимости метода сосредоточенных деформаций [Текст]/ Каландарбеков И.И. // Известия НАНТ. Отделение физико – математических, химических, геологических и технических наук. – Душанбе: НАНТ, 2022, № 3(188). – С. 143-151. ISSN 0002-3485

[22-A]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование в задачах строительной механики [Текст] / Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. - №3 (59) – 2022. Душанбе: – С.127-130. ISSN 2520-2227

[23-A]. **Каландарбеков, И.И.** Экспериментальные исследования на модели сейсмоизолированного здания. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И. // Научный журнал. Политехнический вестник, Серия инженерные исследования. Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2022. №2 (58). – С. 152-157. ISSN 2520-2227

[24-A]. **Каландарбеков, И.И.** Экономическая эффективность сейсмоизолированного здания. [Текст]/ Давлатзода К.К., Каландарбеков И., Саидов Ф.Ю., Каландарбеков И.И. //

Научный журнал. Политехнический вестник, Серия Интеллект. Инновации. Инвестиции. Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2022. №1(57). – С. 60- 65. ISSN 2520-2227

[25-А]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование задачи взаимодействия здания с основанием в условиях высокой сейсмичности. [Текст]/ Каландарбеков И.К., Махмадиев У.М., Каландарбеков И.И. // Политехнический вестник, Серия инженерные исследования. - Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, – 2022. №1 (57). - С. 132-141. ISSN 2520-2227

[26-А]. **Каландарбеков, И.И.** Математическое моделирование зданий с учётом работы резинометаллических опор. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И. // Вестник ТТУ. - Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2022, №1. - С. 121- 127. ISSN 2520-2227

[27-А]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование влияния сухого трения в здании со скользящим поясом [Текст]/ Каландарбеков И., Низомов Д.Н., Каландарбеков И.И., Марамов М.Б // Научно-технический журнал Машиноведение - Бишкек, 2022. - С. 93- 104. ISSN 1694-7657.

[28-А]. **Каландарбеков, И.И.** О методах расчёта несущих систем многоэтажных зданий на основе дискретных моделей [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И. Известия НАНТ. Отделение физико – математических, химических, геологических и технических наук. – № 4(185) - 2021. – С.110-117. ISSN 0002-3485

[29-А]. **Каландарбеков, И.И.** Об учёте податливости стыковых соединений в расчётах элементов многоэтажных зданий [Текст]/ Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И., Низомов Д.Н. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. - №2(54) – 2021. Душанбе: – С.135-141. ISSN 2520-2227

[30-А]. **Каландарбеков, И.И.** Об оценке зависимости между коэффициентом допускаемых повреждений и пластичности в рамках спектральной теории сейсмостойкости [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Шарипов Ш.Ш., Каландарбеков И.И. // Политехнический вестник. Серия инженерных исследования. ТТУ им. акад. М.С. Осими. - Душанбе, 2020, №4(52). - С. 117-122. ISSN 2520-2227

[31-А]. **Каландарбеков, И.И.** Динамические характеристики железобетонных высотных сооружений [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Шарипов Ш.Ш., Каландарбеков И.И. // Политехнический вестник. Серия инженерных исследования. - Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2020, №4(52). - С. 117-122. ISSN 2520-2227

[32-А]. **Каландарбеков, И.И.** Оценка напряженно – деформированного состояния конструкций зданий по результатам остаточной прочности [Текст] / Каландарбеков И.И., Валиев Х.Ш., Джонмамадова М. // Наука и инновация, ТНУ, серия геологической и технической науки. - Душанбе: ТНУ, 2020, №2. - 66-73. ISSN 2664-1534

[33-А]. **Каландарбеков, И.И.** Оценка напряженно – деформированного состояния конструкций зданий по результатам визуального обследования [Текст] / Каландарбеков И.И., Валиев Х.Ш., Джонмамадова М.// Наука и инновация, ТНУ, серия геологической и технической науки.-Душанбе: ТНУ, 2020, №1. - С. 85-92. ISSN 2664-1534

[34-А]. **Каландарбеков, И.И.** Инновационные методы защиты зданий и сооружений от землетрясений [Текст] /И.К. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков, Д.Н. Низомов //Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. - 2018. - №1(170). – С. 64 - 72.

[35-А]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование сейсмоизолированных зданий с сухим трением [Текст] /Д.Н. Низомов, И.К. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков //Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2018. - том 61. - №1. – С. 47 - 53.

[36-A]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование динамической системы «платформа-модель здания» [Текст] /Д.Н. Низомов, И.К. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков //Вестник гражданских инженеров. Санкт – Петербург, 2018. - №3(68). – С. 66 - 72.

[37-A]. **Каландарбеков, И.И.** Дискретная динамическая модель расчёта рам методом сосредоточенных деформаций [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков //Вестник Таджикского технического университета. Серия инженерных исследований. - 2017. - №2(38). – С. 96-101.

[38-A]. **Каландарбеков, И.И.** Сейсмоизоляция как средство защиты зданий от землетрясений [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков //Наука и инновация. Серия естественных наук. – 2017. - №2. – С. 133 - 136.

[39-A]. **Каландарбеков, И.И.** Спектры сейсмических колебаний на воздействие в виде заданной акселерограммы [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2017. - том 60. - №3-4. – С. 151-156.

[40-A]. **Каландарбеков, И.И.** Расчёт неразрезных балок от действия статических нагрузок методом сосредоточенных деформаций [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков //Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отдел. физико-математ., хим., геолог. и технич. наук. - 2016. - №1(162). – С. 85-91.

[41-A]. **Каландарбеков, И.И.** Расчёт неразрезных балок от действия динамических нагрузок методом сосредоточенных деформаций [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков //Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отдел. физико-математ., хим., геолог. и технич. наук. - 2016. - №2(163). – С. 63-68.

[42-A]. **Каландарбеков, И.И.** Сравнительный анализ различных типов сейсмоизоляции в многоэтажных зданиях [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков //Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. - 2016. - №4 (165). – С. 58-64.

Статьи в сборниках

[43-A]. **Kalandarbekov, I.I.** Lightweight and ultra-high ductility engineered geopolymer composite for marine application: Design and material characterization [Text]/ Jun Li ^{a b}, Lingzhi Li ^a, Lei Su ^a, Mahfouz Ahmadi ^c, Iftikhor Kalandarbekov ^d, Kequan Yu ^a, Fei Wang ^{a/} ELSEVIER, Case Studies in Construction Materials. Volume 22, July 2025, e04857, Scopus Q1

[44-A]. **Kalandarbekov, I.I.** Investigation of shrinkage and mechanical properties in iron sand high-strength engineered cementitious composites: effects of water-to-binder ratio and fiber volume fraction [Text]/ Zhi Zhang^b, Nauman Ahmadb, Ajad Shresthab, Ziwei Caib, Iftikhor Kalandarbekov, Kequan Yu, Lingzhi Li// ELSEVIER, Case Studies in Constuction Materials. – China -2024, Scopus Q1

[45-A]. **Qalandarbekov, I.** Nature-based solutions for a sustainable future impact of phytotechnology on the environmental footprint and water resources [Text]/ Smuleac L., Davlatzoda S., Jurakhonzoda R., Qalandarbekov I. // Norwegian Journal of development of the International Science № 140, Norway-2024. - P.92-96.

[46-A]. **Kalandarbekov, I.I.** Mathematical model construction of the isotropic filtration process based on darcy's law [Text]/ I.I. Kalandarbekov, Laura Smuleac., R. Jurakhonzoda, U. Rasulov // Research Journal of Agricultural Science, 54 (1), 2022; ISSN: 2668-926X

Статьи в материалах конференции и других журналов

[47-A]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование сейсмоизолированных зданий методом сосредоточенных деформаций. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков

И.И.// Международная научно-практическая конференция по передовым технологиям в инженерии (2025). Ташкентский государственный транспортный университет, 8–10 октября 2025 г., г. Ташкент, Республика Узбекистан.

[48-А]. **Каландарбеков, И.И.** Методы сейсмозащиты зданий. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.// Международная научно-практическая конференция, г. Ташкент, 25 апреля, 2025.

[49-А]. **Каландарбеков, И.И.** Теоретические основы и инженерное применение теории подобия при моделировании строительных конструкций. [Текст]/ Каландарбеков И.К., Махмадиев У.М., Каландарбеков И.И.// Республиканская конференция. Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими, 17-18 апреля 2025, г. Душанбе. - С. 152-158.

[50-А]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование колебания модели здания со скользящим поясом. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И., Фарходов Р.С., Рахимов С.С. // Республиканская конференция. Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими, Душанбе, 17-18 апреля 2025. - С. 147-152.

[51-А]. **Каландарбеков, И.И.** Численное решение динамической задачи зданий с сейсмоизолирующим скользящим поясом [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.// Международная научно-техническая конференция на тему «сейсмическая безопасность зданий и сооружений, энергоэффективность, инновационные технологии в современном строительстве. Ташкентский государственный транспортный университет, 22–23 октября 2024 г., г. Ташкент, Республика Узбекистан, 2024. – С. 50 - 57.

[52-А]. **Каландарбеков, И.И.** Экспериментальные исследования модели железобетонных балок [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Махмадиев У.М., Каландарбеков И.И.// Международная научно – практическая конференция Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера, сегодня, завтра, посвящённая 60-летию образования архитектурной специальности. Душанбе, 2022. - С. 213-216.

[53-А]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование динамических задач пологих оболочек методом конечных разностей [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Джонмамадова М.Т.// Международная научно-теоретическая конференция «Развитие науки и образования в условиях глобализации на примере горных условий: проблемы, новые подходы и актуальные исследования», посвящённой 30 – летию сессии Верховного совета Республики Таджикистан и 30 -летию Хорогского государственного университета им. М. Назаршоева. Хорог, 2022. - С. 32-36.

[54-А]. **Каландарбеков, И.И.** Методы расчёта балок на упругом основании. [Текст]/ Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Саидов Ф. Ю.// Международная научно – практическая конференция Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера, сегодня, завтра, посвящённая 60-летию образования архитектурной специальности. Душанбе, 2022. - С. 193-196.

[55-А]. **Каландарбеков, И.И.** Численное решение динамической задачи по расчёту зданий со скользящим поясом [Текст]/ Каландарбеков И., Низомов Д.Н., Каландарбеков И.И.// Международная научно – практическая конференция Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера, сегодня, завтра, посвящённая 60-летию образования архитектурной специальности. Душанбе, 2022. - С. 210-213.

[56-А]. **Каландарбеков, И.И.** Экспериментальные исследования системы “платформа-модель здания” с элементами сейсмоизоляции. [Текст]/ Каландарбеков И., Низомов Д.Н., Каландарбеков И.И., Каримов Р.Ш., Сангинов А. М.// Международная научно – практическая конференция Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера, сегодня, завтра, посвящённая 60-летию образования архитектурной специальности. Душанбе, 2022. - С. 217-220.

[57-А]. **Каландарбеков, И.И.** Сравнительный анализ расчёта железобетонной ребристой плиты по зарубежным нормам [Текст]/ Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Насер Ахмад, Собит Масъуд, Гулов А.Н. Приоритетные направления развития науки и образования. Сб. статей XVIII международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНЦ «Наука и Просвещение», 2021. - С. 14-19. УДК 001.1 ББК 60 ISBN 978-5-00159-845-9

[58-А]. **Каландарбеков, И.И.** Анализ расчёта сечений железобетонных изгибаемых элементов по классическим методам [Текст]/ Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Джонмамадова М.Т., Собит Масъуд, Гулов А.Н.// Современная наука и молодые учёные. Сб. статей VI международной научно-практической конференции. Состоявшейся 20 мая 2021г.- Пенза: МЦНЦ «Наука и Просвещение», 2021. - С. 35-40. УДК 001.1 ББК 60 ISBN 978-5-00159-866-4

[59-А]. **Каландарбеков, И.И.** Сравнительный анализ расчёта железобетонной многослойной плиты по разным методам [Текст]/ Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Марамов М.Б., Назаров А.М.// Молодые учёные России: сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции. В 2 ч. Ч.1. - Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2021. – С. 42-47. УДК 001.1 ББК 60 ISBN 978-5-00159-900-5 Ч.1

[60-А]. **Каландарбеков, И.И.** Математическое моделирование высотных сооружений [Текст]/ Каландарбеков И., Шарипов Ш.Ш., Каландарбеков И.И.// Материалы международной научно-практической конференции «Электроэнергетика Таджикистана. Проблемы энергосбережения, энергоэффективности и использования возобновляемых источников энергии», 19 мая 2021 года: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Душанбе, 2021. - С.155-158.

[61-А]. **Kalandarbekov, I.I.** Studies of free oscillations of buildings taking into account seismic isolation [Text] /I.K. Kalandarbekov, D.N. Nizomov, I.I. Kalandarbekov //International conference «30 years after the Spitak earthquake: experience and perspective». Yerevan, Armenia, 3-7 December, 2018. - PP. 75 - 76.

[62-А]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование свободных колебаний динамической модели здания с учётом виброгасителя [Текст] /Д.Н. Низомов, И. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков //Материалы международной научно - практической конференции «Опыт, проблемы и перспективы повышения качества строительных работ на основе лучших отечественных и зарубежных практик (Часть 1), Душанбе, 2018. – С. 61- 67.

[63-А]. **Каландарбеков, И.И.** Численное решение динамической задачи системы «здание-виброгаситель» [Текст] /Д.Н. Низомов, И. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков //Материалы Международной научно-практической конференции «Вода - важный фактор для устойчивого развития» посвящённой международному десятилетию действия «Вода для устойчивого развития, 2018-2028» 21 апреля 2018г., Душанбе, 2018. – С. 274 - 278.

[64-А]. **Каландарбеков, И.И.** Математическое моделирование динамических задач методом сосредоточенных деформаций [Текст] /Д.Н. Низомов, И. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков //Современные проблемы математики и её приложений. Материалы международной конференции, посвящённой 70-летию со дня рождения Илолова М., Душанбе, 14-15 марта 2018г., Душанбе. – С. 177 - 180.

[65-А]. **Каландарбеков И.И.** О некоторых результатах математического моделирования динамической системы «платформа – модель здания» [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Ходжибоев А.А., Каландарбеков И.И. //Труды ИГССиС АН РТ, вып. 1-2018. Душанбе: - С. 21-25. УДК 55.624.627(575.3)

[66-А]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование реакции виброплатформы при действии динамической нагрузки общего вида [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков //Материалы республиканской научно-практической конференции «Повышение сейсмической безопасности городов и населённых пунктов» (г. Душанбе, Комитет по архитектуре и строительству при Правительстве РТ), Душанбе, 2017. – С. 49 - 55.

[67-А]. **Каландарбеков, И.И.** Амплитудный спектр акселерограммы землетрясения Фукусима [Текст] /И.И. Каландарбеков //Материалы второй международной научно-практической конференции «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий» (г. Душанбе, Академии наук Республики Таджикистан). Душанбе, Таджикистан, 2017. – С. 108 -111.

[68-А]. **Каландарбеков, И.И.** Динамические исследования модели зданий с использованием виброплатформы [Текст] /Д.Н. Низомов, Каландарбеков И.И. //Материалы республиканской научно-практической конференции «Повышение сейсмической безопасности городов и населённых пунктов» (г. Душанбе, Комитет по архитектуре и строительству при Правительстве Республики Таджикистан), Душанбе, 2017. – С. 42 - 48.

[69-А]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование зданий с учётом нелинейной работы сейсмоизоляции [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И.// Материалы VIII международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования в XXI веке», Душанбе, 2016. - С. 234-238.

[70-А]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование взаимодействия здания с основанием методом сосредоточенных деформаций. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.// Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии. Вып. 9, 2025. – С. 307-311.

[71-А]. **Каландарбеков, И.И.** Теория подобия и моделирование при исследовании строительных конструкций зданий и сооружений. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.// Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии. Вып. 6, 2025. – С. 218-224.

[72-А]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование сейсмоизолированных зданий. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каримов Р.Ш., Каландарбеков И.И., Сангинов А.М.// Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии. Вып. 6, 2025. – С. 211-217.

[73-А]. **Каландарбеков, И.И.** Построение спектров кинематических реакций. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И., Шарифзода А.Ш. // Сб. трудов Инженерной Академии, 2025. – С. 273-280.

[74-А]. **Каландарбеков, И.И.** Численное решение динамической задачи по расчёту сейсмоизолированного многоэтажного здания при различных воздействиях [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Марамов М.Б. // Научные труды Инженерной академии РТ. Душанбе, 2021. - С. 219-226.

[75-А]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование свободных колебаний зданий с учётом сейсмоизоляции [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН РТ, вып. 2. Душанбе: ИГССС, 2019. - С. 182-189.

Патенты, авторские свидетельства и государственная регистрация информационных ресурсов

[76-А]. **Каландарбеков, И.И.** Стенд барои моделсозии таъсири сейсмики ба моделҳои физикии биноҳо ва иншоот [Текст]/ Махмадиев У.М., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Нахустпатент ТҶ 1453, 16.05.23, № 2301836, дар феҳристи давлатии ихтироотҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 04.12.2023 с. ба қайд гирифта шуд.

[77-А]. **Каландарбеков, И.И.** Программа численного решения статических и динамических задач балок методом сосредоточенных деформаций [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон, шӯъбаи ҳуқуқ, хифзи ҳуқуқи муаллиф ва ҳуқуқи вобаста, рақами қайди давлатӣ №129, 24.12.2021г.

[78-А]. **Каландарбеков, И.И.** Программа расчёта многоэтажных зданий на сейсмические воздействия методом сосредоточенных деформаций [Текст]/ Низомов Д.Н.,

Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон, шуъбаи ҳуқуқ, ҳифзи ҳуқуқи муаллиф ва ҳуқуқи вобаста, рақами қайди давлатӣ №130, 24.12.2021г.

[79-А]. **Каландарбеков, И.И.** Программа расчёта многоэтажных зданий на сейсмические воздействия с учётом динамического гасителя [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон, шуъбаи ҳуқуқ, ҳифзи ҳуқуқи муаллиф ва ҳуқуқи вобаста, рақами қайди давлатӣ №131, 24.12.2021г.

[80-А]. **Каландарбеков, И.И.** Программа расчёта балок на упругом основании методом сосредоточенных деформаций [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон, шуъбаи ҳуқуқ, ҳифзи ҳуқуқи муаллиф ва ҳуқуқи вобаста, рақами қайди давлатӣ №132, 24.12.2021г.

[81-А]. **Каландарбеков, И.И.** Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. Программа численного моделирования сейсмоизолированного здания при многокомпонентном воздействии методом сосредоточенных деформаций // Министерство культуры Республики Таджикистан. Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №76 от 11 марта 2019г.

[82-А]. **Каландарбеков, И.И.** Программа численного моделирования зданий с резино-металлическими опорами [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Министерство культуры Республики Таджикистан. Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №77 от 11 марта 2019г.

[83-А]. **Каландарбеков, И.И.** Программа численного решения динамической задачи сейсмоизолированного здания со скользящим поясом [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Министерство культуры Республики Таджикистан. Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №78 от 11 марта 2019г.

[84-А]. **Каландарбеков, И.И.** Программа численного решения системы «Платформа-модель здания» при вибрационной нагрузке [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Министерство культуры Республики Таджикистан. Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №79 от 11 марта 2019г.

ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С.Осимӣ

ВБД 624.042(575.3)

Бо ҳуқуқи дастнавис



ҚАЛАНДАРЗОДА Ифтихор Имомёр

**МОДЕЛСОЗИИ МАСЪАЛАҲОИ ДИНАМИКӢ ОИДИ ҲИСОБИ БИНОҲОИ
ДОРОИ ҶУДОКУНАКҲОИ СЕЙСМИКӢ БО МЕТОДИ
МУТАМАРКАЗКУНОНИИ ДЕФОРМАТСИЯҲО**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т И

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмии
доктори илмҳои техники аз рӯи ихтисоси
2.1. Геология, геодезия, гидрология, сохтмон ва
меъморӣ (2.1.5. Механикаи сохтмон)

Душанбе – 2026

Диссертатсия дар озмоишгоҳи зилзилатобоварии биноҳо ва иншооти Институти геология, сохтмони ба заминчунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИТ ва кафедраи сохтмони саноатӣ ва шахрвандии донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С.Осим иҷро шудааст.

Мушовири илмӣ

Низомов Чаҳонгир Низомович, доктори илмҳои техникӣ, профессор, узви вобастаи АМИТ, мудири озмоишгоҳи зилзилатобоварии биноҳо ва иншооти Институти геология, сохтмони ба заминчунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИТ

Муқарризони расмӣ:

Кузнецов Сергей Владимирович, доктори илмҳои физикаю математика, профессор, муассисаи давлатии буҷетии федералии таҳсилоти олии касбии «МТ донишгоҳи давлатии сохтмони Москва», мудири кафедраи механикаи сохтмон ва назариявӣ

Абдусаттаров Абдусамат, доктори илмҳои техникӣ, профессори кафедраи механикаи амалии донишгоҳи давлатии нақлиёти Тошкент, Ҷумҳурии Узбекистон

Мирзоев Сайъало Ҳабибулоевич, доктори илмҳои техникӣ, профессори кафедраи информатикаи донишгоҳи миллии Тоҷикистон

Муассисаи пешбар

Институти механика ва зилзилатобоварии иншооти Академияи илмҳои ҚУЗ.

Ҳимояи диссертатсия «26» майи соли 2026, соати 14⁰⁰ дар ҷаласаи шурои диссертатсионии яқдафъаинаи 6D.KOA-027 назди Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ баргузор мегардад. Суроға: 734042, ш. Душанбе, хиёбони академикҳо Раҷабовҳо, 10^А. E-mail: dis.sia@mail.ru

Бо диссертатсия дар китобхона ва сомонаи Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, www.ttu.tj, шинос шудан мумкин аст.

Автореферат «_____» _____ соли 2026 фиристода шуд.

Котиби илмии шурои диссертатсионӣ,
доктори PhD



Шокиров Р.М.

Муқаддима

Мубрамии мавзуй таҳқиқот. Яке аз соҳаҳои, ки ба таври органикӣ дастовардҳои навитарини илму техника ва мероси бойи фарҳанги халқоро дар бар мегирад, сохтмон мебошад.

Дар шароити фаъолияти зичи заминларза таъмини устувории биноҳои баландошӯна ва коҳиш додани хатарҳои заминларза яке аз вазифаҳои асосӣ ба шумор мераванд. Дар Ҷумҳурии Тоҷикистон ин самт дар рӯйхати таҳқиқоти илмӣ афзалиятӣ, тасдиқшуда таҳти Қарори Ҳукумати ҶТ №333 аз 30 июни соли 2007, дохил карда шудааст. Дар Ҷумҳурии Тоҷикистон дар минтақаҳои бо фаъолияти заминларза баланд сохтмон фаъолна идома дорад, ки дар он асосан усулҳои пасивӣ барои баланд бардоштани устувории заминларза биноҳо истифода мешаванд. Аммо, чунин равишҳо саҳтию вазнини биноҳоро зиёд мекунанд, ки ин дар навбати худ борҳоро ҳангоми заминларза афзоиш медиҳад. Яке аз самараноктарин ҳалли ин мушкилот, истифода аз ҷудокунакҳои сейсмикӣ мебошад, ки имкон медиҳад таъсири вайронкунандаи зарбаҳои зеризаминӣ ба таври назаррас коҳиш дода шавад. То ҳол назарияи ҳисобкунии ҷудокунакҳои сейсмикӣ кофӣ таҳия нашудааст. Бисёре аз таҳияҳои техникаи мавҷуда аз назари бехатарӣ самаранокии онҳо баҳсӣ ҳисобида мешаванд. Илова бар ин, ягон тавсияҳои ягона оид ба интиҳоби параметрҳои ҷудокунакҳои сейсмикӣ мавҷуд нест. Дар шароити сохтмони васеъ дар минтақаҳои хатари заминларза кишвар, таъмини муҳофизати мустаҳками биноҳо ба вазифаи афзалиятӣ табдил меёбад, ки ҳалли он бехатарии сокинонро таъмин менамояд. Биноҳои баланд ба таъсири борҳои уфуқӣ ва амудӣ, ки дар натиҷаи таъсири заминларза пайдо мешаванд, хеле ҳасосанд.

Аз ин рӯ, вазифаи муҳофизати биноҳо аз лаппишҳои резонансӣ мувофиқ аст. Мушкилии таъмини бехатарӣ аз заминларза дар заминларзаҳои шадид ва коҳиш додани таъсиротҳои сейсмикӣ яке аз вазифаҳои асосӣ мебошанд. Фарзияи ҷудокунакҳои сейсмикӣ бар асоси коҳиш додани таъсири заминларзаҳо бо роҳи афзудани даври асосии лаппишҳои биноҳо асос ёфтааст, ки ба он имкон медиҳад аз резонанс бо мавҷҳои заминларза берун шавад. Ҳисобкунии биноҳо бо дарназардошти заминларза метавонад дар асоси модели математикӣ объекти таҳқиқшаванда иҷро карда шавад, ки дар он таҳияи алгоритм, таҳияи барномаи компютерӣ ва ҳалли мушкилот дохил мешаванд. Биноҳои сохтмонӣ, ки дар минтақаҳои заминларза сохта мешаванд, бояд ба талаботи устуворӣ иқтисоднокӣ ҷавобгӯ бошанд. Ҷудокунакҳои сейсмикӣ имкон медиҳанд, ки таъсири вайронкунандаи заминларзаҳо коҳиш дода шавад, бо эҷоди шароите, ки зерини он бино ба лаппишҳои замин камтар ҳасос аст. Ин бо роҳи тағйир додани хусусиятҳои динамикии бино даст меёбад, ки талаботҳои як равиши муфассали муҳандисӣ ва истифодаи технологияҳои конструктивӣ муосирро тақозо мекунанд. Дурустии натиҷаҳои ҳисоб барои таъсири заминларза ба таври назаррас вобаста ба интиҳоби модели ҳисобкунӣ ва мувофиқати он ба шароити воқеии қори сохтмон мебошад.

Дарачаи коркарди илмӣ таҳқиқи мавзӯ. Таҳқиқоти Акимов П.А. [2], Батэ К. [3], Габбасов Р.Ф. [7], Гольденблат И.И. [8], Додонов М.И. [10], Коренев Б.Г. [20], Мамин А.Н. [24], Мкртычев О.В. [25], Мондрус В.Л. [27], Низомов Д.Н. [29], Каландарбеков И. [14], Резников Р.А. [35], Розин Л.А. [37], Ржаницын А.Р. [36], Смирнов А.Ф. [42], Филатов В.В. [48], Шапошников Н.Н. [51] ва дигар олимони соҳаи муҳим барои инкишофи усулҳои ҳисобӣ дар ҳисобкунии конструксияҳо гузошанд.

Таҳқиқот дар соҳаи системаҳои фаъоли ҷудокунакҳои сейсмикӣ биноҳову иншоотро олимоне чун Я.Я.М. Айзенберг [1], Т.Ж. Жунусов [13], А.В. Дукарт [11], Л.Ш. Килимник [17], Б.Г. Коренев [21], О.В. Мкртычев [26], Д.Н. Низомов [30], С.В. Поляков [34], Ю.Л. Рутман [38], О.А. Савинов [39], В.И. Смирнов [44], А.М. Уздин [47], Ю.Д. Черепинский [50], И. Каландарбеков [16], R.I. Skinner [56], W.N. Robinson [55], J.M. Kelly [54], A.K. Chopra [52], I. Hirokazu [53] ва дигарон анҷом доданд. Аммо, ҳамчунонки ҳаҷми назарраси таҳқиқотҳои анҷомёфта, ин мушкилот то ҳол пурра ҳал нашудааст.

Ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо тақияҳои резини-филизӣ дар қорҳои О.В. Мкртычев [26], Д.Н.Низомов [31], И.Каландарбеков [15], В.И.Смирнов [43], Т.О. Ормонбеков [32] ва дигарон баррасӣ шудаанд.

Такмили усулҳои ҳисобкунии конструкцияҳо, ки баҳамтаъсирии бо асоси чандир, ба корҳои илмӣ олимони Болотин В.В. [4,5], Власов В.З. [6], Горбунов-Посадов М.И. [9], Дюкин Н.С. [12], Ляхов Г.М. [23], Киселёв Ф.Б. [18], Коренев Б.Г. [20,21], Кузнецов С.В. [22], Пастернак П.Л. [33], Саргсян А.Е. [40], Сеницын А.П. [41], Тяпин А.Г. [45], Тимошенко С.П. [46], Хачиян Э.Е. [49] ва дигар олимони бахшида шудаанд.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо) ва мавзуҳои илмӣ. Таҳқиқоти дидабаромада шуда ба мавзуи корҳои илмӣ - таҳқиқоти кафедраи «Соҳтмони саноатӣ ва шаҳрвандӣ»- и Донишгоҳи техникаи Тоҷикистон ба номи акад. М.С.Осимӣ ва инчунин ба мавзуи бучетии давлатӣ «Таҳқиқоти ҳолати шиддатнокӣ-деформатсионии биноҳо ва иншоот, баҳамтаъсирии асоси ҳокӣ ҳангоми таъсири сейсмикӣ», ки дар озмоишгоҳи «Зилзилатобоварии биноҳо ва иншоот»-и Институти геология, соҳтмони базаминчунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИТ иҷро мешавад, пайванди зич дорад. Дар доираи ин мавзӯ корҳои илмӣ дар соҳаи зилзилатобоварӣ ва ҳифзи сейсмикии биноҳо гузаронида шуда истодаанд. Лоиҳа барои солҳои 2021-2025 тархрезӣ шудааст, рақами сабти лоиҳа - 0121ТJ1164 аз 07.04.2021 мебошад. Ин таҳқиқот инчунин ба барномаи давлатии коҳиши хавфи сейсмикӣ дар ҳудуди Ҷумҳурии Тоҷикистон (мувофиқи қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 18 майи соли 2017, № 385) ва бевосита ба «Стратегияи рушди соҳаи соҳтмони Ҷумҳурии Тоҷикистон барои давраи то соли 2030», ки бо қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 27 апрели соли 2022, №203, тасдиқ шудааст алоқаманд мебошад.

Тавсифи умумии таҳқиқот

Мақсади таҳқиқот - инкишофи усулҳои самараноки ҳисобкунии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар асоси моделсозии ададӣ ва таҳқиқоти таҷрибавӣ, аз таъсирҳои гуногуни беруна мебошад.

Масъалаҳои таҳқиқот. Барои ноил шудан ба мақсади мавридиназар масъалаҳои зерин пешниҳод карда шудаанд:

1. Гузаронидани таҳлили усулҳои муносири ҳисобкунии системаҳои борбардори биноҳои баландошёна, амсилаҳо ва усулҳои муҳофизати сейсмикии биноҳо, ҳисоб намудани нармии пайвастиҳо дар унсурҳои биноҳо.

2. Гузаронидани таҳлили спектралӣ лаппишҳои сейсмикӣ ва таъсири онҳо ба динамикаи биноҳо.

3. Таҳияи амсилаҳои математикии системаи «платформа - модели бино» бо намудҳои гуногуни ҷудокунакҳои сейсмикӣ (камарбанди лағжишӣ, тақягоҳҳои резинӣ-филизӣ ва тақягоҳҳои фриксионӣ-оғузарӣ).

4. Таҳияи алгоритм ва барномаи компютерӣ дар забони ФОРТРАН барои моделсозии ададии биноҳо дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо соиши хушк.

5. Таҳияи алгоритм ва барномаи компютерӣ дар забони ФОРТРАН барои моделсозии ададии биноҳо дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо тақягоҳҳои резинӣ-филизӣ (ТРФ).

6. Таҳияи методикаи ҳисоби амсилаи бино бо баҳисобгирии ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар асоси методи мутамарказкунонии деформатсияҳо.

7. Гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавӣ дар амсилаҳои физикӣ барои муқоисаи параметрҳои бадастомада бо натиҷаҳои моделсозии ададии масъалаи биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ.

8. Моделсозии масъалаҳои статикӣ болорҳо, лавҳаҳо ва фрагменти бинои синҷӣ бо баҳисобгирии ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бе он бо муайян намудани коэффитсиентҳои монандӣ дар асоси назарияи монандӣ.

9. Моделсозии масъалаҳои динамикӣ болорҳо, лавҳаҳо ва фрагменти бинои синҷӣ бо баҳисобгирии ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бе он бо муайян намудани коэффитсиентҳои монандӣ дар асоси назарияи монандӣ.

10. Бадастовардани коэффитсиентҳои монандӣ, ки имкон медиҳанд аз амсилаи объект ба натурӣ гузаштан.

Объекти таҳқиқот - биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо схемаҳои конструктиви гуногун мебошанд, ки ба борҳои динамикӣ, аз ҷумла борҳои заминларза, дучор мешаванд.

Предмети таҳқиқот - ҳолати шиддатнокӣ-деформатсионии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ аз таъсирҳои динамикӣ мебошад.

Арзиши илмӣ қор аз рӯи маҷмӯӣ (комплексӣ) муносибат ба таҳқиқот муайян мегардад, ки дар натиҷаи он алгоритмҳо ва барномаҳо барои ҳалли масъалаҳои амалии механикаи сохтмон таҳия шудаанд ва онҳо барои хоҷагии халқ аҳамияти муҳим доранд.

Методологияи таҳқиқот. Дар диссертатсия методҳои ададӣ истифода шудаанд, ки ба қойидаҳои бунёдии назарияи чандирӣ ва пластикӣ, принципҳои механикаи сохтмон, назарияи зилзилатобоварӣ, инчунин ба гипотезаҳои классикии муқовимати мавод асос ёфтаанд.

Навгони илмӣ таҳқиқот иборат аст:

1. Равиши ҷамъбасти моделсозии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо баҳисобгири таъсирҳои ғайрихаттӣ.

2. Таҳлили муқоисавии намудҳои гуногуни ҷудокунакҳои сейсмикӣ.

3. Таҳияи алгоритми ҳалли ададии масъалаи табдилдиҳии бараъкси Фурье.

4. Таҳияи алгоритми ҳалли ададии модели динамикии соиши хушк бо дараҷаҳои зиёди озод.

5. Амалӣ намудани амсилаи математикии Вouc - Wen барои таҳлили қори ғайрихаттии ҷудокунакҳои сейсмикӣ ба намуди ТРФ.

6. Таҳияи методикаи ҳисобкунии модели биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар асоси методи мутамарказкунонии деформатсияҳо.

7. Тасдиқи таҷрибавии мувофиқати моделҳои ҳисобӣ.

8. Таҳияи алгоритмҳои моделсозии масъалаҳои статикӣ болорҳо, лавҳаҳо ва фрагменти бинои синҷӣ бо баҳисобгири ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бе он бо муайян намудани коэффитсиентҳои монандӣ дар асоси назарияи монандӣ.

9. Таҳияи алгоритмҳои моделсозии масъалаҳои динамикӣ болорҳо, лавҳаҳо ва фрагменти бинои синҷӣ бо баҳисобгири ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бе он бо муайян намудани коэффитсиентҳои монандӣ дар асоси назарияи монандӣ.

10. Бадастовардани коэффитсиентҳои монандӣ, ки имкон медиҳанд аз модели объект ба натурӣ гузаштан.

Нуктаҳои ба ҳимоя пешниҳодшаванда:

1. Натиҷаҳои ҳалли ададии масъалаи табдилдиҳии бараъкси Фурье.

2. Натиҷаҳои моделсозии ададии бино бо камарбанди ҷудокунакҳои сейсмикӣ, лағжишӣ бо дараҷаҳои зиёди озод.

3. Натиҷаҳои моделсозии ададии бино бо ҷудокунакҳои сейсмикӣ ба намуди ТРФ дар қори хаттӣ ва ғайрихаттии онҳо.

4. Натиҷаҳои ҳисоби амсилаи бино бо баҳисобгирии ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар асоси методи мутамарказкунонии деформатсияҳо.

5. Натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ оид ба амсилаи бинои синҷӣ дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ.

6. Таҳияи алгоритмҳои моделсозии масъалаҳои статикӣ болорҳо, лавҳаҳо ва фрагменти бинои синҷӣ бо баҳисобгирии ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бе он бо муайян намудани коэффитсиентҳои монандӣ дар асоси назарияи монандӣ.

Аҳамияти назариявӣ ва амалии таҳқиқот. Натиҷаҳои илмӣ асоснок, диаграммаҳо ва вобастагӣҳое, ки дар лоиҳакашии биноҳо истифода мешаванд, бадастоварда шудаанд; натиҷаҳои бадастомада метавонанд барои таҳқиқоти минбаъда дар соҳаи сохтмони зилзилатобоварӣ истифода шаванд; натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ оид ба модели пешниҳодшуда, ки дар лоиҳакашии биноҳои синҷӣ бо ҳисоб намудани ҷудокунакҳои сейсмикӣ аз таъсиротҳои сейсмикӣ аҳамияти амалӣ доранд, бадастоварда шудаанд; усулҳои пешниҳодшудаи ҳисобкунию барномаҳои компютери таҳияшуда имкон медиҳанд, ки рафтори динамикии биноҳо ва

иншоот бо ҳисоб намудани ҷудокунакҳои сейсмикӣ аз таъсирҳои гуногун, аз ҷумла заминларза, омузиш ёбанд.

Натиҷаҳои кор барои ташкилотҳои илмию-таҳқиқотӣ ва лоиҳавӣ барои арзёбии бехатарии заминларзаи объектҳои гуногун, ки таъсири заминларзаро бо истифода аз ҷудокунакҳои сейсмикӣ аз сар мегузаронанд, аҳамияти амалӣ доранд; натиҷаҳои таҳқиқот метавонанд барои оптималикунии ҳалли конструктивӣ бо истифода аз технологияҳои муосири муҳофизати сейсмикӣ истифода шаванд.

Дарачаи эътимоднокии натиҷаҳо, ки дар диссертатсия пешниҳод шудаанд, бо истифодаи дурусти ҷойҳои назариявӣ тахминҳо, таҳлили наздикшавии ҳалли ададӣ, муқоиса бо маълумоти таҷрибавӣ, инчунин бозсанҷии такрорӣ бо истифода аз дигар методҳо тасдиқ меёбанд.

Мутобиқати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ. Диссертатсия аз рӯи ихтисоси 2.1.5. Механикаи сохтмон анҷом дода шудааст.

Таҳқиқот ин нуқтаҳои шиносномаи ихтисосро дар бар мегирад:

- 1.«Принсипҳои умумии ҳисоби иншоот ва унсурҳои онҳо»;
- 2.«Усулҳои ҳисоб аз таъсири борҳои динамикӣ ва сейсмикӣ»;
- 3.«Таҳқиқоти таҷрибавии конструксияҳо»;
- 4.«Усулҳои ададии ҳисоби иншоот ва унсурҳои онҳо».

Саҳми шахсии довталаби дарачаи илмӣ дар таҳқиқот дар гузориши мақсаду вазифаҳои таҳқиқот, иҷрои моделсозии ададӣ барои ҳалли вазифаҳои пешниҳодшуда, иштирок дар ташкил ва гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавӣ, таҳия ва амалӣ намудани барномаҳои усулҳои ҳисобӣ, коркарди маълумоти бадастомада, гузориши хулосаҳои калидӣ, омодакунии маводҳои нашрӣ иборат аст.

Тасвиб ва амалисозии натиҷаҳои диссертатсия. Натиҷаҳои асосии диссертатсияи мазкур дар як қатор конфронси илмию амалӣ ва ҷаласаҳо баррасӣ карда шудаанд, ба монанди: ҳаштумин конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ «Инкишофи ояндаи илм ва маориф» (Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, Душанбе, 3-4 ноябри соли 2016); конфронси илмию амалии ҷумҳуриявӣ «Геологияи муҳандисӣ ва геоэкология: мушкилоти асосӣ ва вазифаҳои амалӣ» (Донишгоҳи миллии Тоҷикистон, Душанбе, 6 майи соли 2017); конфронси байналмилалӣ «Нақши донишҷӯёни ҷавон дар инкишофи илм, навоарию технология» (Академияи илмҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон, Душанбе, 11-12 майи соли 2017); сессияи илмӣ «110 солагии Заминларзаи Қаратоғ (21 октябри соли 1907) ва мушкилоти муосири геология, сохтмони базаминчунбӣ тобовар ва сейсмология» (Институти геология, сохтмони базаминчунбӣ тобовар ва сейсмология, Душанбе, 25 октябри соли 2017); конфронси илмию амалии ҷумҳуриявӣ «Баланд бардоштани бехатарии заминларзаи шаҳрҳо ва маҳалҳои аҳолинишин» (Кумитаи меъморӣ ва сохтмон назди Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон, 17 ноябри соли 2017), Душанбе, 2017; конфронси байналмилалӣ «Мушкилоти муосири математика ва татбиқи он» (Институти математика, АИ ҚТ, 14-15 марти соли 2018), Душанбе, 2018; конфронси илмию амалии ҷумҳуриявӣ «Масъалаҳои асосӣ ва амалии геология, сохтмони базаминчунбӣ тобовар ва сейсмология» (Институти геология, сохтмони базаминчунбӣ тобовар ва сейсмология, 15 марти соли 2018), Душанбе, 2018; конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ «Об – омили муҳим барои тараққиёти устувор» (Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, 21 апрели соли 2018), Душанбе, 2018; конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ «Таҷриба, мушкилот ва ояндаи инкишофи сифати корҳои сохтмонӣ дар асоси бехтарин амалиёти дохилӣ ва хориҷӣ» (Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, Душанбе, 11–12 майи соли 2018), Душанбе, 2018; конфронси байналмилалӣ барои «Даҳ солагии ёдбуди Заминларзаи Венчуан» (Ченду, Ситсуан, Хитой, 12–14 майи соли 2018), Хитой, 2018; конфронси байналмилалӣ «30 сол аз заминларзаи Спитак: таҷриба ва дидгоҳҳо» (Ереван, Арманистон, 3–7 декабри соли 2018), Ереван, 2018; конфронси илмию амалии ҷумҳуриявӣ «Вазифаҳои муосири шаҳрсозӣ ва меъморӣ» (Кумитаи меъморӣ ва сохтмони назди Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон, 27 ноябри соли 2019), Душанбе, 2019; конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ. (Институти геология, сохтмони базаминчунбӣ

тобовар ва сейсмологияи АИ Ҷумҳурии Тоҷикистон), Душанбе, 2019; конфронси илми байналмилалӣ, (АИ Ҷумҳурии Тоҷикистон, 14-15 сентябри соли 2020), Душанбе, 2020; конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ. «Назария ва амалияи механика ва моделисозӣ», (23-24 декабри соли 2020) Махачкала, 2020, Федератсияи Россия; конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ «Бехатарии ҳаракат ва равияҳои навоарӣ дар нақлиёт» бахшида ба профессорон Турсунов А.А., Оев А.М. ва Сангинов О.К. (Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ, 25-26 октябри соли 2020), Душанбе, 2020; конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ «Энергетикаи барқии Тоҷикистон. Мушкилоти сарфаи энергия, самаранокии энергетикӣ ва истифодаи сарчашмаҳои энергияи такроршаванда», (19 майи соли 2021, шуъбаи Донишгоҳи техникии Маскав «МЭИ») Душанбе, 2021; конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ «Масъалаҳои муосири меъморӣ ва шахрсозӣ», 12 ноябри соли 2021. (Кумитаи меъморӣ ва сохтмони назди Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон, Душанбе, 2021; ҳафтумин конфронси илмию амалии умумироссиягӣ, шаҳри Пенза, Федератсияи Россия, 2021; бисту панҷумин конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ, шаҳри Пенза, Федератсияи Россия, 2022; конфронси илмию амалии ҷумҳуриявӣ 115 солагии Заминларзай Қаратоғ, 21 октябри соли 1907, (21 октябри соли 2022, Институти геология, сохтмони базаминчунби тобовар ва сейсмологияи АИ Тоҷикистон), Душанбе, 2022; конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ «Меъморӣ ва шахрсозии Тоҷикистон: дирӯз, имрӯз, фардо», бахшида ба 60-солагии таъсиси ихтисоси меъморӣ. (Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ, 23 ноябри соли 2022), Душанбе, 2022; конфронси илмию назариявӣ байналмилалӣ «Инқишофи илм ва маориф дар шароити ҷаҳонишавӣ дар мисоли шароити кӯҳӣ: мушкилот, равишҳои нав ва таҳқиқоти мувофиқ», бахшида ба 30-солагии сессияи Шурои Олии Ҷумҳурии Тоҷикистон ва 30-солагии Донишгоҳи давлатии Хоруғ ба номи М. Назаршоев, (Донишгоҳи давлатии Хоруғ ба номи М. Назаршоев) Хоруғ, 2022; конфронси илмию амалии ҷумҳуриявӣ «Инқишофи ояндаи истехсоли маводҳои сохтмонӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон, 31 март соли 2023, (Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи акад. М.С. Осимӣ), Душанбе, 2023; ҳаштумин конфронси илмию амалии ҷумҳуриявӣ «Илм асоси инқишофи навоарӣ», 27-28 апрели соли 2023, (Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ), Душанбе, 2023); конфронси байналмилалӣ илмию техникӣ «Бехатарии заминларзай биноҳо ва иншоот, самаранокии энергетикӣ, технологияҳои навоарӣ дар сохтмони муосир», 22-23 октябри соли 2024, Тошкент, 2024; конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ «Равияҳои нави инқишофи илм дар соҳаҳои техникӣ». ФММТ ДМТБ-ДТТ ба номи акад. М.С.Осимӣ, 10 -11 октябри соли 2024, Душанбе, 2024; конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ «Илм асоси инқишофи навоарӣ». ДТТ ба номи акад. М.С.Осимӣ, 17 -18 апрели соли 2025, Душанбе, 2025; конфронси байналмилалӣ илмию амалӣ оид ба технологияҳои пешрафта дар муҳандисӣ. Донишгоҳи давлатии нақлиёти Тошкент, 8-10 октябри соли 2025, шаҳри Тошкент, Ҷумҳурии Узбекистон, 2025; дар ҷаласаи озмоишгоҳи «Зилзилатобоварии биноҳо ва иншоот»-и Институти геология, сохтмони базаминчунбӣ тобовар ва сейсмологияи АМИТ, Душанбе, 18 ноябри соли 2025; дар ҷаласаи васеи кафедраи «Сохтмони саноатӣ ва шахрвандӣ» - и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, Душанбе, 18 декабри соли 2025.

Натиҷаҳои таҳқиқоти диссертатсия дар амалияи лоиҳакашии Ширкати саҳомии кушодаи «НИПИИ САНИИОСП» ва Корхонаи давлатии тадқиқотию лоиҳавии «Душанбешаҳрсоз» татбиқ карда шудаанд. Ҷанбаҳои назариявӣ ва амалии кор дар раванди таълимии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ки дар дарс додани курси лексияҳои «Методҳои ҳисобӣ» барои магистрон ихтисоси 700201 – «Сохтмони саноатӣ ва шахрвандӣ» ва 700201-05 – «Лоиҳакашии биноҳо ва иншоот» истифода шудаанд, қобилияти татбиқ ёфтанд. Ҳуҷҷатҳо дар бораи татбиқи натиҷаҳо дар заммиаи диссертатсия пешниҳод карда шудаанд.

Интишорот аз рӯи мавзӯи диссертатсия: Аз рӯи мавзӯи кори диссертатсионӣ дар соли 2025 монография бо номи «Моделсозии адабии масъалаҳои динамикӣ ҳангоми ҳисоб намудани биноҳо бо дарназардошти ҷудокунакҳои сеймикӣ» (дар ҳаммуаллифӣ бо Низомов Ҷ.Н. ва Қаландарбеков И.Қ.) ба нашр расидааст. Натиҷаҳои асосии диссертатсия дар 84 мақолаи илмӣ инъикос ёфтаанд, аз ҷумла 7 мақола бидуни ҳаммуаллиф ва 32 мақола дар

ҳаммуаллифӣ, ки дар Ҷумҳурии Тоҷикистон дар маҷаллаҳои тавсияшудаи КОА назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ба таъб расидаанд; 2 мақола дар нашрияҳои тавсияшудаи КОА Федератсияи Россия; 1 мақола дар Ҷумҳурии Беларус; 4 мақола дар маҷаллаҳои байналмилалии индексатсияшуда (Scopus); 28 мақола дар маҷмӯаҳо ва маҷаллаҳои илмӣ. Илова бар ин, 1 патент ва 8 шаҳодатномаи муаллифӣ ба қайд гирифта шудаанд.

Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия: қор аз муқаддима, шаш боб, хулосаи умумӣ, рӯйхати адабиёти истифодашуда, ки 340 номгуйро дар бар мегирад, ки 51-тоашон ба забони хоричӣ ва заммимаҳо мебошанд. Ҳаҷми рисола 238 саҳифаи матни асосӣ, аз ҷумла 95 расм ва 13 ҷадвалро ташкил медиҳад.

Мундариҷаи асосии диссертатсия

Дар муқаддима мувофиқати мавзуи таҳқиқот асоснок карда шуда, баррасии адабиёт оид ба ҳисобҳои динамикии конструксияҳои биноҳо ва иншоот, таҳия ва омӯзиши ҷудоунакҳои сейсмикии биноҳо ва иншоот оварда шудааст. Ҳамчунин мақсад ва вазифаҳои қори диссертатсия, навгонии илмӣ, аҳамияти амалӣ, эътимоднокии натиҷаҳои бадастомада ва саҳми шахсии муаллиф баён гардидааст.

Дар боби якум «**ТАҲЛИЛИ ҲОЛАТИ МУОСИРИ МАСЪАЛАИ ТАҲҚИҚША-ВАНДА**» баррасии қорҳо оид ба усулҳои ҳисобкунии конструксияҳои биноҳо бо истифода аз моделҳои дискретӣ ва усулҳои муҳофизати заминларзаи биноҳо ва иншоот оварда шудааст. Таҳлили муқоисавии усулҳои ҳисобии ҳалли масъалаҳои динамикӣ баён гардида, инчунин ҳисоб намудани нармии пайвастиҳои дар унсурҳои биноҳо баррасӣ шудааст. Ин боб аз 4 бахш иборат буда, бо хулосаҳо ба поён мерасад.

Боби дуюм «**ТАҲЛИЛИ СПЕКТРАЛИИ ЛАППИШҲОИ ЗАМИНЛАРЗА**» ба ҳисобҳои интегралӣ ададӣ, ташкили Фурье, инчунин моделсозии ададии табдилдиҳии Фурье ва спектрҳои аксуламалҳо бахшида шудааст. Ин боб аз 8 бахш иборат буда, бо хулосаҳо хотима меёбад.

2.1. Табдилдиҳии Фурье. Бо ёрии таҳлили спектралӣ давраҳои афзуни акселерограммаҳо, ки ҳангоми заминларзаҳо сабт шудаанд, муайян карда мешаванд. Табдилдиҳии Фурье функсияеро, ки вобаста ба тағйирёбандаи t аст, аз функсияи дигаре вобаста ба тағйирёбандаи ω табдил медиҳад ва баръакс. Зичии спектралӣ $F(\omega)$ дар ҳолати умумӣ ба шакли зерин ифода меёбад

$$F(\omega) = \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt. \quad (1)$$

Формула (1) бо дарназардошти $e^{-i\omega t} = \cos \omega t - i \sin \omega t$ ба шакли зерин ифода меёбад

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t dt - i \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t dt = a(\omega) - ib(\omega), \quad (2)$$

$$a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t dt, \quad b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t dt, \quad (3)$$

Модули ин функсия

$$|F(\omega)| = \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)}, \quad (4)$$

Амплитудаи спектри басомадҳоро муайян мекунад. Функсияи мураккаб $F(\omega)$ - ро метавон ба шакли зерин ифода кард

$$F(\omega) = |F(\omega)| \left(\cos \varphi + i \sin \varphi \right) = |F(\omega)| e^{i\varphi}, \quad (4,a)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg[b(\omega) / a(\omega)], \quad (5)$$

$$-\pi / 2 < \varphi(\omega) < \pi / 2.$$

Табдилдиҳии Фурье бо муодилаи зерин тавсиф меёбад

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (6)$$

Муодилаи (6) функцияи $f(t)$ - ро тавассути табдилдиҳии Фурье ифода мекунад.

Муодилаи (6) бо дарназардошти (4, а) ба шакли зерин ифода мешавад

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)| e^{i(\omega t + \varphi)} d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)| \cos(\omega t + \varphi) d\omega + i \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)| \sin(\omega t + \varphi) d\omega. \end{aligned}$$

Аз он сабаб, ки функцияи додашуда $|F(\omega)|$ ҷуфт аст ва синус - функцияи тоқи басомад мебошад, интеграл аз ҳадди дуюм ба сифр баробар аст. Дар натиҷа, табдилдиҳии Фурьеро ба шакли зерин навиштан мумкин аст

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |F(\omega)| \cos(\omega t + \varphi) d\omega = \\ &= \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\infty} A(\omega) \cos \omega t d\omega - \int_0^{\infty} B(\omega) \sin \omega t d\omega \right], \quad (7) \\ A(\omega) &= |F(\omega)| \cos \varphi, \quad B(\omega) = |F(\omega)| \sin \varphi. \end{aligned}$$

Табдилдиҳии Фурье (2.6) бо дарназардошти ибораи (2.2)-ро ҳамчунин ба шакли зерин навиштан мумкин аст

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [a(\omega) - ib(\omega)] (\cos \omega t + i \sin \omega t) d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] d\omega +. \end{aligned}$$

Таҳқиқи хусусияти спектралӣ импулси росткунҷа. Тахмин меравад, ки импулси ягона тулонии τ ва шиддати P -ро дорад.

Бо истифода аз формулаи (1), ба даст меорем

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \int_{t=-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt = P \int_{t=-\tau/2}^{\tau/2} e^{-i\omega t} dt = \\ &= -\frac{P}{i\omega} (e^{-i\omega\tau/2} - e^{i\omega\tau/2}) = P\tau \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2}, \quad (а) \end{aligned}$$

аз ин ҷо бармеояд, ки хусусияти спектралӣ (зиҷии спектралӣ)-и импулси росткунҷа функцияи воқеӣ буда, модули ин функция ба шакли зерин ифода меёбад

$$|F(\omega)| = P\tau \frac{|\sin(\omega\tau/2)|}{\omega\tau/2}. \quad (б)$$

Табдилдиҳии Фурье (6) бо дарназардошти (б) ба функцияи интегралӣ синус меояд

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)| e^{-i\varphi(\omega)} e^{i\omega t} d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)| d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} P\tau \frac{|\sin(\omega\tau/2)|}{\omega\tau/2} d\omega = \\ &= \left| \begin{array}{l} \omega\tau/2 = x, \\ d\omega = (2/\tau) dx \end{array} \right| = \frac{P\tau}{\pi} \frac{2}{\tau} \int_0^{\infty} \frac{\sin x}{x} dx = \frac{2P}{\pi} \text{Si}(x). \quad (в) \end{aligned}$$

Ҳамин тавр, дар мисоли вазифаи санчишӣ, ки функсияи ибтидоӣ ба суръати импульси ягонаи росткунча тасвир меёбад, ба даст овардани тасвири Фурьеи функсия $f(x)$ (а), (б) ва бозгашти функсия $F(\omega)$ (в) нишон дода шудааст.

2.2. Интегралҳои ададии табдилдиҳии Фурье. Ҳисобкунии интегралҳои табдилдиҳии Фурье метавон бо истифода аз методи ҳисобӣ иҷро кард. Барои ин формулаи Симпсонро истифода мебарем, ки на танҳо барои полиномҳои дараҷаи дуум, балки барои полиномҳои дараҷаи сеюм низ дақиқии баландро таъмин мекунад.

Ҳисобкунии интегралҳои Фурье бо формулаи (7) ба шакли зерин навишта мешавад

$$f(t) = \sum (\omega - 2\Delta\omega) + \Delta\omega^* [|F(\omega_{i-2})| \cos(\omega_{i-2}t + \varphi_{i-2}) + 4 |F(\omega_{i-1})| \cos(\omega_{i-1}t + \varphi_{i-1}) + |F(\omega_i)| \cos(\omega_i t + \varphi_i)], \quad (8)$$

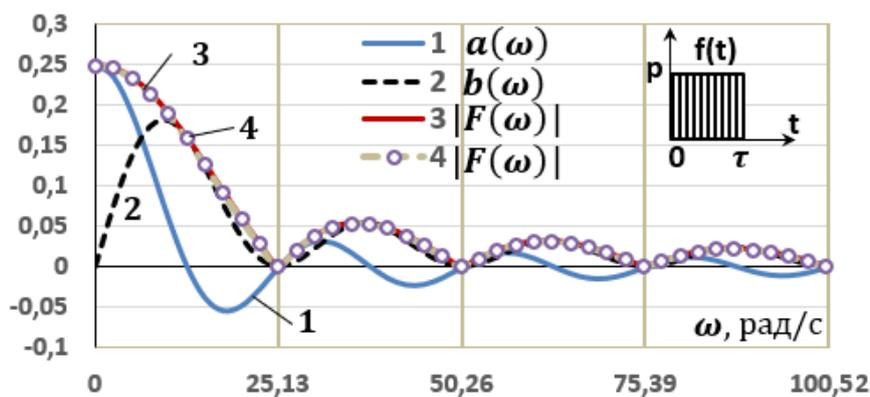
ки дар он $\omega_i = \omega$, $\omega_{i-1} = \omega - \Delta\omega$, $\omega_{i-2} = \omega - 2\Delta\omega$, $\Delta\omega^* = \Delta\omega / 3\pi$,

$$\varphi_i = \varphi(\omega), \quad \varphi_{i-1} = \varphi(\omega - \Delta\omega), \quad \varphi_{i-2} = \varphi(\omega - 2\Delta\omega).$$

Ҳисобкунии интегралҳои Фурье ба шакли зерин ифода мешавад

$$f(t) = \sum (\omega - 2\Delta\omega) + \Delta\omega^* [a(\omega_{i-2}) \cos(\omega_{i-2}t) + b(\omega_{i-2}) \sin(\omega_{i-2}t) + 4(a(\omega_{i-1}) \cos(\omega_{i-1}t) + b(\omega_{i-1}) \sin(\omega_{i-1}t)) + a(\omega_i) \cos(\omega_i t) + b(\omega_i) \sin(\omega_i t)]. \quad (9)$$

Амали кардани алгоритми табдилдиҳии ададии Фурье. Асоси барномаи компютери таҳияшудаи SPECTR-15 натиҷаҳои табдилдиҳии дискретӣ ба дастоварда шудаанд, ки бо ҳалли таҳлилий (а)-(в) муқоиса карда шудаанд. Дар расми 1 графикҳои тағйироти коэффициентҳои Фурье, ки бо ҳисобкунии интегралӣ ба даст оварда шудаанд, пешниҳод гардидаанд.



Расми 1. Коэффициентҳои Фурье ва спектри амплитудии импульси росткунча

$$a(\omega) = p \int_{t=0}^{\tau} \cos \omega t dt, \quad b(\omega) = p \int_{t=0}^{\tau} \sin \omega t dt,$$

(хатҳои 1 ва 2), инчунин графикҳои спектри амплитудӣ, ки бо формулаҳои (4) ва (4,а) ба даст оварда шудаанд (хатҳои 3 ва 4 мутаносибан). Дида мешавад, ки натиҷаҳои моделисозии ададӣ амалан бо маълумоти ҳалли таҳлилий баробар мебошанд.

Табдилдиҳии Фурье, ки бо истифода аз табдилдиҳии косинусӣ иҷро шудааст, ба натиҷаи зерин меорад

0	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25
0,974	0,992	1,021	1,021	0,991	0,973	0,992	1,024	1,024	0,989	0,989

ки дар сатри аввал вақт, дар сатри дуюм арзишҳои мувофиқи импулс нишон дода шудаанд. Хатогии максималӣ нисбат ба ҳалли таҳлилий 3,4% - ро ташкил медиҳад.

Барномаи компютери **SPECTRUM-12** ба забони Фортран таҳия карда шуда ва натиҷаҳои ҳисобкунии интегралӣ барои муайян кардани спектри амплитудии ҳар як акселерограмма ба даст оварда шудаанд.

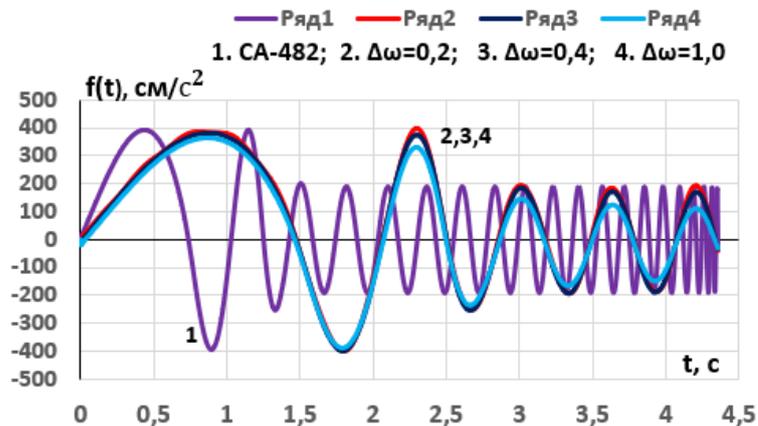
2.4. Спектрҳои энергетикӣ. Энергияи умумии заминларза аз назарияи Парсевал муайян карда мешавад, ки мувофиқи он энергия ҳангоми интеграл гирифтани квадрати функсияи вақтӣ дар фосилаи вақтӣ ба энергияи ҳангоми интеграл гирифтани квадрати модули спектри амплитудӣ дар тамоми фосилаи басомадҳо баробар аст: $E_f = E_F$,

Натиҷаҳо нишон медиҳанд, ки танҳо дар сурати акселерограммаи El - Centro мо ҳамвории дақиқи энергияро дорем, ва дар дигар акселерограммаҳо хатогӣ аз 1,03% то 9,7% мавҷуд аст. Ин хатогӣҳо ба порчаи вақти интиҳобшуда T , ки спектри амплитудӣ дар он сохта мешавад, вобастаанд.

2.5. Моделсозии ададии табдилдиҳии баръакси Фурье. Табдилдиҳии баръаксро баррасӣ мекунем, ки дар он коэффисиентҳои Фурье дар соҳаи басомад бо усули ададӣ ҳисоб карда мешаванд. Барои ин муқаррар карда шуда ва $\Delta\omega$ қабул мешавад $\omega_k = k\Delta\omega$,

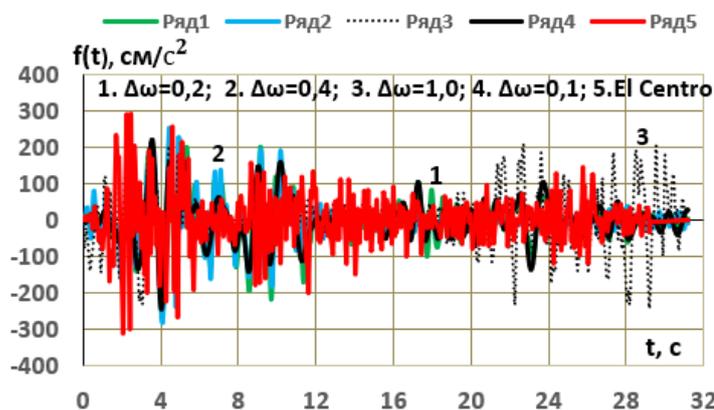
$$\begin{aligned} a(\omega_k) &= \Delta\tau^* \left[f_{j-2} \cos \omega_k t_{j-2} + 4f_{j-1} \cos \omega_k t_{j-1} + f_j \cos \omega_k t_j \right], \\ b(\omega_k) &= \Delta\tau^* \left[f_{j-2} \sin \omega_k t_{j-2} + 4f_{j-1} \sin \omega_k t_{j-1} + f_j \sin \omega_k t_j \right], \\ k &= 0, 1, 2, \dots, N, \quad j = 2, 3, \dots, M, \quad M = 2L, \\ f(t_j) &= \Delta\omega^* \left[a_{k-2} \cos \omega_{k-2} t_j + 4a_{k-1} \cos \omega_{k-1} t_j + a_k \cos \omega_k t_j \right] + \\ &+ \Delta\omega^* \left[b_{k-2} \sin \omega_{k-2} t_j + 4b_{k-1} \sin \omega_{k-1} t_j + b_k \sin \omega_k t_j \right], \end{aligned} \quad (10)$$

Дар расми 2 натиҷаҳои моделсозии ададии табдилдиҳии баръакси Фурье дар мисоли акселерограммаи сохтани СА-482 (хатти 1) оварда шудаанд, ки дар арзишҳои гуногуни $\Delta\omega$ (хатҳои 2,3,4) бадаст омадаанд. Муқоиса нишон медиҳад, ки аз рӯи арзишҳои амплитудӣ ҳамвории мавҷуд аст, вале аз рӯи хусусиятҳои басомадӣ фарқиятшавии назаррас мавҷуд аст.



Расми 2. Муқоисаи натиҷаҳои табдилдиҳии баръакс

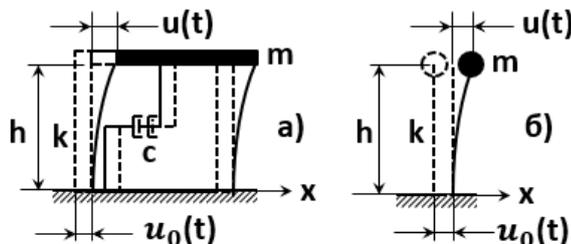
Мувофиқи алгоритми дар боло зикршуда, табдилдиҳии баръакси Фурье барои акселерограммаи El Centro иҷро карда шуд. Дар расми 3 натиҷаҳои гуногуни меҳвари басомадӣ бадаст омадаанд, пешниҳод шудаанд, ки бо акселерограммаи додасуда муқоиса мешаванд. Натиҷаҳои табдилдиҳии баръакс, ки дар асоси табдилдиҳии косинусӣ бадаст омадаанд, амалан бо маълумоти (10) баробар мебошанд.



Расми 3. Натиҷаҳои табдилдиҳии бараъкси акселерограми El Centro

2.6. Спектри аксуламал. Ҳисобкунии спектрҳои аксуламал дар ҳалли муодилаи дифференсиалии лапшишҳои заминларза барои системае бо як дараҷаи озод (расми 4) асос ёфтааст, ки шакли зеринро дорад

$$\begin{aligned}
 m\ddot{u} + c\dot{u} + ku &= -m\ddot{u}_0(t), \\
 \ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u &= -\ddot{u}_0(t),
 \end{aligned}
 \tag{11}$$



Расми 4. Системаи бо як дараҷаи озод

Ҳалли муодилаи (11) бо истифода аз интегралҳои Дюамел, ки дар корҳои Назаров А.Г.[28] ва Клаф Р. [19] овардашудааст ба шакли зерин пешниҳод шудааст

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_1} \int_{\tau=0}^t \ddot{u}_0(\tau) \exp[-\xi\omega(t-\tau)] \sin \omega_1(t-\tau) d\tau,
 \tag{12}$$

где $\omega_1 = \omega\sqrt{1-\xi^2}$ – лапшиши зудӣ бо баҳисобгирии хомушшавӣ.

Таҳлили муодилаи (11) нишон медиҳад, ҳангоме ки миқдори ω^2u ки дараҷааш хурдтар аз $2\xi\omega\dot{u}$ аст, сарфи назар карда шавад, шитоби мутлақи масса нисбат ба системаи координатҳои беҳаракат ($\ddot{u}_1 = \ddot{u}_0 + \ddot{u}$) бо дарназардошти муодилаи (12) ба шакли зерин ифода карда мешавад

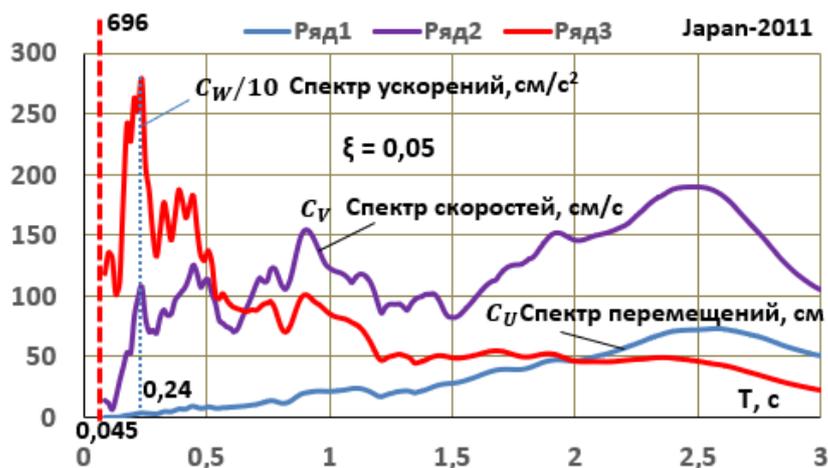
$$\begin{aligned}
 W(t, \xi, T) = \ddot{u}_1(t) &= -\omega^2u(t) - 2\xi\omega\dot{u} = \\
 &= -\omega^2(1+2\xi^2)[A(t)\sin \omega t - B(t)\cos \omega t] +
 \end{aligned}$$

Спектрҳои аксуламал хусусиятҳои динамикии системаҳои хаттии бо як дараҷаи озодро, ки дорой давраи муайяни лапшишҳо T ва параметри хомушкунӣ ξ мебошанд, ба таври ададӣ тавсиф намуда, аксуламали онҳоро ба таъсири заминларза равшан намоиш медиҳанд.

2.7. Сохтани спектрҳои аксуламалҳои кинематикӣ. Бо истифода аз барномаи компютери таҳияшуда ба забони Фортран «R-SPECTRUM» озмоишҳои ҳисобӣ гузаронида шуданд, ки дар натиҷа спектрҳои аксуламалҳои кинематикӣ барои акселерограмаҳои муайяни заминларзаҳо ба даст омаданд. Натиҷаҳое, ки дар $\xi = 0,02$ ба даст омадаанд, бо маълумоти Чопра муқоиса мешаванд. Муқоиса якхела будани натиҷаҳоро нишон медиҳад.

Омӯзиши алоҳидаи акселерограммаи Јарап-2011 анҷом дода шуд. Ин акселерограмма, ки бо қадами $\Delta t = 0.08$ с рақамӣ карда шуда, тулонии $t_A = 158,72$ с-ро дорад (расми 5). Қиматҳои ниҳони шитобҳо, ки ба $1,29g$ ва $0,77g$ баробар ҳастанд, ба лаҳзаҳои вақти 95,68 с ва 96,48 с мувофиқат мекунад. Дар расми 5 спектрҳои шитобҳо, суръатҳо ва ҷойивазкуниҳо пешниҳод шудаанд. Қимати максималии спектри шитобҳои заминларзани Япония 11.03.2011 ду баробар аз спектри шитоби заминларзани Эрон 16.09.1978 зиёдтар аст.

Аз рӯи натиҷаҳои бадастомада, метавон хулоса кард, ки алгоритмҳо ва барномаҳои таҳияшуда барои сохтани спектрҳои лапшиҳои заминларза бо усули ададӣ имкон медиҳанд, ки таҳлили спектралӣ таъсирҳои заминларза анҷом дода шавад.



Расми 5. Спектрҳои ҷойивазкунӣ, суръатҳо ва шитобҳои акселерограммаи заминҷунби Япония

2.8. Спектрҳои ақсуламали ошёнбандии бино. Барои ҳисоб кардани устувории объектҳои саноатии масъулиятнок нисбат ба таъсирҳои заминларза, зарур аст аз акселерограммаҳои ошёнбандишуда ва спектрҳои ақсуламали ошёнбандишуда истифода барад. Спектрҳои ақсуламали ошёнбандӣ дар ду марҳила ҳисоб карда мешаванд. Дар марҳилаи аввал бо ёрии ҳалли ададии системаи муодилаҳои дифференсиалӣ

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{i}}_0(t), \quad (13)$$

Дар марҳилаи дуюм алгоритми амалӣ мегардад, ки дар он раванди ҳисоб кардани спектрҳои ҷойивазкунӣ, суръатҳо ва шитобҳо (расми 5) дохил мебошад. Дар ин раванд акселерограммаҳои ошёнбандишуда истифода мешаванд, ки бо моделисозии ададии (13) ба даст омадаанд. Барои ташкил додани матрисаи саҳтӣ, ки ба муодилаи (13) дохил мешавад, усули унсурҳои охирик истифода мешавад. Ба мақсади ҳалли ададӣ усули Нюмарк истифода мешавад, ки дар ин ҳолат суръат ва шитоб дар меҳвари вақти дискретӣ ба шакли зерин ифода меёбанд

$$\dot{u}_j = \frac{2}{\tau_j} (u_j - u_{j-1}) - \dot{u}_{j-1}, \quad (14)$$

$$\ddot{u}_j = \frac{4}{\tau_j^2} (u_j - u_{j-1}) - \frac{4}{\tau_j} \dot{u}_{j-1} - \ddot{u}_{j-1}, \quad (15)$$

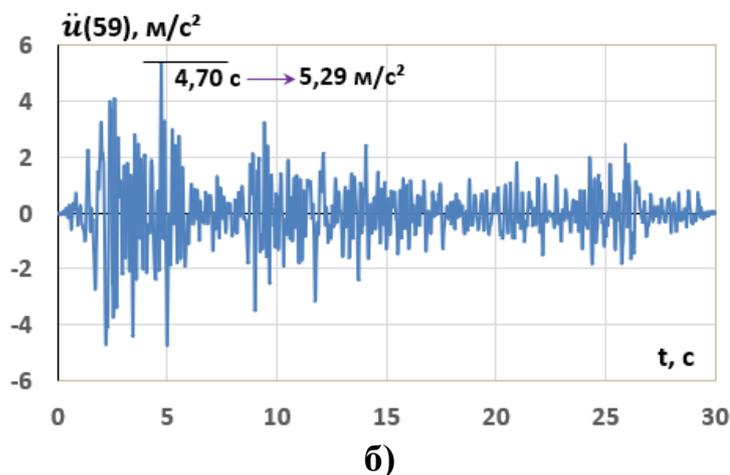
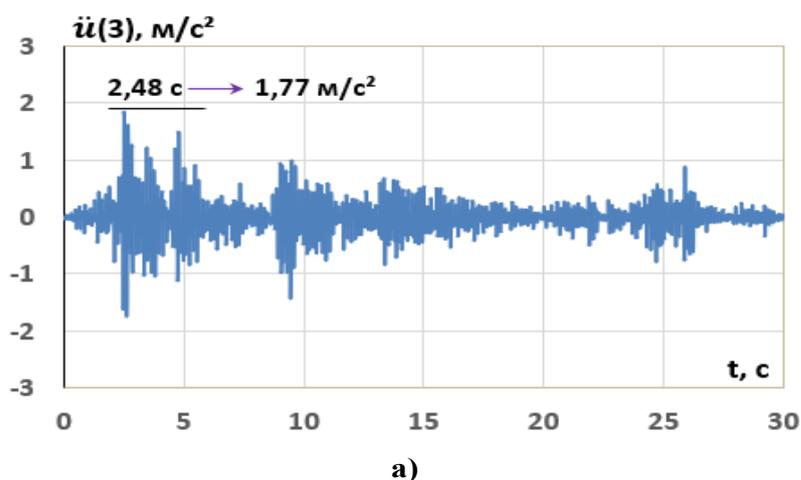
Бо ворид кардани (14) ва (15) ба (13), системаи муодилаҳои алгебравиро бадаст меорем

$$\mathbf{K}^* \mathbf{U}_i = \mathbf{F}_i, \quad (16)$$

$$\mathbf{K}^* = \mathbf{K} + \frac{4}{\tau^2} \mathbf{M} + \frac{2}{\tau} \mathbf{D}, \quad (17)$$

$$\mathbf{F}_i = -\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{u}}_0(t_i) + \mathbf{M} \left(\frac{4}{\tau^2} \mathbf{U}_{i-1} + \frac{4}{\tau} \dot{\mathbf{U}}_{i-1} + \ddot{\mathbf{U}}_{i-1} \right) + \mathbf{D} \left(\frac{2}{\tau} \mathbf{V}_{i-1} + \mathbf{D} \dot{\mathbf{U}}_{i-1} \right), \quad (18)$$

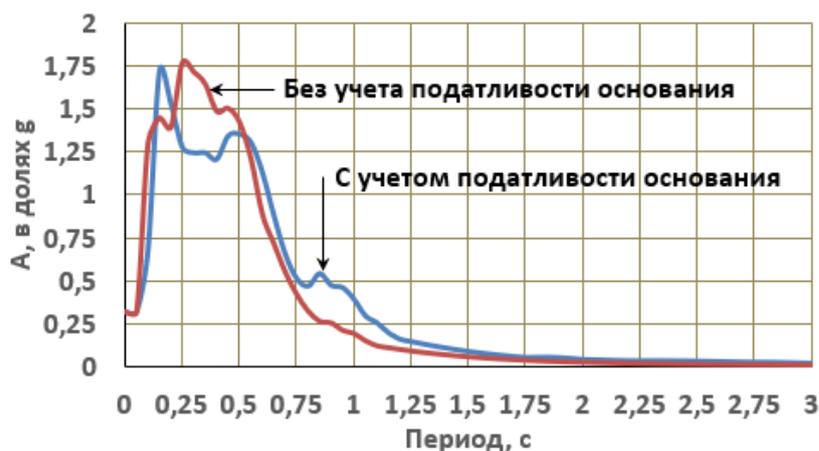
Дар расми 6 графикҳои шитобҳои хатгӣ дар сатҳҳои гуногуни бино, ки аз акселерограммаи додасудаи El Centro бадаст омадаанд, пешниҳод шудаанд. Ин натиҷаҳо бо дарназардошти нармии асоси чандрӣ ҳосил шудаанд. Муқоиса нишон медиҳад, ки шитоби плитаи таҳкурсии (расми 6, а) ҳадди аксари 1,77 м/с²-ро дорад, ки бештар аз яку ним баробар камтар аз шитоби куллаӣ дар акселерограммаи El Centro мебошад.



а) – дар сатҳи таҳкурсии плита; б) – дар сатҳи бомпуш баландии 39 м.

Расми 6. Акселерограммаҳои ошёнбандӣ

Спектрҳои ошёнбандӣ барои ҳисобҳо асосан дар акселерограммаҳои аналогӣ (El Centro, Hollister, Эрон, Ҳисор) ва сохташуда (СА-482) ба даст оварда шуданд. Қиматҳои ҳадди аксари спектрҳои ошёнбандӣ барои заминларзҳои Эрон - 5,8g, барои СА-482 - 3,28g, барои El Centro - 1,72g, барои Hollister - 0,785g, барои заминларзҳои Ҳисор - 0,43g мебошанд. Дар расми 7 спектрҳои ошёнбандӣ, ки дар шароити гуногуни модели замина - бо ҳисоб, бидуни ҳисоб намудани нармии он ба даст оварда шудаанд, нишон дода шудаанд.



Расми 7. Спектрҳои шитоби хаттӣ дар баландии 39 м.

Дар боби сеюм «МОДЕЛСОЗИИ АДАДИИ СИСТЕМАИ «ПЛАТФОРМА - МОДЕЛИ БИНО» БО КАМАРБАНДИ ЧУДОКУНАКИ СЕЙСМИКӢ» модели динамикии бино, инчунин лапишҳои озоду маҷбурии системаи «платформа-модели бино» бо камарбанди лағжишӣ омӯзиш меёбад. Ин боб аз 11 бахш иборат буда, бо хулосаҳо ба поён мерасад.

3.1. Модели ҳисобии динамикии бино бо камарбанди лағжишӣ. Модели ҳисобии динамикии иншоот бо камарбанди лағжишӣ метавонад ба намуди системае бо массаҳои марказонидашуда тасвир карда шавад, ки конфигуратсияи муайян аз ҷойгиршавии сатҳи лағжиш вобаста аст.

3.2. Таҳқиқи модели биноҳо бо схемаи конструктивии саҳт ва камарбанди лағжишӣ. Дар ин ҷо масъалае баррасӣ мешавад, ки дар он бинои 5-ошёнаи модели калонпанелӣ пешниҳод шудааст. Тахмин меравад, ки лағжиши массаи m_1 дар ҳудуди фосилаи $\Delta = 3$ см сурат мегирад, ки дар ин ҳолат коэффитсиенти саҳтии маҳдудкунанда $R = 6 \cdot 10^3$ кН/м мебошад. Самаранокии дастгоҳи камарбанди ҷудокунаки сейсмикии лағжишӣ ба воситаи коэффитсиентҳои динамикӣ β_j , коэффитсиентҳои муҳофизати заминларза p_j ва коэффитсиентҳои коҳиши аксуламали чандрӣ γ_j барои ҳар як масса арзёбӣ мешавад. Алгоритм ва барномаи компютерӣ, ки таҳия карда шудаанд, имкон медиҳанд, ки озмоишҳои ададӣ барои таҳлили хусусиятҳои динамикии биноҳои схемаҳои конструктивии гуногун бо камарбанди ҷудокунаки сейсмикӣ аз таъсирҳои гуногуни берунӣ гузаронида шаванд.

3.3. Модели ҳисобии бисёрмассагии бино бо унсурҳои соиши хушк. Модели ҳисобии бисёрмассагии бино бо унсурҳои соиши хушк баррасӣ мешавад, ки дар он сатҳи лағжиш байни массаҳои m_1 ва m_2 ҷойгир аст. Массаи m_2 бевосита дар болои камарбанди лағжишӣ ҷойгир аст. Тахмин меравад, ки модели бино дар шакли умумӣ озорҳои кинематикиро дар қисми таҷағҳӣ $z_0(t)$ ва амалиёти борҳои лапишии уфуқӣ $p(t)$ -ро, ки ба массаи m_1 татбиқ карда мешавад, аз сар мегузаронад. Байни массаҳои m_1 ва нисбат ба массаи дар ҳудуди фосилаи Δ_1 (расми 8, а) вучуд дорад. Бар асоси шароити тавозуни динамикии массаҳои m_1 ва m_2 ҳангоми лағжиш (расми 8, б) мувофиқи принципи Даламбер, ба даст меорем

$$-F_{I1} - F_{C1} - F_{S1} + F_{I2} + F_{S12} + p(t) = 0, \quad (19)$$

$$-F_{I2} - F_{C2} - F_{S2} - F_{21} - F_{S21} = 0. \quad (20)$$

Дар ин ҷо

$$F_{I1} = m_1(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_0), \quad F_{C1} = c_1 \dot{z}_1, \quad F_{S1} = r_{11} z_1, \quad (21)$$

$$F_{I2} = m_2(\ddot{z}_2 + \ddot{z}_0), \quad F_{C2} = c_2\dot{z}_2, \quad F_{S2} = r_{22}z_2 + r_{23}z_3, \quad (22)$$

$$F_{I2} = F_{21} = F_F \text{sign}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1), \quad F_F = \mu N, \quad N = M g, \quad M = m_2 + m_3 + \dots + m_n, \quad (23)$$

$$F_{S12} = F_{S21} = k_{12}(|z_2 - z_1| - \Delta_1) \text{sign}(z_2 - z_1) = F_R \text{sign}(z_2 - z_1), \quad (24)$$

$$F_R = k_{12}(|z_2 - z_1| - \Delta_1),$$

$$v_{21} = \dot{z}_2 - \dot{z}_1 \quad \text{sign}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) = \text{sign}(v_{21}) = \begin{cases} 1, & v_{21} > 0 \\ 0, & v_{21} = 0 \\ -1, & v_{21} < 0 \end{cases} \quad (25)$$

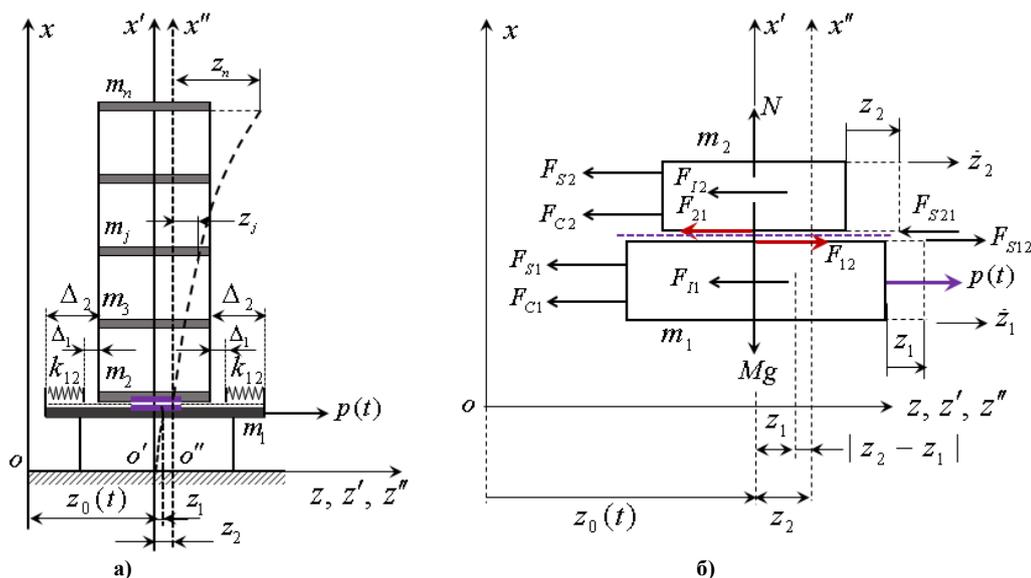
μ – коэффитсиенти соиши лағжиш;

N – қувваи аксуламали такягоҳ;

c_j – коэффитсиентҳои хомушкунӣ;

F_F – қувваи соиши лағжиш;

M – массаи умумии бино



Расми 8. Моделҳои бино бо қамарбандии ҷудокунаки сейсмиқӣ (а) ва қувваҳои соиши лағжиш байни массаҳои m_1 ва m_2 (б)

Барои дигар дараҷаҳои озоди муодилаҳои тавозуни динамикӣ ба шакли зерин сабт карда мешаванд

$$F_{I3} + F_{C3} + F_{S3} = 0, \quad (26)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$F_{In} + F_{Cn} + F_{Sn} = 0, \quad (27)$$

Бо ворид кардани (21) - (25) ба (19), (20) ва (26), (27), системаи муодилаҳои дифференциалро ба даст меорем

$$m_1\ddot{z}_1 + c_1\dot{z}_1 + r_{11}z_1 - F_F \text{sign}(v_{21}) - F_R \text{sign}(z_{21}) = -m_1\ddot{z}_0(t) + p(t), \quad (28)$$

$$m_2\ddot{z}_2 + c_2\dot{z}_2 + r_{22}z_2 + r_{23}z_3 + F_F \text{sign}(v_{21}) + F_R \text{sign}(z_{21}) = -m_2\ddot{z}_0(t), \quad (29)$$

$$m_i\ddot{z}_i + c_i\dot{z}_i + \sum_{j=2}^n r_{ij}z_j = -m_i(\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2), \quad i = 3, 4, \dots, n \quad (30)$$

$$v_{21} = \dot{z}_2 - \dot{z}_1, \quad z_{21} = z_2 - z_1, \quad F_R = k_{02} (|z_{21}| - \Delta_1),$$

дар ин чо $r_{i,j}$ – аксуламале, ки дар пайванди i – уми системаи асосии усули ҷойивазкуниҳо пайдо мешавад, ҳангоми ҷойивазкунии воҳиди пайванди j ;

c_j – коэффитсиенти хомушкунӣ.

Бо истифода аз усули такмили пайдарпаии вақт

$$\ddot{z}_i = \frac{\alpha_1}{\tau^2} (z_i - z_{i-1}) - \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{z}_{i-1} - \alpha_3 \ddot{z}_{i-1}, \quad (31)$$

$$\dot{z}_i = \frac{\beta_1}{\tau} (z_i - z_{i-1}) - \beta_2 \dot{z}_{i-1} - \tau \beta_3 \ddot{z}_{i-1}, \quad (32)$$

Аз (28) - (30) системаи муодилаҳои алгебравиро ба даст меорем

$$\begin{aligned} r_{11}^* z_1 &= m_1 \cdot u_1 + c_1 \cdot v_1 + F_F \text{sign}(v_{21}) + F_R \text{sign}(z_{21}) - m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t), \\ r_{22}^* z_2 + r_{23} z_3 &= m_2 \cdot u_2 + c_2 \cdot v_2 - F_F \text{sign}(v_{21}) - F_R \text{sign}(z_{21}) - m_2 \ddot{z}_0(t), \\ r_{32} z_2 + r_{33}^* z_3 + r_{34} z_4 &= m_3 \cdot u_3 + c_3 \cdot v_3 - m_3 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2), \end{aligned} \quad (33)$$

$$r_{43} z_3 + r_{44}^* z_4 + r_{45} z_5 = m_4 \cdot u_4 + c_4 \cdot v_4 - m_4 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2),$$

$$\dots \dots \dots$$

$$r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn}^* z_n = m_n \cdot u_n + c_n \cdot v_n - m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_2).$$

$$r_{jj}^* = \left(m_j \frac{\alpha_1}{\tau^2} + c_j \frac{\beta_1}{\tau} + r_{jj} \right), \quad (34)$$

$$u_j = \frac{\alpha_1}{\tau^2} z_j + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{z}_j + \alpha_3 \ddot{z}_j, \quad (35)$$

$$v_j = \frac{\beta_1}{\tau} z_j + \beta_2 \dot{z}_j + \beta_3 \tau \ddot{z}_j, \quad (36)$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

3.4. Муодилаи тавозуни динамикии модели бино бо камарбанди лағжишӣ дар сатҳи плитаи таҳкурсий. Дар сурате, ки сатҳи лағжиш дар сатҳи плитаи таҳкурсий (расми 9) ҷойгир аст, ё тахмин карда шавад, ки саҳтии сутунҳои платформаи лапишдор (расми 8) ба беохир майл мекунад, муодилаи тавозуни динамикии массаи m_1 (расми 9, б) ба шакли зерин ифода мешавад

$$-F_{I1} - F_{C1} - F_{S1} - F_{10} - F_{S01} + p(t) = 0, \quad (37)$$

дар ин чо $F_{I1} = m_1 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1)$, $F_{C1} = c_1 \dot{z}_1$, $F_{S1} = r_{11} z_1 + r_{12} z_2$, $F_{10} = F_F \text{sign}(v_1)$,

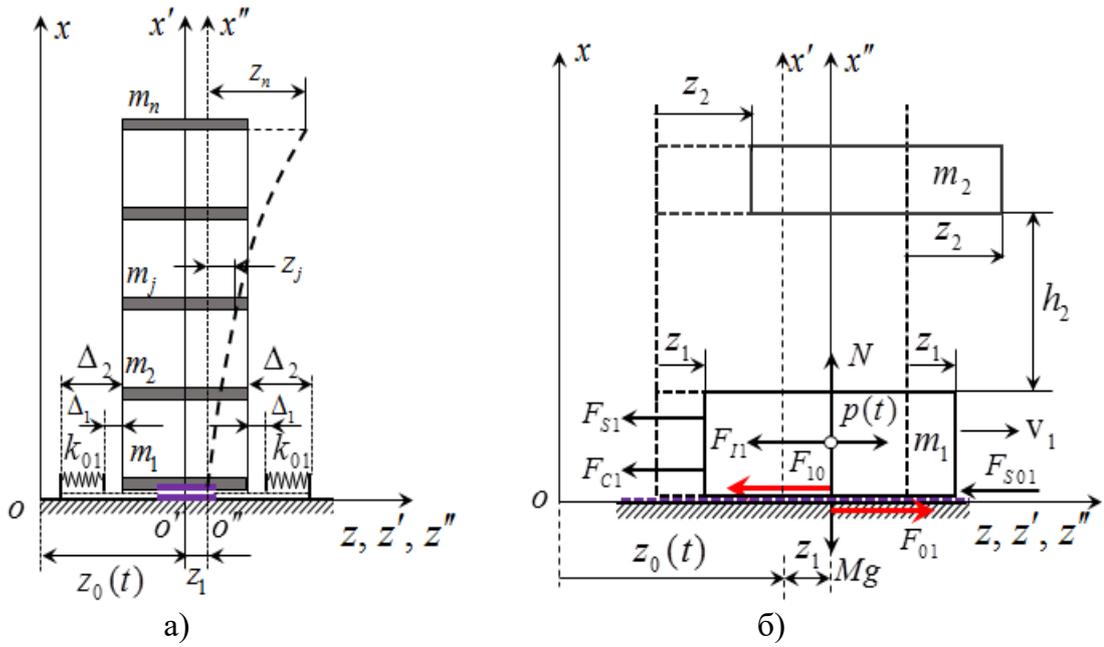
$$F_{S01} = k_{01} (|z_1| - \Delta_1) \text{sign}(z_1) = F_R \text{sign}(z_1), \quad F_F = \mu Mg, \quad (38)$$

$$F_R = k_{01} (|z_1| - \Delta_1),$$

v_1 – суръати ҳаракати массаи m_1 .

Муодилаи (37) бо дарназардошти (38) ба шакли зерин меояд

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \dot{z}_1 + r_{11} z_1 + r_{12} z_2 + F_F \text{sign}(v_1) + F_R \text{sign}(z_1) = -m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t). \quad (39)$$



Расми 9. Модели бино бо камарбанди лағжишӣ дар сатҳи плитаи таҳкурсеӣ (а) ва қуввахое, ки ба масса таъсир мекунад m_1 (б)

Муодилаҳои ҳаракати массаҳои дигари модели дар расми 9,а ба шакли умумӣ ба тариқи зерин навишта мешаванд

$$m_j \ddot{z}_j + c_j \dot{z}_j + r_{j,j-1} z_{j-1} + r_{jj} z_j + r_{j,j+1} z_{j+1} = -m_j (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1), \quad (40)$$

$$j = 2, 3, \dots, n-1,$$

$$m_n \ddot{z}_n + c_n \dot{z}_n + r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn} z_n = -m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1). \quad (41)$$

Бо иваз кардани (31) ва (32) ба (39) - (41) системаи муодилаҳо ба даст меояд, ки ба шакли зерин аст

$$r_{11}^* z_1 + r_{12} z_2 = m_1 \cdot u_1 + c_1 \cdot v_1 - p v_1 - p z_1 - m_1 \ddot{z}_0(t) + p(t),$$

$$p v_1 = F_F \text{sign}(v_1), \quad p z_1 = F_R \text{sign}(z_1),$$

$$r_{21} z_1 + r_{22}^* z_2 + r_{23} z_3 = m_2 \cdot u_2 + c_2 \cdot v_2 - m_2 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1),$$

$$r_{32} z_2 + r_{33}^* z_3 + r_{34} z_4 = m_3 \cdot u_3 + c_3 \cdot v_3 - m_3 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1), \quad (42)$$

$$r_{43} z_3 + r_{44}^* z_4 + r_{45} z_5 = m_4 \cdot u_4 + c_4 \cdot v_4 - m_4 (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1),$$

$$\dots$$

$$r_{n,n-1} z_{n-1} + r_{nn}^* z_n = m_n \cdot u_n + c_n \cdot v_n - m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{z}_1).$$

Муодилаҳои (34) ва (42)-ро метавон дар шакли матритсӣ ифода кард

$$\mathbf{R}^* \mathbf{Z}_k = \mathbf{B}_k, \quad (43)$$

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{R} + \mathbf{R}_1, \quad R_1 = \text{diag}(\kappa_1 \quad \kappa_2 \quad \dots \quad \kappa_n), \quad \kappa_j = \alpha_1 m_j / \tau^2 + \beta_1 c_j / \tau, \quad (44)$$

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{M} \mathbf{U}_{k-1}^* + \mathbf{C} \mathbf{V}_{k-1}^* + \mathbf{F}_{k-1} - \mathbf{M} \ddot{\mathbf{Z}}_{0,k} + \mathbf{P}_k, \quad (45)$$

$$\mathbf{U}_{k-1}^* = \frac{\alpha_1}{\tau^2} \mathbf{Z}_{k-1} + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \alpha_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}, \quad (46)$$

$$\mathbf{V}_{k-1}^* = \frac{\beta_1}{\tau} \mathbf{Z}_{k-1} + \beta_2 \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \tau \beta_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}, \quad (47)$$

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{Z}}_{0,k} &= \mathbf{I}\ddot{z}_0(t_k), \quad \mathbf{P}_n = \{p_1 \quad p_2 \quad \dots \quad p_n\}^T, \\ \mathbf{F}_{k-1} &= \mathbf{F}_{1,k-1} + \mathbf{F}_{2,k-1}, \\ k &= 1, 2, 3, \dots, K.\end{aligned}\quad (48)$$

Векторҳои қувваи соиш-ғечишӣ барои моделҳои, ки дар расми 8 ва 9 оварда шудаанд, ба шакли зерин навишта мешаванд

$$F_{2,k-1} = F_{21} \cdot \{ \text{sign}(z_{21}) \quad -\text{sign}(z_{21}) \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T, \quad (49)$$

$$F_{2,k-1} = F_{10} \cdot \{ -\text{sign}(z_1) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \}_{k-1}^T, \quad (50)$$

$$F_{21} = k_{12} (|z_2 - z_1| - \Delta_1), \quad F_{10} = k_{01} (|z_1| - \Delta_1).$$

ки дар он $z_{21} = z_2 - z_1$ фарқияти ҷойивазкуниҳои нисбии массаҳои m_2 ва m_1 барои модели биное, ки рӯи платформи лаппишдор насб шудааст (расми 8), бо шароити $|z_{21}| \leq \Delta_1$, $F_{21} = 0$. Қувваи аксуламали чандрӣ F_{10} дар (50)-и модели, ки дар расми 9 оварда шудааст, низ ба сифр баробар хоҳад шуд, агар $|z_1| \leq \Delta_1$ бошад.

Аз ин рӯ, дар сурате, ки модули $|Z_i|$ аз арзиши муайяншуда δ_i зиёдтар шавад, дар тарафи рости системаи муодилаҳо қувваи иловагӣ пайдо мешавад.

Векторҳои шитобҳо ва суръатҳои нисбӣ, ки бо роҳи такмилҳои пайдарпаии вақтӣ ба даст оварда шудаанд, ба шакли зерин ифода мешаванд

$$\mathbf{U}_k = \frac{\alpha_1}{\tau^2} (\mathbf{Z}_k - \mathbf{Z}_{k-1}) + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \alpha_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}, \quad (51)$$

$$\mathbf{V}_k = \frac{\beta_1}{\tau} (\mathbf{Z}_k - \mathbf{Z}_{k-1}) + \beta_2 \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \tau \beta_3 \ddot{\mathbf{Z}}_{k-1}, \quad (52)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, K.$$

Вектори шитобҳои пурра ҳамчун ҷамъи векторҳо муайян карда мешавад

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{U}_k + \mathbf{I}\ddot{\mathbf{z}}_{0,k}, \quad (53)$$

дар ин ҷо \mathbf{I} – вектор-сутуни воҳидӣ;

$\ddot{z}_{0,k}$ – шитоби асос, ки ба лаҳзаи вақти t_k мувофиқ аст.

Вектор-сутунҳои қувваҳои инертсияионӣ ва чандрӣ, инчунин лаҳзаи ҳамшавӣ ва қувваи амудӣ дар қисми таҷағҳои модел, ки ба лаҳзаи вақти t_k мувофиқанд, ба таври зерин ифода карда мешаванд

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{M}\mathbf{U}_k, \quad \mathbf{Q}_k = \mathbf{R}\mathbf{Z}_k, \quad M_{0,k} = \mathbf{X}\mathbf{S}_k, \quad Q_{0,k} = \mathbf{e}\mathbf{S}_k, \quad (54)$$

$$\mathbf{X} = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n), \quad \mathbf{e} = (1 \quad 1 \quad \dots \quad 1),$$

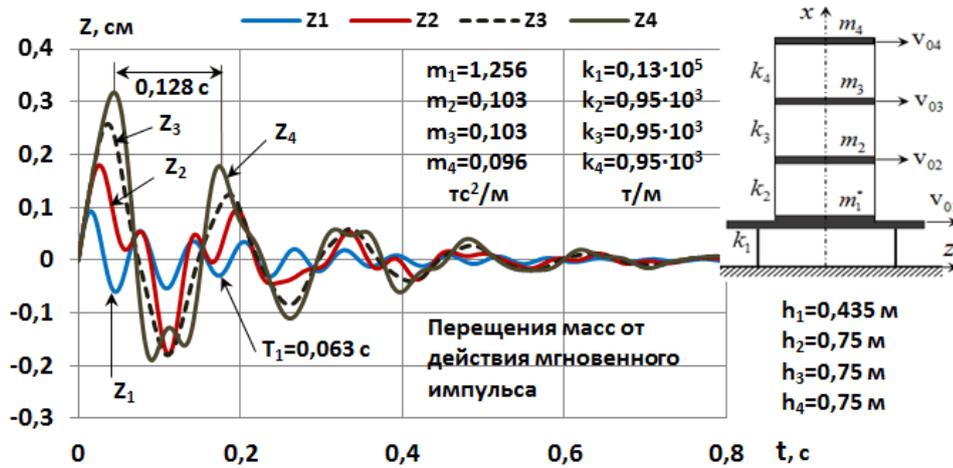
дар ин ҷо \mathbf{X} – вектор - сатри координатҳои нуқатҳои татбиқи массаҳои марказонидашуда;

\mathbf{e} – вектор-сатри воҳидӣ.

Алгоритми (43) - (54) дар намунаҳои гуногун оид ба ҳисобкунии модели биноҳо бо камарбанди лағжишӣ амалӣ карда шудааст.

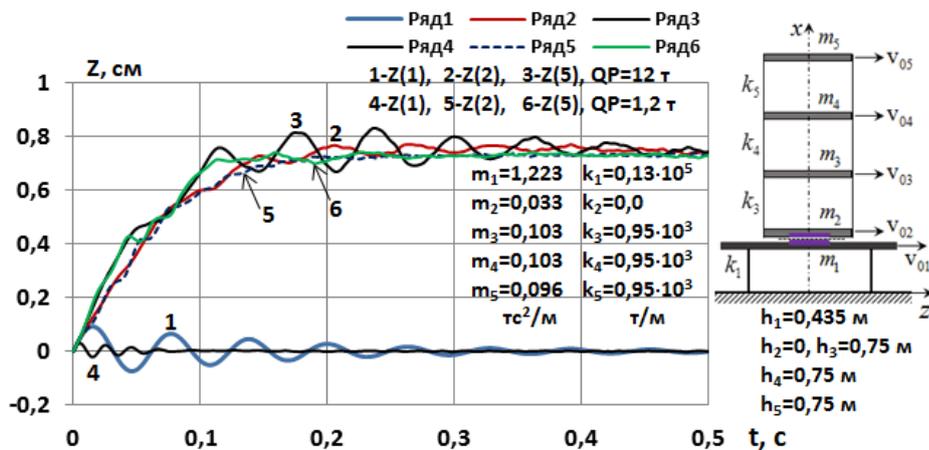
3.5. Таҳқиқи лаппишҳои озоди системаи «виброплатформа - модели бино» бе ҳисобгирии лағжиш. Система бо чор дараҷаи озод дар назар гирифта мешавад, ки лағжиш вучуд надорад, ки дар он $m_1 = m_1^*$ аз ҷамъи ду масса – массаи мизи платформи лаппишдор ва массаи қисми таҷағҳои модел иборат аст. Ин массаҳо дар ҳолати «часпидагӣ» қарор доранд.

Дар расми 10 графикҳои лапшиҳои озоди система аз таъсири импулси лаҳзагӣ оварда шудаанд.



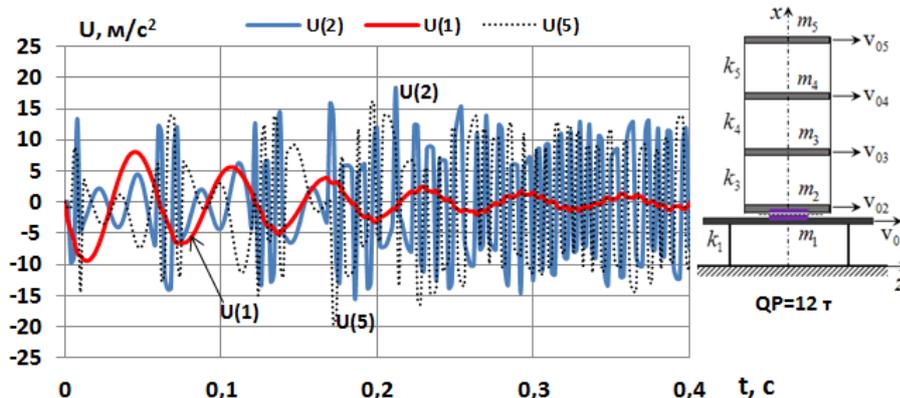
Расми 10. Лапшиҳои озоди система

3.6. Таҳқиқи лапшиҳои озоди системаи «виброплатформа - модели бино» бо дарназардошти лағжиш. Таҳқиқи лапшиҳои озоди системаи «платформаи - модели бино» бо назардошти лағжиш асосан бар маълумоти ибтидоие, ки дар бахши 3.5 оварда шудаанд, сурат гирифтааст.

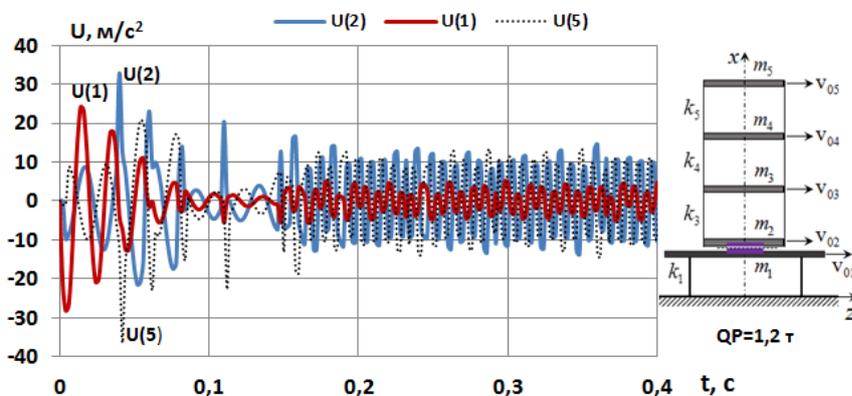


Расми 11. Графикҳои тағйирёбии ҷойивазкунӣ

Тахмин меравад, ки сатҳи лағжиш байни массаҳои m_1 ва m_2 ҷойгир аст. Дар ин модел инчунин таъсири импулси лаҳзагӣ, ки сабаби он тамоми массаҳо суръати ибтидоии баробари $v_0 = 0,1$ м/с-ро бадаст меоранд, дар назардошта мешавад, ки аз миқдори массаҳои марказонидашуда вобастагӣ надорад. Дар расми 11 графикҳои тағйирёбии шитобҳои массаҳои m_1 , m_2 ва m_5 -и система, ки аз суръати ибтидоии додашуда бадаст оварда шудаанд, нишон дода шудаанд. Дар ин ҷо вазни платформа $Q_p = 12$ т мебошад. Натиҷаҳои монанд ҳангоми вазни платформа $Q_p = 1,2$ (расми 13) низ бадаст омадаанд. Мукоиса нишон медиҳад, ки коҳиши массаи платформа ба тағйирёбии назарраси шитобҳои платформа ва модел меоранд.



Расми 12. Графики шитобҳо ва қувваҳои инертсионӣ ($QP = 12\tau$), $\mu = 0,1$



Расми 13. Графики шитобҳо ва қувваҳои инертсионӣ ($QP = 1,2\tau$) $\mu = 0,1$

3.7. Таҳқиқи лапшишҳои маҷбурии системаи «платформа-моделӣ бино» аз таъсири бори ларзишӣ. Тахмин меравад, ки вибраторе, ки ду эксцентрик дорад ва ба сатҳи поёнии мизи платформа насб шудааст, бори гармоникӣ ҳосил мекунад

$$p(t) = p_0 \sin \theta t, \quad p_0 = 2m_e e \theta^2, \quad \theta = 2\pi n_0 / 60,$$

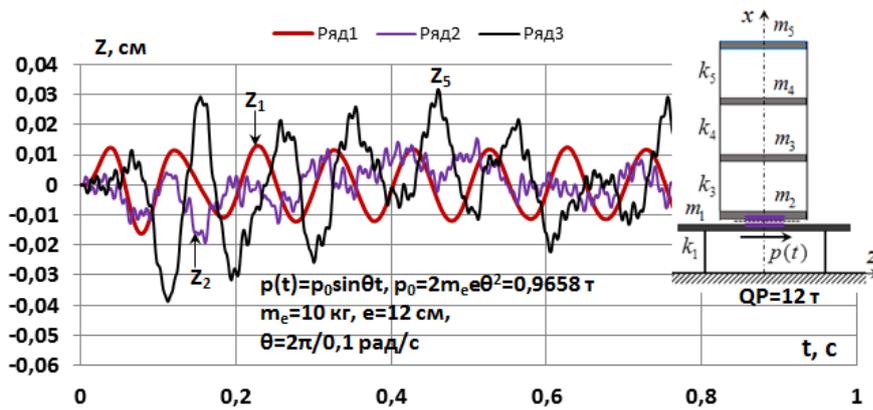
дар ин ҷо m_e – массаи бори бемувозинатӣ;

e – эксцентриситети бори бемувозинатӣ;

n_0 – миқдори гардиши двигател дар як дақиқа;

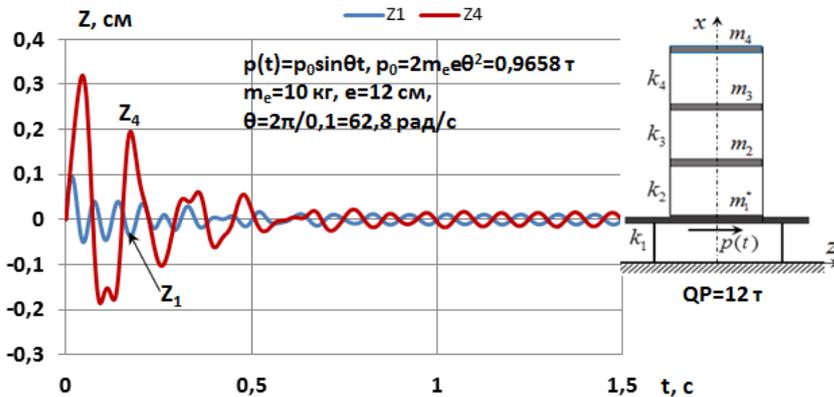
θ – зудии даври чархзании двигател.

Дар расми 14 натиҷаҳои бадастомадаи лапшишҳои маҷбурии система бо маълумоти зерин пешниҳод шудаанд: $m_e = 10$ кг, $e = 12$ см, $\theta = 62,8$ рад/с ва $\mu = 0,1$. Аз графикҳо дида мешавад, ки лапшишҳои платформа (хатти z_1) хусусияти қариб гармоникӣ дорад. Дар ҳоле ки лапшишҳои массаи m_2 (хатти z_2) хусусияти мураккабтарро дар тағйирёбӣ нишон медиҳад. Ин эҳтимолан бо таъсири қувваи соиш - лағжиш ба массаи m_2 вобаста аст, ки ба назар массаи m_1 хеле камтар аст.



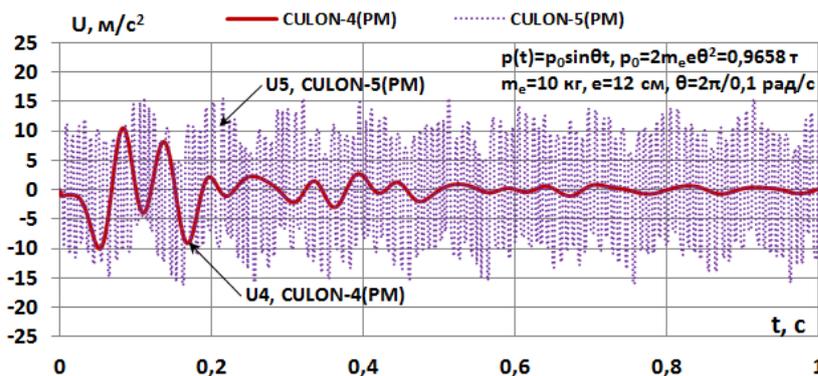
Расми 14. Графики ҷойивазкунӣ системҳо бо дарназардошти лағжиши байни массаҳои m_1 ва m_2 , $\mu = 0,1$

Дар расми 15 натиҷаҳои ҳалли ададии масъалаи динамикии система зери таъсири бори ларзишӣ дар сурати набудани лағжиш, вақте ки массаҳо дар ҳолати «часпидагӣ» қарор доранд, нишон дода шудаанд. Дар расми 16 натиҷаҳои ҳалли ададӣ оид ба муайян кардани шитобҳо пешниҳод гардидаанд.



Расми 15. Графики ҷойивазкунии системаҳо аз борҳои ларзишӣ ҳангоми набудани лағжиш, $\mu = 0,1$

Ба осонӣ дидан мумкин аст, ки манзараи (картина) раванди ларзиши система аз натиҷаҳо, ки дар расми 14 оварда шудаанд, ба таври назаррас фарқ мекунад.

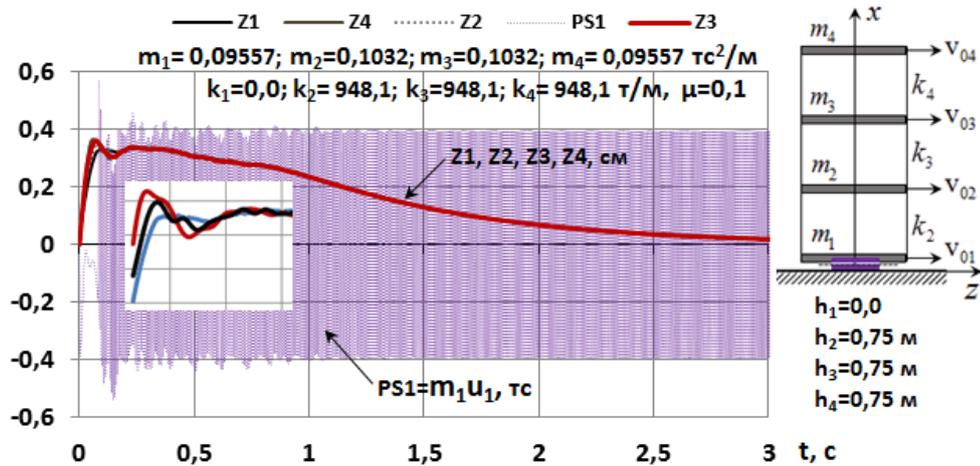


Расми 16. Графики шитобҳо ($QP = 12т$), $\mu = 0,1$

Аз муқоисаи натиҷаҳо, ки дар расми 13 оварда шудаанд, бармеояд, ки графики тағйирёбии шитобҳо дар нуқтаи татбиқи массаи m_5 модели бо камарбанди лағжишӣ ба таври назаррас аз графики монанди модели бидуни ҳисоб намудани лағжиш фарқ мекунад.

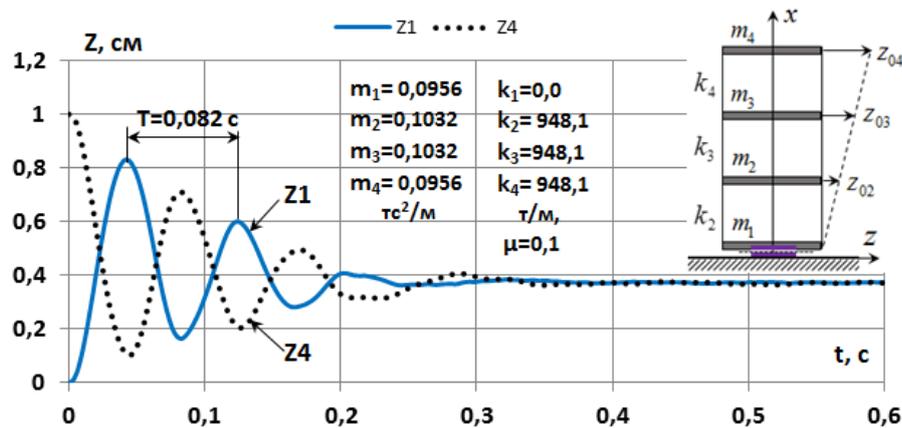
3.8. Таҳқиқи лапшишҳои озод ва маҷбурии модели бино бо камарбанди лағжишӣ. Тахмин меравад, ки сатҳи лағжиш дар сатҳи плитаи таҳқурсӣ ҷойгир аст, ки ин ҳолат ба сурате мувофиқ аст, ки саҳтии сутунҳои платформа, ки модели бино рӯи он насб шудааст, ба беохир майл мекунад. Аз натиҷаҳои бадастомада (расми 17) бармеояд, ки бо

суръати ибтидоии якхела барои ҳамаи массаҳои модел лаппишҳо нисбат ба ҷойивазкунии сифрӣ анҷом намедихад. Дар ин ҳолат, шитобҳои массаи m_1 хусусияти тағйирёбии басомади баланд доранд.



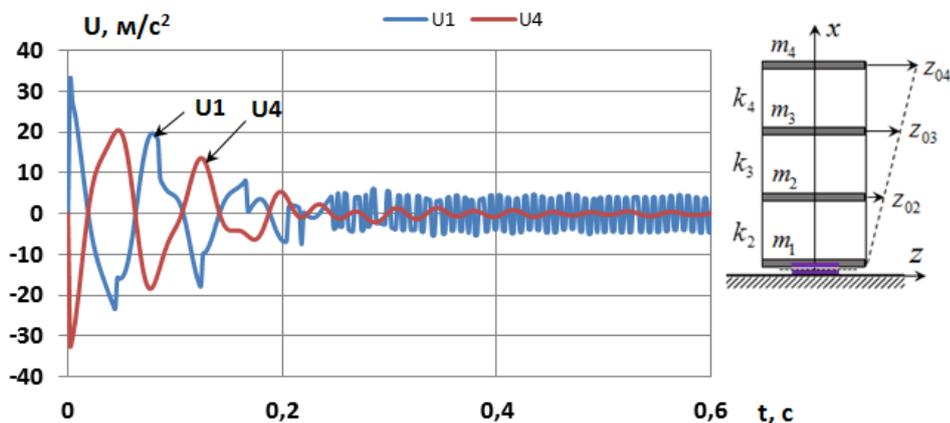
Расми 17. Графики лаппишҳои озод (QP = 12т)

Графикҳои лаппишҳои озоди модел, ки аз ҷойивазкунии ибтидоии тақсимшуда тавассути қонуни хаттӣ ба даст оварда шудаанд, дар расми 18 пешниҳод шудаанд.



Расми 18. Графики лаппишҳои озод (QP = 12т)

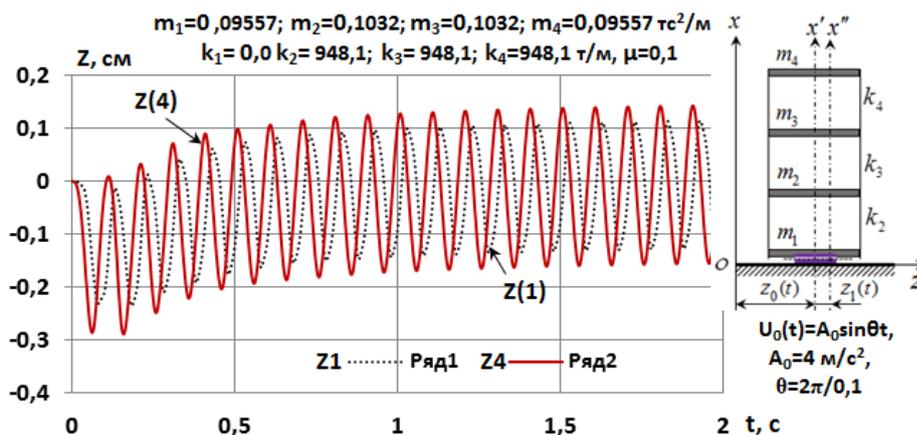
Дар ин ҷо низ раванди лаппишӣ нисбат ба ҷойивазкунии сифрӣ рӯй навода, балки бо ҷойивазкунии ба тарафи рост ба андозаи $z_0=0,4$ см сурат мегирад. Дар расми 19 графикҳои тағйирёбии шитобҳо дар тули вақт дар нуқтаҳои татбиқи m_1 ва m_4 аз ҷойивазкунии ибтидоии додасуда оварда шудаанд.



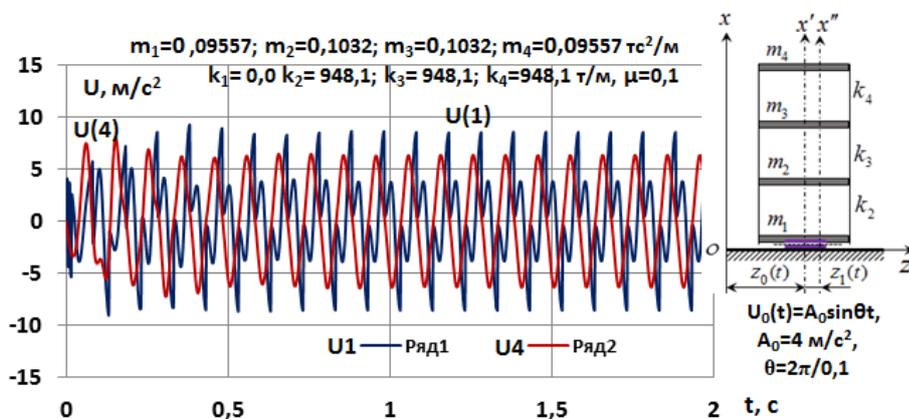
Расми 19. Графики шитобҳо (QP = 12т)

Натиҷаҳои ҳалли ададии масъалаи динамикӣ, ки дар он модели бино таъсири озорҳои (возмущение) кинематикӣ аз сар мегузаронад, ба даст оварда шудаанд. Дар расмҳои 20 ва 21 графикҳои тағйирёбии ҷойивазкуниҳо ва шитобҳо дар тули вақт, ки аз шитоби додасудаи асос ба намуди функсияи $\ddot{z}_0(t) = A_0 \sin \theta t$ ба даст оварда шудаанд, пешниҳод шудаанд.

Дар инҷо $A_0 = 4 \text{ м/с}^2$, $\theta = 2\pi / 0,1 = 62,8 \text{ рад/с}$.



Расми 20. Графикҳои ҷойивазкуниҳо ($QR=12\tau$)



Расми 21. Графикҳои шитобҳо ($QR=12\tau$)

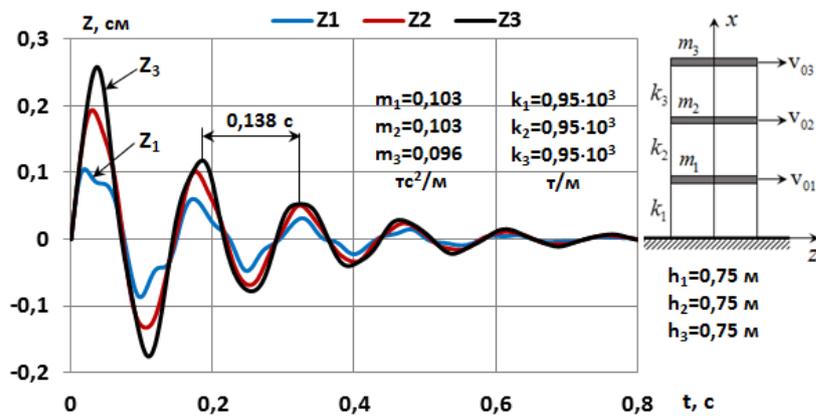
Таъсири кинематикӣ инчунин метавон ба шакли зерин ифода кард

$$z_0(t) = A_0 \sin \theta t, \quad \dot{z}_0(t) = \theta A_0 \cos \theta t, \quad \ddot{z}_0(t) = -\theta^2 A_0 \sin \theta t,$$

$$A_0 = 0,4g / \theta^2, \quad \theta = 2\pi / T$$

ки дар он даври лапшишҳо T_1 -ро вобаста ба даври асосии лапшишҳои озоди объекти таҳқиқшаванда T муқаррар кардан мумкин аст. Масалан, агар $\theta = 0,8\omega$ қабул кунем, он гоҳ $T = 1,25T_1$ мешавад.

3.9. Таҳқиқи модели бино бо се массаи мутамарказонидашуда, ки ба асос саҳт пайваст аст. Модели биноеро баррасӣ мекунем, ки ба асос саҳт пайваст аст. Графикҳои лапшишҳои озоди чунин модел, ки аз суръати ибтидоӣ ба даст оварда шудаанд, дар расми 22 пешниҳод шудаанд.



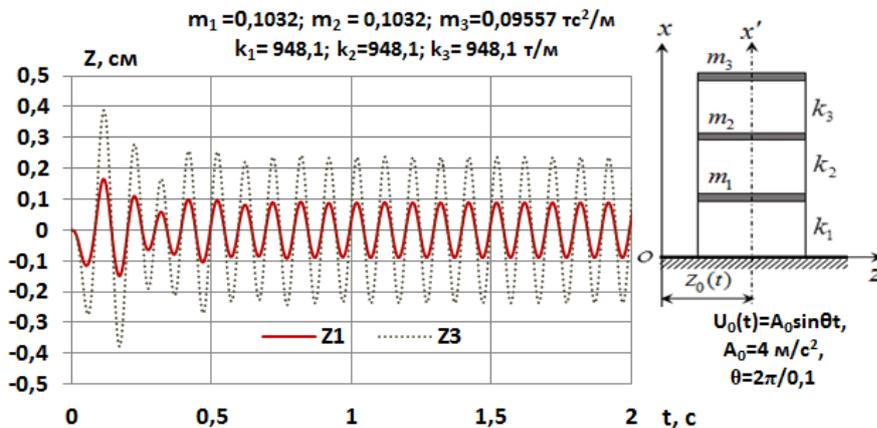
Расми 22. Графикҳои лаппишҳои озод ($QR = 12\tau$)

Дар расмҳои 23 ва 24 графикҳои ҷойивазкуниҳо ва шитобҳои модел, ки аз озорҳои кинематикии асос ба даст оварда шудаанд.

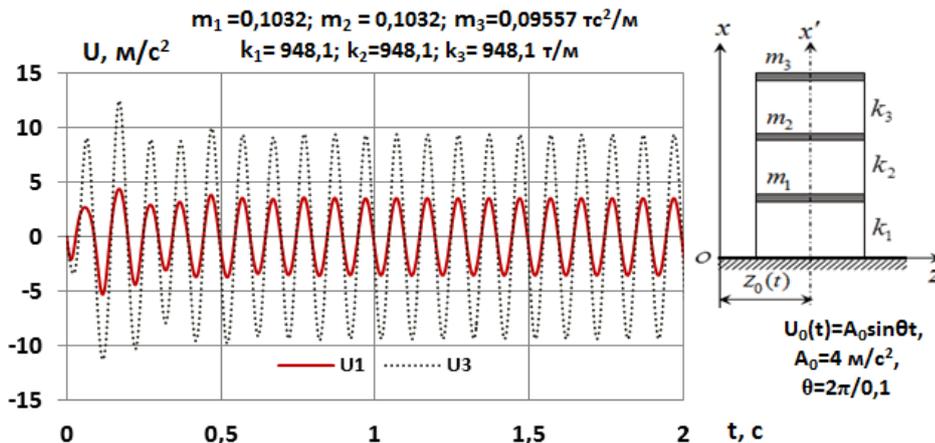
$$\ddot{z}_0(t) = A_0 \sin \theta t,$$

дар ин ҷо

$$A_0 = 4 \text{ м/с}^2, \quad \theta = 2\pi/0,1 = 62,8 \text{ рад/с.}$$



Расми 23. Графикҳои ҷойивазкуниҳо ($QR = 12\tau$)



Расми 24. Графикҳои шитобҳо ($QR = 12\tau$)

3.10. Моделсозии адабии биноҳои дорон ҷудокунакҳои сеймикӣ бо таҷяғҳои лағжишии оғузари. Модели ҳисобии бинои бисёррошён ба таҷяғҳои лағжишии јағузариро баррасӣ мекунем. Барои ба даст овардани муодилаҳои ҳаракати система схемаи асосии усули ҷойивазкуниҳо истифода мешавад. Барои массаи таҷяғҳои $m_b = m_1$ бо дарназардошти хомушкунӣ (демферӣ) муодилаи тавозуни динамикӣ шакли зеринро ба худ мегирад

$$m_1(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1) + c_h \dot{u}_1 + F + r_{12} u_2 = 0, \quad (55)$$

Қувваи F , ки аз ҷамъи ду қувва иборат аст, ба шакли зерин мебошад:

$$F = k_h \cdot u_1 + \mu Q \cos \alpha \cdot \text{sgn}(\dot{u}_0 - \dot{u}_1), \quad (56)$$

$$k_h = k_1 = Q/R,$$

дар инҷо $\text{sgn}(\dot{u}_0 - \dot{u}_1)$ – функсияи пора-доимӣ ва токи аргументи ҳақиқӣ бо майдони муайянкунӣ $(-\infty; +\infty)$ ва майдони қиматҳои $(-1; 0; +1)$ мебошад,

\dot{u}_0 – суръати ҳаракати асоси бино,

\dot{u}_1 – суръати ҳаракати массаи m_1 .

Шакли матритсии системаи муодилаҳои (3.64) - (3.66) ба таври зерин ифода карда мешавад

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{I}(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1), \quad (57)$$

дар ин ҷо $\mathbf{M} = \text{diag}(m_1 \ m_2 \ \dots \ m_n)$ – матритсаи диагоналии масс,

\mathbf{I} – вектори воҳидии таъсир,

\mathbf{C} – матритсаи хомушкунӣ.

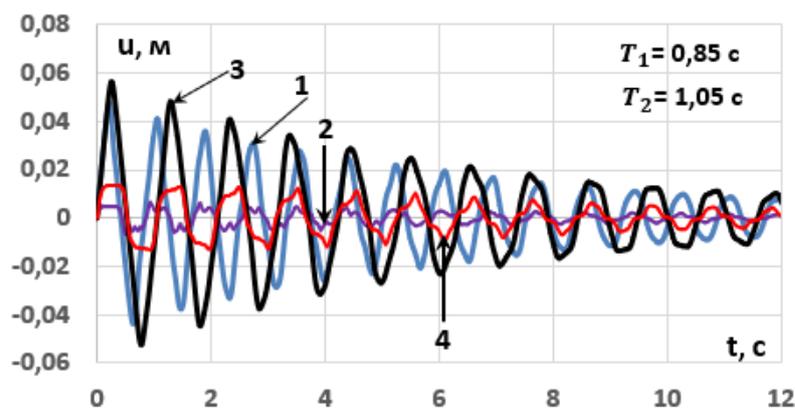
Матритсаи хомушкуниро дар муодилаи (57), ки рафтори қисми болоии биноро тавсиф медиҳад, дар тақриби аввал мутаносиби матритсаи масса ҳисобидан мумкин аст.

$$\mathbf{C} = \text{diag}(m_2 \ m_3 \ \dots \ m_n) \times a$$

дар ин ҷо a – коэффитсиенти пропорционалӣ.

Моделисозии ададии масъалаи динамикии бино бо тақягоҳи якоғузари чодокунаки сейсмикӣ бо усули такмилҳои пайдарпай амалӣ карда мешавад.

3.11. Таҳқиқи модели динамикии бино аз таъсири импулси лаҳзагӣ. Чун объекти таҳқиқот бинои синҷии 10-ошёна қабул карда шудааст. Асосан дар модели математикии таҳияшуда алгоритме амалӣ карда шуд, ки дар барномаи **FPB-1 (Friction Pendulum Bearings)** таҷассум ёфт. Ҳисобҳо барои ду варианти конструксия анҷом дода шуданд: бинои анъанавӣ (модели M1) ва бино бо тақягоҳи фриксионӣ (модели M2). Дар расми 25 пешниҳод карда шудаанд: барои модели M1: ҷойивазкунии массаҳои m_1 (хатти 2) ва m_{10} (хатти 1); барои модели M2: ҷойивазкунии массаи тақягоҳӣ $m_b = m_1$ (хатти 4) ва массаи m_{11} (хатти 3).



Расми 25. Муқоисаи натиҷаҳои лапшиши модели бино

Дар боби чорум «ҲАЛЛИ АДАДИИ МАСЪАЛАҲОИ ДИНАМИКИИ БИНОҲОИ ДОРОИ ҶУДОКУНАКҲОИ СЕЙСМИКӢ БО МЕТОДИ МУТАМАРКАЗКУНОНИИ ДЕФОРМАТСИЯҲО» ҳалли масъалаи динамикии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо истифода аз методи мутамарказкунонии деформатсияҳо баррасӣ мешавад. Модели динамикии бино бо ҷудокунакҳои сейсмикӣ аз таъсиротҳои гуногуни динамикӣ таҳқиқ меёбад. Бо методи

мутамакказкунонии деформатсияҳо матритсаи сахтии берунаи объекти таҳқиқшаванда ташкил дода шудааст. Ин боб аз 10 бахш иборат буда, бо хулосаҳо ба поён мерасад.

4.1. Таҳқиқи кори ғайрихаттии ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар асоси модели гистерезисӣ Bouc-Wen. Модели динамикии бино се ҷузъи асосиро дар бар мегирад: зерсохтор, ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва болосохтор. Муодилаи ҳаракати болосохтор дар ҷаҳри-ҷубии ин модел ба шакли матритсаи ҷунинанд

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{W}}_s + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{W}}_s + \mathbf{K}_s \mathbf{W}_s = -\mathbf{M}_s \mathbf{I}(\ddot{\mathbf{z}}_g + \ddot{\mathbf{w}}_b) \quad (58)$$

дар инҷо $\mathbf{M}_s, \mathbf{C}_s, \mathbf{K}_s$ - матритсаи диагоналии массаҳо, матритсаҳои хомушкунӣ ва сахтӣ,

Муодилаи ҳаракати массаи m_b ба шакли зерин навишта мешавад

$$m_b \ddot{w}_b + f_b - k_1 w_1 - c_1 \dot{w}_1 = -m_b \ddot{z}_g, \quad (59)$$

дар ин ҷо f_b - қувваи барқароркунандаи ҷудокунаки сейсмикӣ,

k_1, c_1 - коэффитсиентҳои сахтӣ ва хомушкунӣ ошонаи якум.

Барои анҷом додани ҳисобҳо барномаи компютерӣ таҳия карда шуд, ки бо ёрии он натиҷаҳо барои модели динамикии бино бо таъягоҳҳои резинӣ-филизӣ ба даст оварда шуданд.

4.2. Амалӣ кардани модели ғайрихаттӣ. Ҷун объекти таҳқиқот бинои синҷии 10-ошона баррасӣ шудааст. Муҳофизати заминларзаи бино бо истифода аз 28 таъягоҳи резинӣ-филизии модели SI-H 500/102 истеҳсоли "FIP Industriale" амалӣ карда шудааст. Тахмин меравад, ки массаҳо дар сатҳи тахтасангҳо марказонида шудаанд ва фақат як дараҷаи озод дар самти уфуқӣ доранд. Дар асоси ин, барои ташкил додани матритсаи сахтӣ системаи асосии усули ҷойивазкуниҳо истифода мешавад.

Барномаи компютерӣ таҳия ва натиҷаҳои ҳисобкунии бинои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ аз акселерограммаи додашуда ба даст оварда шуданд.

4.3. Модели хаттӣ бо сахтии самарабахш. Мувофиқи талаботи Uniform Building Code, вобастагии ғайрихаттии қувваи барқароркунандаро мумкин аст бо модели хаттии баробарқимат, ки параметрҳои сахтии оптималии самарабахш ва хомушкунӣ чандрии самарабахшро истифода мебарад, иваз кард. Системаи муодилаҳои дифференсиалии модели бино бо таъягоҳҳои резинӣ-филизӣ, бо ин фараз, ки ҳар як масса як дараҷаи озоди хаттӣ дорад, ба шакли зерин навишта карда мешавад

$$\begin{aligned} m_b \ddot{w}_b + c_b \dot{w}_b + f_b - c_1 \dot{w}_1 - k_1 w_1 &= -m_b \ddot{z}_0, \\ m_1 \ddot{w}_1 + c_1 \dot{w}_1 + k_1 w_1 - c_2 (\dot{w}_2 - \dot{w}_1) - k_2 (w_2 - w_1) &= -m_1 (\ddot{z}_0 + \ddot{w}_b), \\ m_j \ddot{w}_j + c_j (\dot{w}_j - \dot{w}_{j-1}) + k_j (w_j - w_{j-1}) - \\ - c_{j+1} (\dot{w}_{j+1} - \dot{w}_j) - k_{j+1} (w_{j+1} - w_j) &= -m_j (\ddot{z}_0 + \ddot{w}_b), \\ j &= 2, 3, \dots, n-1, \\ m_n \ddot{w}_n + c_n (\dot{w}_n - \dot{w}_{n-1}) + k_n (w_n - w_{n-1}) &= -m_n (\ddot{z}_0 + \ddot{w}_b), \end{aligned} \quad (60)$$

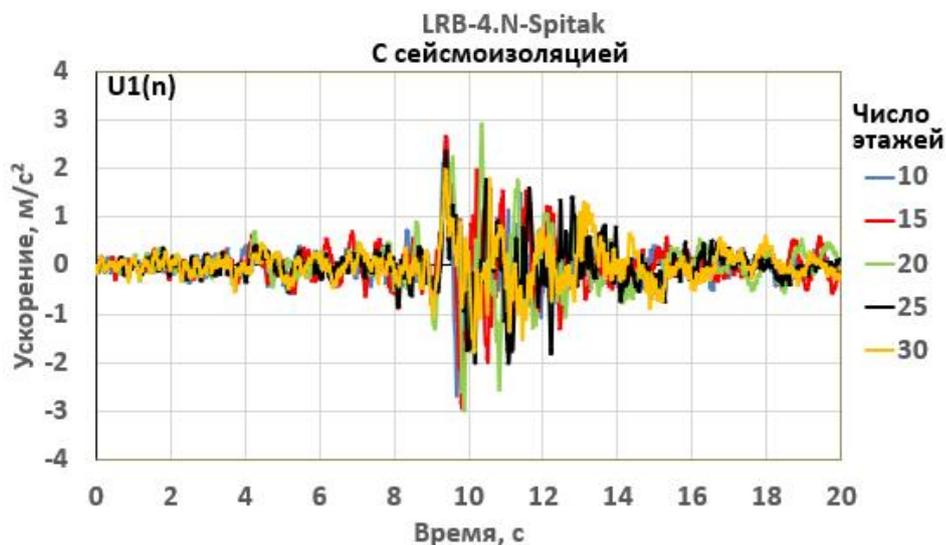
дар ин ҷо c_i, k_i - коэффитсиентҳои хомушкунӣ ва сахтӣ,

4.4. Амалӣ намудани модели хаттӣ. Ҷун объект барои таҳқиқи лаппишҳои озод бинои синҷии 10-ошона баррасӣ мешавад. Аз натиҷаҳои бадаст омада бармеояд, ки даври лаппишҳои модели бо ҷудокунакҳои сейсмикӣ қариб се баробар зиёдтар аз модели бино бо занҷири таҳгирии дар қисми таъягоҳӣ мебошад. Дар ин ҳолат, амплитудаҳои шитобҳо тақрибан 25% фарқ мекунанд. Дар оянда конструксияи синҷии бино аз таъсири кинематикии гармоникӣ ба асос таҳқиқ меёбад. Инчунин моделисозии адабии рафтори динамикии бинои ҷудокунакҳои сейсмикӣ дошта аз таъсири заминларза, ки бо акселерограммаҳо муқаррар карда шудааст, анҷом дода шуд. Алгоритми таҳияшуда имкон дод, ки натиҷаҳо барои ду навъи таъсиротҳо ба даст оянд: акселерограммаи сохтаи SA-482 ва сабти эталонии El Centro. Таҳлили муқоисавӣ аз ду баробар зиёд будани шитобҳои қуллавӣ дар модели сахт аз таъсири сохташуда нисбат ба

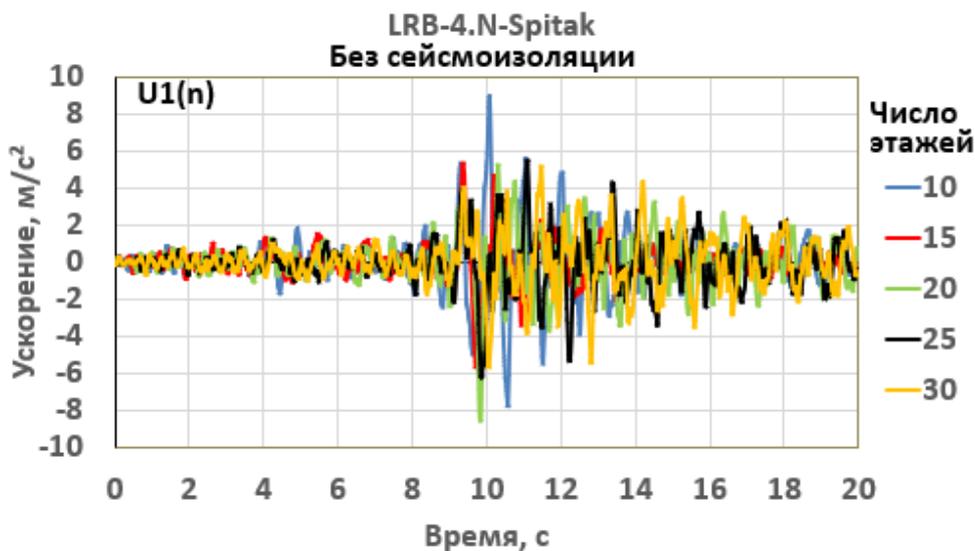
эталонӣ ошкор кард. Таҳқиқоти ададии гузаронидашуда бо истифода аз барномаи компютерӣ таҳияшуда ба таври боэътимод самаранокии тақягоҳҳои ҷудокунакҳои сейсмикӣ резинӣ-филизиро барои муҳофизати биноҳо аз таъсиротҳои заминларза тасдиқ мекунад.

Барои таҳлили таъсири шумораи ошёнаҳо ба ҳолати шиддатнокӣ-деформатсионии биноҳо аз таъсиротҳои заминларза, моделҳои динамикии биноҳои дорой ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо ошёнаҳои гуногун (10, 15, 20, 25 ва 30 ошёна), ки таъсири беруна ба акселерограммаи муайяни заминларзаро дучор меоянд, таҳқиқ меёбанд. Объекти таҳқиқот бинои синҷӣ бо андозаҳои 12×30 м мебошад. Барномаи компютерӣ таҳия ва лаппишҳои озод ва маҷбурии моделҳои динамикии биноҳо бо гуногун коэффитсиенти саҳтии самарабахши TRM ва таъсиротҳои гуногун таҳқиқ ёфтаанд.

Натиҷаҳо аз таъсири беруна ба намуди акселерограммаи аналогии заминларзай Спитак (07.12.1988) бо шитоби куллавии 2,9 м/с² ва қадами рақамсозӣ 0,05 с, бо тулонии сабт – 20 с, ба даст оварда шуданд. Дар расмҳои 26 ва 27 графикҳои тағйирёбии шитоби массаи m_n барои биноҳои бо шумораи гуногуни ошёна, дар шароити дигари баробар, пешниҳод шудаанд. Муқоиса нишон медиҳад, ки қиматҳои шитоб дар биноҳои дорой ҷудокунакҳои сейсмикӣ ба назар аз моделҳои биноҳо бо тақягоҳҳои саҳт хеле камтар мебошанд.



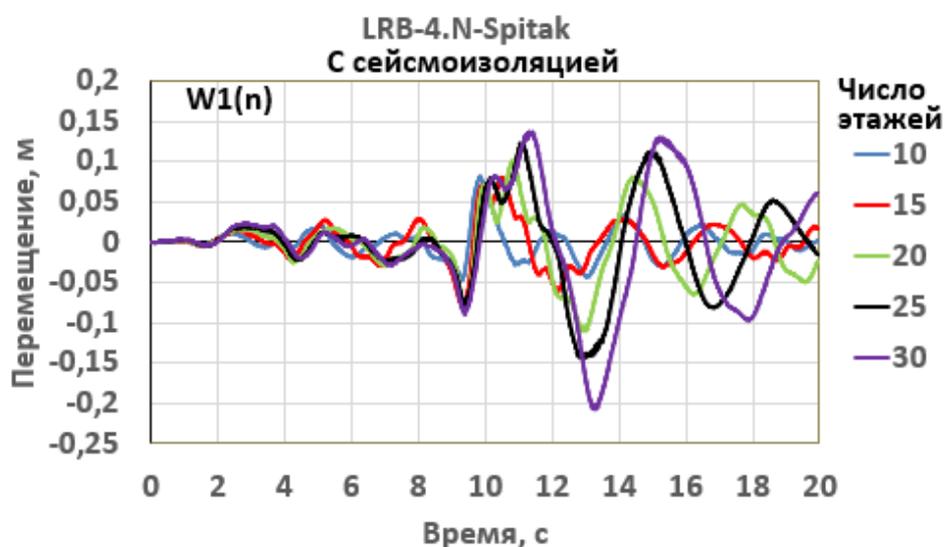
Расми 26. Графикҳои шитоби массаи m_n бинои дорой ҷудокунаки сейсмикӣ



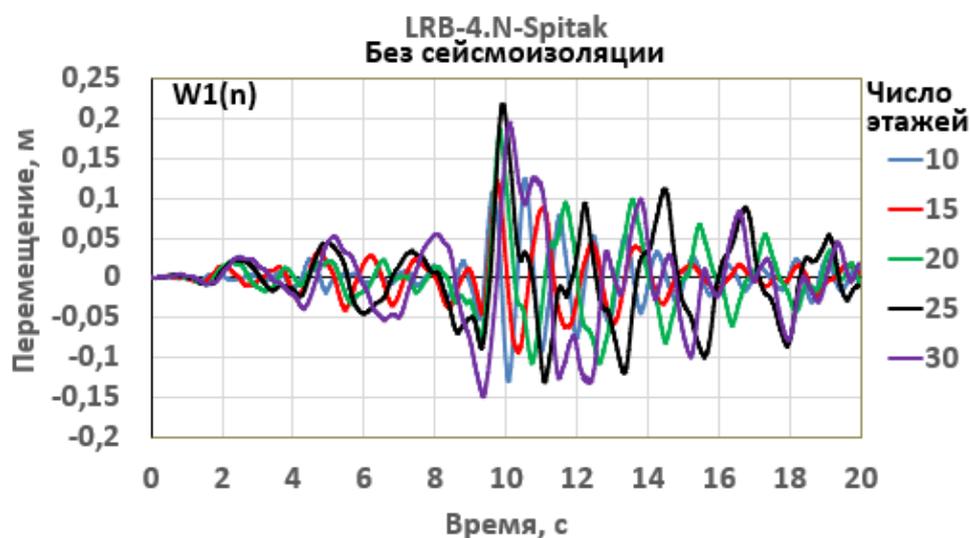
Расми 27. Графикҳои шитоби массаи m_n бинои бе ҷудокунаки сейсмикӣ

Дар расмҳои 28 ва 29 графикҳои тағйирёбии ҷойивазкуниҳои нисбӣ оварда шудаанд. Муқоиса нишон медиҳад, ки қиматҳои куллавии ҷойивазкуниҳо дар моделҳои бо ҷудокунакҳои сейсмикӣ каме дертар аз моделҳои бе ҷудокунакҳои сейсмикӣ рух медиҳанд (шиқоби куллавии акселерограммаи Spitak ба лаҳзаи вақти $t = 9,4$ с мувофиқ аст).

Аз ин ру, дар биноҳои бо ТРФ ақсуламал ба намуди ҷойивазкунии уфуқӣ бо як қадар кафомони рух медиҳад. Инчунин қайд кардан зарур аст, ки ҷойивазкунии мутлақ дар бинои дорой ҷудокунакҳои сейсмикӣ аз ҳосили ҷамъи $W_b + W_n$, иборат аст, аз ин ру $W_{si} > W_{fb}$.



Расми 28. Графикҳои ҷойивазкунии массаи m_n бинои дорой ҷудокунаки сейсмикӣ



Расми 29. Графикҳои ҷойивазкунии массаи m_n бинои бе ҷудокунакҳои сейсмикӣ

4.5. Моделсозии баҳамтаъсирии бино ба асос бо методи мутамарказкунонии деформатсияҳо. Дар назарияи заминчунбӣ яке аз масъалаҳои асосии ин коркарди модели ҳисобии системаи «бино-хокӣ асос» мебошад. Тахмин карда мешавад, ки таъсири сейсмикӣ ба асос дар намуди яккомпонентаи ҳаракати хаттӣ пешниҳод карда мешавад ва модели ҳисобие, ки қабул карда мешавад, ҳар як массаи он чор дараҷаи озод дорад.

Системаи муодилаҳои дифференсиалии ҳаракати ҳамин модел мумкин аст ба шакли матритсӣ пешниҳод карда шавад

$$M\ddot{V} + D\dot{V} + KV = -P. \quad (61)$$

Дар ин чо

$$\mathbf{M} = \text{diag}(m_{1x}, J_{1y}, m_{1z}, J_{1x}, \dots, m_{nx}, J_{ny}, m_{nz}, J_{nx}),$$

$$\mathbf{P} = (m_{1x} \times \ddot{u}_o, J_{y1} \times \ddot{\beta}_0, m_{1z} \times \ddot{w}_o, J_{x1} \times \ddot{\alpha}_0, \dots,$$

$$\dots, m_{nx} \times \ddot{u}_o, J_{yn} \times \ddot{\beta}_0, m_{nz} \times \ddot{w}_o, J_{xn} \times \ddot{\alpha}_0).$$

$$\dot{\mathbf{V}} = (u_1, \varphi_1, w_1, \theta_1, \dots, u_n, \varphi_n, w_n, \theta_n),$$

$$\ddot{\mathbf{V}} = (\dot{u}_1, \dot{\varphi}_1, \dot{w}_1, \dot{\theta}_1, \dots, \dot{u}_n, \dot{\varphi}_n, \dot{w}_n, \dot{\theta}_n),$$

$$\ddot{\mathbf{V}} = (\ddot{u}_1, \ddot{\varphi}_1, \ddot{w}_1, \ddot{\theta}_1, \dots, \ddot{u}_n, \ddot{\varphi}_n, \ddot{w}_n, \ddot{\theta}_n),$$

Баъди ивази векторҳои суръат ва шитоб дар (61) мутобиқан бо функсияҳои аппроксиматсионӣ

$$\ddot{\mathbf{V}}_{n+1} = \frac{\alpha_1}{\tau^2} (\mathbf{V}_{n+1} - \mathbf{V}_n) - \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{\mathbf{V}}_n - \alpha_3 \ddot{\mathbf{V}}_n,$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{n+1} = \frac{\beta_1}{\tau} (\mathbf{V}_{n+1} - \mathbf{V}_n) - \beta_2 \dot{\mathbf{V}}_n - \tau \beta_3 \ddot{\mathbf{V}}_n,$$

системаи муодилаҳои зеринро пайдо мекунем

$$\mathbf{K}^* \mathbf{V}_{n+1} = \mathbf{P}_{n+1}^*,$$

ки дар он вектори аъзои озод ба намуди зерин навишта мешавад

$$\mathbf{P}_{n+1}^* = \mathbf{P}_{n+1} + \alpha_1^* \mathbf{M} \mathbf{V}_n + \alpha_2^* \mathbf{M} \dot{\mathbf{V}}_n + \alpha_3^* \mathbf{M} \ddot{\mathbf{V}}_n +$$

$$+ \beta_1^* \mathbf{D} \mathbf{V}_n + \beta_2^* \mathbf{D} \dot{\mathbf{V}}_n + \tau \beta_3^* \mathbf{D} \ddot{\mathbf{V}}_n - \mathbf{M}^* \ddot{\Psi}_0(t), \quad (62)$$

дар ин чо $\alpha_1^* = \alpha_1 / \tau^2$; $\alpha_2^* = \alpha_2 / \tau$; $\beta_1^* = \beta_1 / \tau$;

$\alpha_1 = \alpha_2 = 4$, $\alpha_3 = 1$, $\beta_1 = 2$, $\beta_2 = 1$, $\beta_3 = 0$ - коэффитсиентҳои аппроксиматсия.

Вектори аъзои озоди (62) ба чунин шакл навиштан мумкин аст

$$\mathbf{P}_{n+1}^* = \mathbf{P}_{n+1} + \mathbf{M} \mathbf{a}_n + \mathbf{D} \mathbf{b}_n - \mathbf{M}^* \ddot{\Psi}_0(t), \quad (63)$$

$$\mathbf{M}^* = (\mathbf{m}_1^* \mathbf{m}_2^* \mathbf{m}_3^* \dots \mathbf{m}_n^*), \quad \mathbf{m}_i^* = \text{diag}(m_{ix}, J_{iy}, m_{iz}, J_{ix}),$$

$$\ddot{\Psi}_0 = (\ddot{u}_0, \ddot{\beta}_0, \ddot{w}_0, \ddot{\alpha}_0),$$

$$\mathbf{a}_n = \alpha_1^* \mathbf{V}_n + \alpha_2^* \dot{\mathbf{V}}_n + \alpha_3^* \ddot{\mathbf{V}}_n,$$

$$\mathbf{b}_n = \beta_1^* \mathbf{V}_n + \beta_2^* \dot{\mathbf{V}}_n + \tau \beta_3^* \ddot{\mathbf{V}}_n,$$

Ҳалли системаи муодилаи динамикӣ

$$\mathbf{K}^* \mathbf{V}_{n+1} = \mathbf{P}_{n+1}^* \quad (64)$$

мумкин аст ба тарзи итератсионӣ пешниҳод шавад. Бо ин мақсад (64) ба намуди зерин навишта мешавад

$$\sum_{j=1}^n k_{ij}^* v_j = p_i^*. \quad (65)$$

Он вақт системаи додашуда ба системаи овардашуда эквивалентӣ мебошад

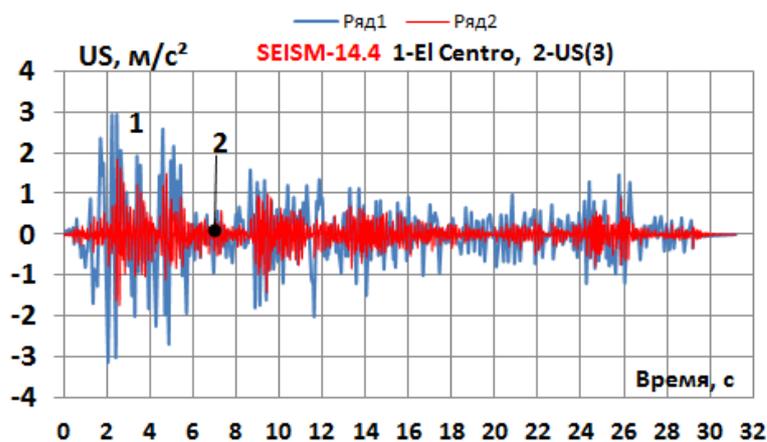
$$v_i = p_i + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} v_j. \quad (66)$$

Баъдан тахмин мекунем, ки k -и наздикшавии $v_i^{(k)}$ решаҳо маълум астанд ва мутобиқи Зейдел $(k+1)$ -и наздикшавиירו сохта, решаҳоро бо формулаи зерин меёбем

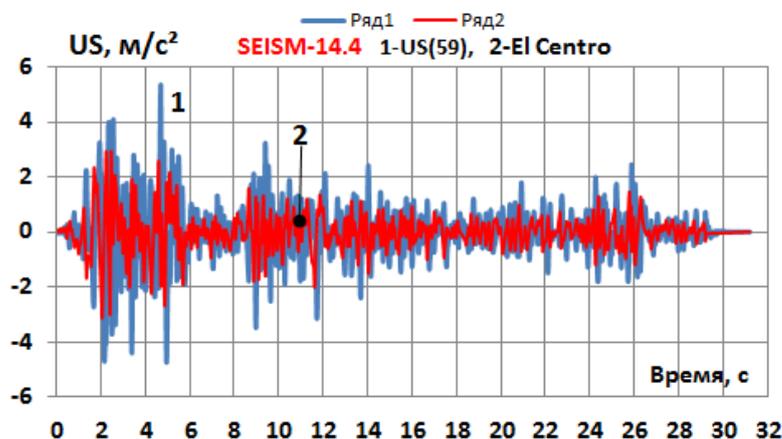
$$v_i^{(k+1)} = p_i + \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{ij} v_j^{(k+1)} + \sum_{j=i}^n \alpha_{ij} v_j^{(k)}, \quad (67)$$

Аз ҳалли (67) компонентҳои вектори ҷойивазкунӣ, баъдан вектори деформатсияҳо ва қувваҳои дохилиро ҳисоб мекунем. Хусусияти асосии модели пешниҳод шуда дар он аст, ки имкон медиҳад, ҳолати шиддатнокӣ-деформатсионии бино ҳангоми таъсири бисёркомпонентаи сейсмикӣ бо дарназардошти гардиш ва чархзании масса муайян карда шавад.

Барномаи компютери **SEISM-14.4** ба забони ФОРТРАН таҳия карда шудааст ва натиҷаҳои моделкунонии ададии бинои 14 ошӯнаи синҷӣ аз таъсири сейсмикӣ ба намуди акселорограммаи додашудаи **El Centro** бадаст оварда шудааст. Дар расмҳои 30 ва 31 графикаи тағйирёбии шитоби тахтасанги таҳкурсӣ ва тахтасанги бомпуш нишон дода шудааст.



Расми 30. Шитоби хатии тахтасанги таҳкурсӣ дар тирӣ z

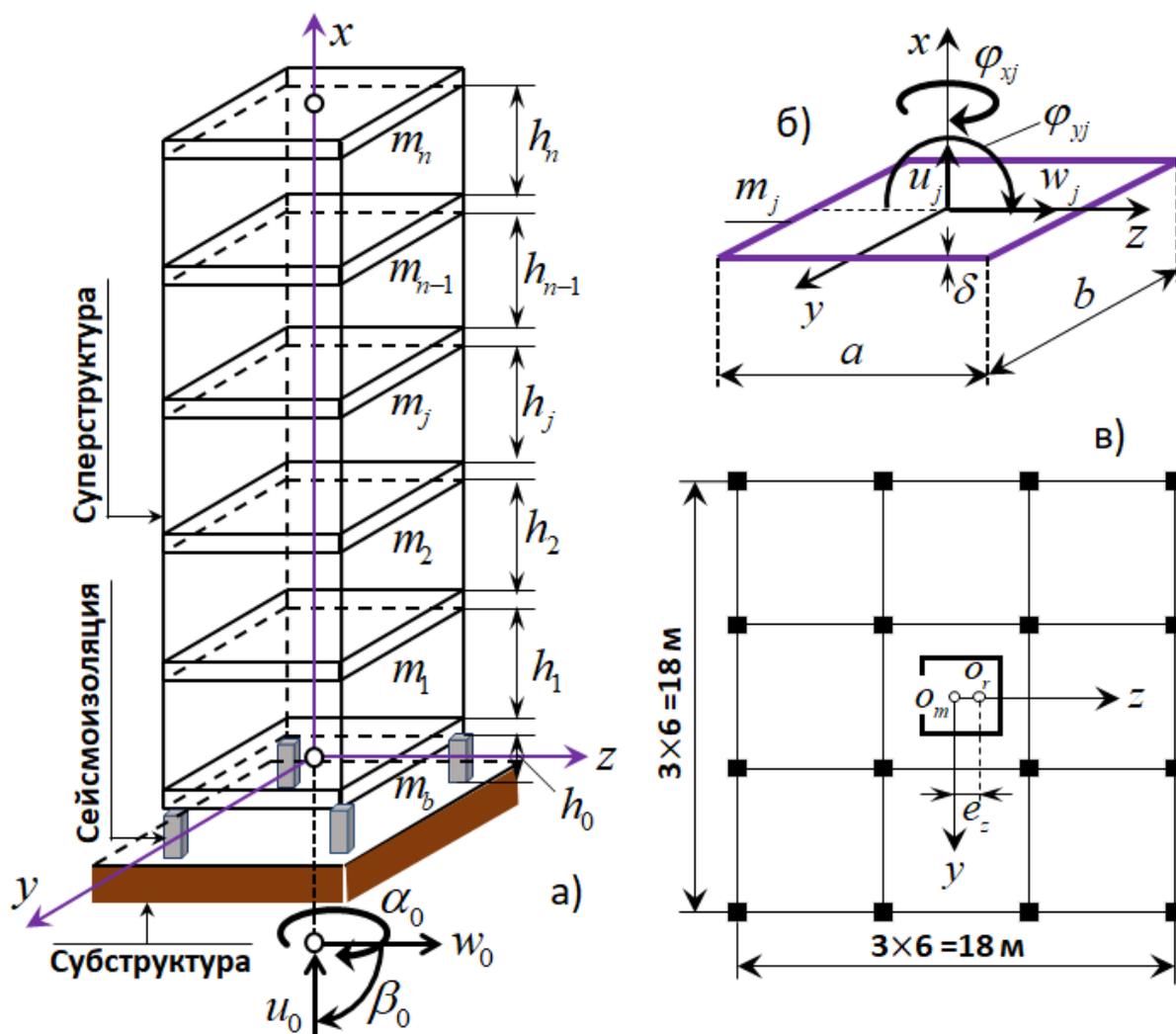


Расми 31. Шитоби хатии тахтасанги бомпуш дар тирӣ z

Муқоисаҳо нишон медиҳанд, ки шитоби максималии тахтасанги таҳкурсӣ тахминан якуним баробар камтар аз шитоби заминчунбӣ ва шитоби максималии тахтасанги болопуш, баръакс якуним баробар зиёдтар аст.

4.6. Таъсири бисёркомпонентаи сейсмикӣ дар асоси методи мутамарказкунонии деформатсияҳо. Модели ҳисобии бинои доройи ҷудокунакҳои сейсмикӣ баррасишаванда массаҳоро дар сатҳи тахтасангҳо марказонидашуда пешбинӣ мекунад, ки дар он ҳар як массаи инертсионӣ чор дараҷаи озод дорад: дутои кунҷӣ (φ, θ) ва дутои хаттӣ (u, w). Модели динамикӣ таъсири бисёркомпонентаи кинематикӣ ба қисми таъяғҳои конструктсия, ки дар расми 32 нишон дода шудааст, ба назар мегирад.

$$U_0(t) = (u_0 \ \beta_0 \ w_0 \ \alpha_0)^T,$$



Расми 32. Модели динамикии бинои дорои ҷудокунаки сейсмиқӣ

Таҳлили тавозуни динамикии массаи инертсионии j -уми бино, ки эксцентриситети e_z байни марказҳои масса o_m ва саҳти o_r -ро ба назар мегирад, имкон медиҳад, ки дар асоси системаи асосии усули ҷойивазкуниҳо системаи матритсии муодилаҳои зерин ба даст оварда шавад

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}[\ddot{\mathbf{U}}_0(t) + \ddot{\mathbf{U}}_b(t)], \quad (68)$$

$$\ddot{\mathbf{U}}_0(t) = (\ddot{u}_0 \quad \ddot{\varphi}_0 \quad \ddot{w}_0 \quad \ddot{\theta}_0)_j^T, \quad \ddot{\mathbf{U}}_b(t) = (\ddot{u}_b \quad \ddot{\varphi}_b \quad \ddot{w}_b \quad \ddot{\theta}_b)_j^T$$

$$\mathbf{M} = \text{diag}(m_x \quad J_y \quad m_z \quad J_x)_j, \quad \mathbf{U} = (u \quad \varphi \quad w \quad \theta)_j^T.$$

$$m_{xj} = m_{zj} = m_{pj} + m_{cj} + m_{wj} + m_{sj},$$

$$J_{yj} = \frac{\gamma\delta ba^3}{g \cdot 12} + \frac{\bar{m}_{vj}(h_j/2 + h_{j+1}/2)^3}{12}, \quad J_{xj} = \frac{\delta\gamma ab(a^2 + b^2)}{g \cdot 12},$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

Дар ин ҷо $m_{pj}, m_{cj}, m_{wj}, m_{sj}$ – массаҳои мутамарказонидашудаи тахтасанги болопуш, сутун, девор ва ядрои саҳтии мутаносибан дар сатҳи j -ум;

\bar{m}_{vj} – суммаи массаи тақсимшудаи сутун, деворҳои панелии беруна, перегородкаҳо ва ядрои саҳтӣ;

J_{yj} – моменти инертсияи масс нисбати тири y , ки аз маркази вазнини дар сатҳи j -ум;

J_{xj} – моменти кутбии диски тахтасанги болопуш;

$\ddot{u}_0, \ddot{\varphi}_0, \ddot{w}_0, \ddot{\theta}_0$ – шитобҳои хаттӣ ва кунҷии додашудаи хоки асос.

Муодилаҳои дифференсиалии тавозун барои массаи m_b тахтасанги асос, ба шакли матритсии зерин навишта карда мешаванд

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}}_b + \mathbf{F}_b - \mathbf{K}_1 \mathbf{U}_1 - \mathbf{D}_1 \dot{\mathbf{U}}_1 = -\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{U}}_0(t), \quad (69)$$

$$\mathbf{M}_b = \text{diag}(m_x, J_y, m_z, J_x)_b, \quad \mathbf{F}_b = \mathbf{K}_{eff} \mathbf{U}_b + \mathbf{D}_{eff} \dot{\mathbf{U}}_b,$$

$$J_{yj} = \frac{\gamma_b h_b b a^3}{g} \frac{1}{12}, \quad J_{xb} = \frac{h_b \gamma_b a b (a^2 + b^2)}{g} \frac{1}{12},$$

$$m_{xb} = m_{zb} = \gamma_b a b h_b / g,$$

$$\mathbf{K}_{eff} = \text{diag}(k_u, k_\varphi, k_w, k_\theta), \quad \mathbf{D}_{eff} = \text{diag}(c_u, c_\varphi, c_w, c_\theta),$$

$$\mathbf{K}_1 = \text{diag}(k_{1u}, k_{1\varphi}, k_{1w}, k_{1\theta}), \quad \mathbf{D}_1 = \text{diag}(c_{1u}, c_{1\varphi}, c_{1w}, c_{1\theta}),$$

$$\mathbf{U}_b = (u_b, \varphi_b, w_b, \theta_b)^T, \quad \mathbf{U}_1 = (u_1, \varphi_1, w_1, \theta_1)^T.$$

Дар инҷо γ_b, h_b – вазни ҳаҷм ва ғафсии тахтасанги таҳкурси;

$\mathbf{K}_{eff}, \mathbf{D}_{eff}$ – матритсаҳои диагоналии самарабахши чандрии сахтӣ ва хомушкунии моёғӣ;

$\mathbf{U}_b, \mathbf{U}_1$ – векторҳои ҷойивазкунии массаҳои инертсионӣ m_b ва m_1 мутобиқан;

$k_u, k_\varphi, k_w, k_\theta$ – коэффитсиентҳои додашудаи сахтии тақягоҳҳои резинӣ – филизӣ,

$k_{1u}, k_{1\varphi}, k_{1w}, k_{1\theta}$ – коэффитсиентҳои сахтӣ, мутобиқан унсурҳои ошёнаи якум;

\mathbf{F}_b – вектори қувваҳои барқароқунанда дар ТРФ.

Яке аз вазифаҳои асосӣ ҳалли масъалаҳои динамикии системаҳо бо шумораи охириноки дараҷаҳои озод, ташкили матритсаи сахтӣ мебошад. Дар ин ҷо барои сохтани матритсаи сахтӣ усули мутамарказкунии деформатсияҳо (ММД) истифода мешавад. Ташкили матритсаи сахтӣ дар асоси ММД ба намуди зерин оварда мешавад. Нармии пайвастиҳо, ки дар хатҳои байни унсурҳои ҳамсояи i -ум ва $i+1$ -ум марказонида шудаанд, аз ҷумла ҷузъи тартибдиҳандаҳои чархзананда, бо матритсаи шакли зерин ифода карда мешавад

$$\mathbf{G}_i = \text{diag} \left(\frac{1}{EF_{x,i,b}}, \frac{1}{EJ_{y,i,b}}, \frac{1}{GF_{z,i,b}}, \frac{1}{GJ_{x,i,b}} \right) b_i + \\ + \text{diag} \left(\frac{1}{EF_{x,i+1,b}}, \frac{1}{EJ_{y,i+1,b}}, \frac{1}{GF_{z,i+1,b}}, \frac{1}{GJ_{x,i+1,b}} \right) a_{i+1}. \quad (70)$$

Дар ин ҷо E, G – модули Юнг ва ғечиш, $b_i = a_{i+1} = h_i / 2$.

Матритсаи сахтии дарунии системаи дискретӣ, ки бо ММД ташкил дода шудааст, ба шакли зерин аст

$$\mathbf{C} = \text{diag}(\mathbf{C}_0, \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_{n-1}, \mathbf{C}_n). \quad (71)$$

Аз баробариҳои матритсӣ

$$\mathbf{P} = -\mathbf{A}\mathbf{S}, \quad \mathbf{\Lambda} = -\mathbf{A}^T \mathbf{U}, \quad \mathbf{S} = \mathbf{C}\mathbf{\Lambda},$$

бармеояд, ки

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{A}^T \mathbf{U} = \mathbf{K}\mathbf{U}, \quad \mathbf{K} = \mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{A}^T, \quad (72)$$

дар ин ҷо \mathbf{K} — матритсаи сахтии беруни.

Пас аз сохтани матритсаи \mathbf{K} бо ММД, ҳалли ададии системаи муодилаҳои (68) ва (69) имконпазир мегардад.

4.7. Модели динамикии бинои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар асоси методи мутамарказкунонии деформатсияҳо. Дар ин бахш ҳалли масъалаи динамикии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмики бо истифода аз методи мутамарказкунонии деформатсияҳо баррасӣ мешавад.

Барои системаи динамикӣ бо шумораи охиринок дараҷаҳои озод муодилаҳои тавозун дар шакли матритсӣ метавонанд ба намуди системаи ягонаи муодилаҳо ба тариқи зерин ифода карда шаванд

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{F} + \mathbf{P}, \quad (73)$$

дар инҷо $\mathbf{M}, \mathbf{D}, \mathbf{K}$ – матритсаҳои масс, демпферӣ ва сахтӣ,

$\ddot{\mathbf{U}}, \dot{\mathbf{U}}, \mathbf{U}$ – векторҳои шитоб, суръат ва ҷойивазкунӣ,

\mathbf{F} – вектори таъсироти берунӣ дар асоси бино дар сатҳи субструктура,

\mathbf{P} – вектори борҳои динамикии додасишуда.

Ҳалли ададии (73) ба системаи муодилаҳои алгебравӣ меорад, ки бо усули қадамӣ ҳал карда мешавад.

4.8. Ташкили матритсаи сахтӣ дар асоси методи мутамарказкунонии деформатсияҳо. Матритсаи сахтӣ \mathbf{K} , бо методи мутамарказкунонии деформатсияҳо сохта мешавад. Ба сифати мисол модели динамикии болорро, ки ба унсурҳои охиринок ММД тақсим шудааст, баррасӣ мекунем. Нармии пайвастиҳо байни унсурҳои ҳамсои i ва $i+1$, аз ҷумла ҷузъи чархзананда, бо матритсаи диагоналии \mathbf{B} тавсиф дода мешавад,

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{i,i+1} = \mathbf{B}_{i,b} + \mathbf{B}_{i+1,a} = \text{diag} \left(\frac{1}{EF_{ib}}, \frac{1}{EJ_{yi,b}}, \frac{1}{GF_{zi,b}}, \frac{1}{GJ_{pi}} \right) \cdot b_i + \\ + \text{diag} \left(\frac{1}{EF_{i+1,a}}, \frac{1}{EJ_{yi+1,a}}, \frac{1}{GF_{zi+1,b}}, \frac{1}{GJ_{pi+1}} \right) \cdot a_{i+1}, \end{aligned} \quad (74)$$

$(i=1,3,\dots,n-1),$

дар ин ҷо $J_p = J_x$ – моменти инерсияи қутбии бурриши болор.

Матритсаи сахтии дарунии конструктсия, мувофиқи қори Ржаницын, шакли зеринро дорад

$$\mathbf{C}_{i,i+1} = \mathbf{B}_{i,i+1}^{-1} = \text{diag} \left(EF_{i,i+1}, EJ_{yi,i+1}, GF_{zi,i+1}, GJ_{pi,i+1} \right) / h_i, \quad (75)$$

$(i=1,3,\dots,n-1).$

Матритсаи нармии дарунӣ барои системае, ки аз n унсури охиринок иборат аст, бо ММД, шакли зеринро қабул мекунад

$$\mathbf{B} = \text{diag} \left(\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3, \dots, \mathbf{B}_{n-1}, \mathbf{B}_{n+1} \right).$$

Матритсаи сахтии дарунии система, ки аз n унсури охиринок ММД ва $n+1$ қитъа иборат аст, бо дарназардошти муодилаҳои (74) - (75) ба таври зерин ифода карда мешавад

$$\mathbf{C} = \text{diag} \left(\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3, \dots, \mathbf{C}_n, \mathbf{C}_{n+1} \right). \quad (76)$$

Барои сохтани матритсаи сахтии берунӣ зарур аст, ки пешакӣ матритсаи коэффитсиентҳои муодилаҳои тавозун ташкил карда шавад.

Ҳамин тавр, векторҳои қувваҳои берунӣ ба таври зерин ифода карда мешаванд

$$\mathbf{P} = -\mathbf{A}\mathbf{S} = -\mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{A} = \mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{A}^T \mathbf{U} = \mathbf{K}\mathbf{U} \quad (77)$$

$$\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{P}, \quad (77)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{A}\mathbf{C}\mathbf{A}^T, \quad (78)$$

дар ин ҷо \mathbf{K} – матритсаи сахтии берунии система дар ҳолати статикӣ.

Барои таҳлили динамикӣ системаи муодилаҳои дифференсиалӣ (73) бо матритсаи сахтӣ \mathbf{K} –, ки мувофиқи (78) ташкил дода шудааст, баррасӣ мешавад. Ҳисобкунии интегралӣ

бо усули такмилҳои пайдарпай амалӣ карда мешавад, ки дар ин ҳолат векторҳои суръатҳо ва шитобҳо, ки ба лаҳзаи вақти t_{n+1} мувофиқанд, ба шакли зерин ифода карда мешаванд

$$\dot{\mathbf{U}}_{n+1} = \beta_1(\mathbf{U}_{n+1} - \mathbf{U}_n) / \tau - \beta_2 \dot{\mathbf{U}}_n - \tau \beta_3 \ddot{\mathbf{U}}_n, \quad (79)$$

$$\ddot{\mathbf{U}}_{n+1} = \alpha_1(\mathbf{U}_{n+1} - \mathbf{U}_n) / \tau^2 - \alpha_2 \dot{\mathbf{U}}_n / \tau - \alpha_3 \ddot{\mathbf{U}}_n, \quad (80)$$

$$(n = 0, 1, 2, \dots, N),$$

дар ин ҷо $\tau = t_{n+1} - t_n$ – қадами интегриронӣ аз рӯи вақт,

α_i, β_i – коэффитсиентҳои аппроксиматсия.

Бо ворид кардани муодилаҳои (79) ва (80) ба лаҳзаи вақти t_{n+1} ба муодилаи дифференсиалӣ дар шакли матритсӣ (73), пайдо мекунем

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_1}{\tau^2} \mathbf{M} \mathbf{U}_{n+1} + \frac{\beta_1}{\tau} \mathbf{D} \mathbf{U}_{n+1} + \mathbf{K} \mathbf{U}_{n+1} = \mathbf{P}_{n+1} - \mathbf{F}_{n+1} + \\ + \frac{\alpha_1}{\tau^2} \mathbf{M} \mathbf{U}_n + \frac{\alpha_2}{\tau} \mathbf{M} \dot{\mathbf{U}}_n + \alpha_3 \mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}}_n + \frac{\beta_1}{\tau} \mathbf{D} \mathbf{U}_n + \beta_2 \mathbf{D} \dot{\mathbf{U}}_n + \tau \beta_3 \mathbf{D} \ddot{\mathbf{U}}_n, \end{aligned} \quad (81)$$

Муодилаи (81)-ро метавон ба шакли стандартӣ ба тариқи зерин навишт

$$\mathbf{K}^* \mathbf{U}_{n+1} = \mathbf{P}_{n+1}^*, \quad (82)$$

$$\mathbf{K}^* = \mathbf{K} + \frac{\alpha_1}{\tau^2} \mathbf{M} + \frac{\beta_1}{\tau} \mathbf{D}, \quad (83)$$

$$\mathbf{P}_{n+1}^* = \mathbf{P}_{n+1} - \mathbf{F}_{n+1} + \mathbf{M} \mathbf{A}_n + \mathbf{D} \mathbf{V}_n, \quad (84)$$

$$\mathbf{A}_n = \left(\frac{\alpha_1}{\tau^2} \mathbf{U}_n + \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{\mathbf{U}}_n + \alpha_3 \ddot{\mathbf{U}}_n \right),$$

$$\mathbf{V}_n = \left(\frac{\beta_1}{\tau} \mathbf{U}_n + \beta_2 \dot{\mathbf{U}}_n + \tau \beta_3 \ddot{\mathbf{U}}_n \right).$$

Дар ин ҷо \mathbf{A}_n ва \mathbf{V}_n – векторҳои шитобҳои сохтаи ва суръатҳои сохтаи мебошанд.

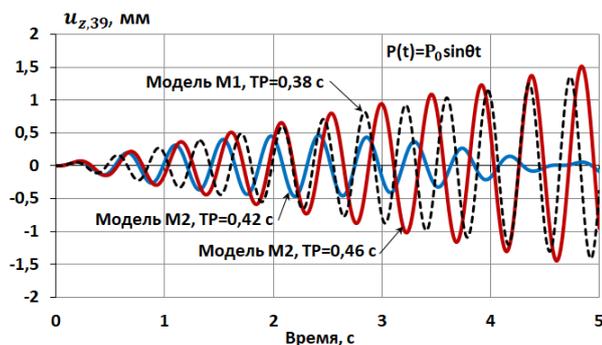
Матритсаи хомушкунӣ дар ифодаҳои (83) ва (84) мувофиқи Релей метавонад ба намуди зерин ифода шавад

$$\mathbf{D} = a \mathbf{M} + b \mathbf{K}, \quad (85)$$

дар инҷо a ва b – коэффитсиентҳои таносуби ихтиёрӣ мебошанд.

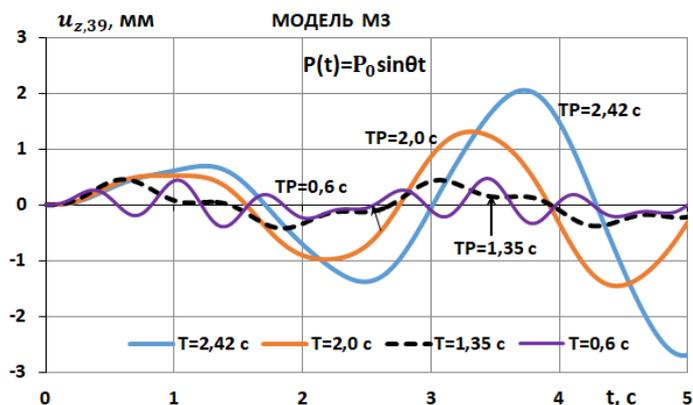
Дар асоси алгоритми дар боло овардашуда, барномаи компютери SI-MCD-El Centro ба забони ФОРТРАН таҳия ва натиҷаҳои ҳисобкунии бинои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо таҷягоҳҳои резинӣ-филизӣ ба даст оварда шуданд. Бо мақсади муқоиса, инчунин натиҷаҳои ҳисобкунии модели бо таҷягоҳҳои мазбутӣ ва таҷягоҳҳои чандрӣ ба даст оварда шуданд.

4.9. Мисолҳои моделсозии ададӣ. Дар ин ҷо мисолҳои алоҳида оид ба амалӣ кардани алгоритми ММД баррасӣ мешаванд. Лаппишҳои озод ва маҷбурии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо ММД таҳқиқ ёфтаанд. Чун мисоли модели динамикии бинои синҷии 9-ошёна бо ядроии сахтӣ баррасӣ мешавад. Натиҷаҳои бадастомада тасдиқ мекунанд, ки модели математикии таҳияшуда ва барномаҳои компютерӣ таҳлили самараноки рафтори динамикии конструксияҳои ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар намудҳои гуногуни борҳои берунӣ (расми 33) таъмин менамоянд.



Расми 33. Таъсири борҳои гармоникӣ

Дар расми 34 графикҳои лапшиҳои модели дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ барои қиматҳои гуногуни даври бори гармоникӣ оварда шудаанд.



Расми 34. Лапшиҳои модели М3 барои қиматҳои гуногуни басомади бори гармоникӣ

Усули таҳияшудаи таҳлили динамикӣ арзёбии ҷамъбасти ҳолати шиддатнокӣ-деформатсионии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ аз таъсирҳои гуногун таъмин менамояд.

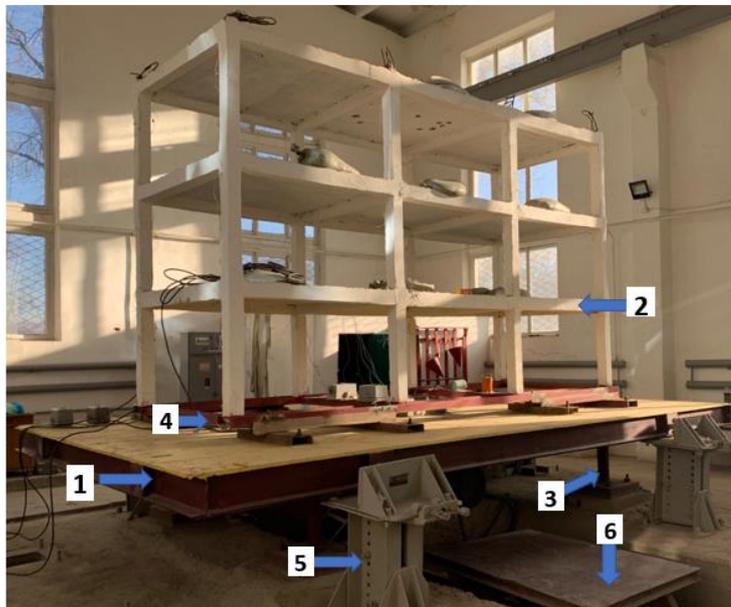
4.10. Баҳодиҳии самаранокии истифодаи ҷудокунакҳои сейсмикӣ аз таҷағоҳҳои резинӣ-филизӣ. Ҷудокунакҳои сейсмикӣ аз таҷағоҳҳои резинӣ-филизӣ самаранокии баланди худ ва рақобатпазирии иқтисодиро нисбат ба усулҳои анъанавии таъмини зилзилатобоварии иншоотҳои гуногун нишон додааст. Варианти оптималӣ, одатан, бо роҳи муқоисаи нишондиҳандаҳои техникӣ-иқтисодии вариантҳои баррасӣ шаванда, муқоисаи нишондиҳандаҳои лоиҳаи нав бо меъёр ё бо бинои сохташуда интихоб карда мешавад. Қарор қабул карда мешавад, ки дар шароити дигари баробар барои амалӣ намудани он хароҷоти камтарро талаб мекунад. Барои таҳлили муқоисаи арзиши бино бо ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бидуни он андозаҳои зерини бино, ҳалли конструктивӣ ва конструксияҳои борбардор қабул карда шуданд. Бино шакли росткунҷа дошта бо андозаҳои 30×19 метр мебошад. Таҳлил нишон дод, ки қувваҳои дохилӣ дар конструксияҳои бинои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ нисбат ба бинои бе он ба таври назаррас коҳиш меёбанд, ки ин дар навбати худ боиси коҳиши масоҳати бурришҳои уфуқии конструксияҳои амудӣ мегардад. Дар асоси ин андозаҳои бурриши кундалангии унсурҳои борбардори биноҳо интихоб карда шуданд. Дар бинои бе ТРМ сарфи оҳан 32% ва бетон - 20,24% нисбат ба бинои бо ТРМ зиёдтар аст. Фарқи умумии баҳодиҳӣ байни бинои бо ТРМ ва бидуни он дар қисми конструксияҳои асосии борбардор тақрибан 10% -ро ташкил медиҳад.

Боби панҷум «ТАҲҚИҚОТИ ТАҶРИБАВИИ СИСТЕМАИ «ПЛАТФОРМА - МОДЕЛИ БИНО» БО УНСУРҲОИ ҶУДОКУНАКҲОИ СЕЙСМИКӢ» ба таҳқиқоти таҷрибавии системаи «платформа - модели бино» бахшида шудааст. Ин боб аз 7 бахш иборат буда, бо хулосаҳо ба поён мерасад.

5.1. Мақсади эксперимент. Мақсади ин таҳқиқоти таҷрибавӣ муайян кардани ҳолати деформатсионии модели бинои синҷӣ буд. Эксперимент дар озмоишгоҳи «Зилзилатобоварии

биноҳо ва иншоот» - и Институти геология, сохтмони базаминчунбӣ тобовар ва сейсмологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон гузаронида шуд.

5.2. Конструксияи стенди озмоишӣ. Барои гузаронидани эксперимент стенди озмоишӣ махсус лоиҳакашӣ ва сохташуда ба намуди платформаи лаппишдор истифода шуда буд. Платформаи лаппишдор (расми 35) як конструксияи саҳти хучайрадор бо андозаҳои $600 \times 350 \times 22$ см мебошад, ки болои чор сутуни филизӣ насб шудааст.

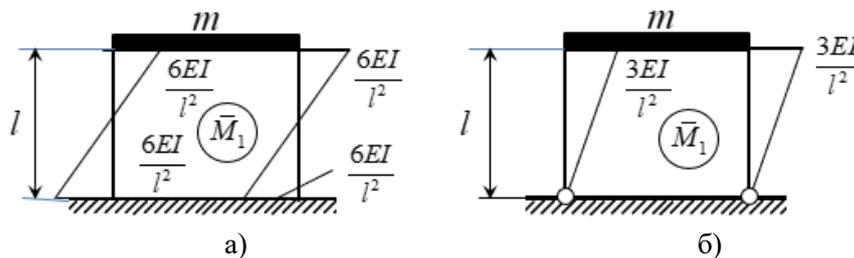


1-виброплатформа $6 \times 3,5$ м; 2- модели объекти таҳқиқот дар масштаби 1:4; 3-сутуни бурриши 10×4 см, дарозӣ 43,5 см; 4- қисми таъягоҳии модел аз швеллери №18; 5 – таъягоҳи маҳдудкунанда, 6 – ароба.

Расми 35. Виброплатформа ва фрагменти модели бинои сеошёнаи синҷӣ

Платформаи лаппишдор ҳамчун остсиллятори хаттӣ бо массаи марказонидашудаи $m = Q / g = 12 / 9,81 = 12,23$ кгс · с² / см (расми 36) моделгузорӣ мешавад, дар ҳоле ки таъягоҳӣ (расми 36) метавонанд дар ду варианти шароити канорӣ баррасӣ шаванд: бо таъягоҳи мазбутӣ дар таҳкурсии ё бо таъягоҳии банднок.

а) ҳарду нӯғҳои сутунҳо мазбути шудаанд (расми 36, а), он гоҳ коэффитсиенти саҳтӣ баробар хоҳад буд



Расми 36. Модели ҳисобии динамикии виброплатформа

$$r_{11} = \frac{12EI}{l^3} \quad (86)$$

б) яке аз нӯғҳои сутунҳо мазбути шуда, дигаре – озод ба банд таъя кардааст (расми 36, б), он гоҳ коэффитсиенти саҳтӣ баробар хоҳад буд

$$r_{11} = \frac{3EI}{l^3} \quad (87)$$

Барои вазни додашуда ва сахтии сутунҳо, даври лапшиҳои озоди виброплатформа баробар аст

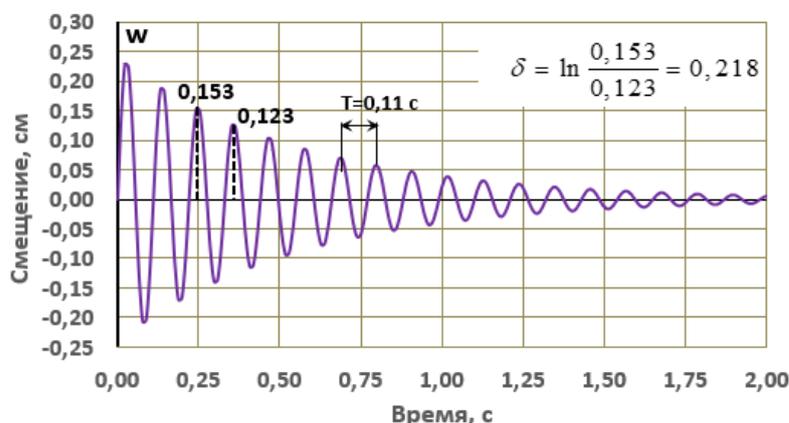
$$T = 2\pi / \omega = 2\pi \sqrt{m/k} = 2\pi \sqrt{Q\delta_{11}/g} = 2\pi \sqrt{w_{cm} / g} ,$$

5.3. Лапшиҳои озоди платформа. Дар расми 37 графико лапшиҳои озоди платформа дар самти тулӣ, ки аз таъсири зарба ба даст оварда шудааст, пешниҳод шудааст. Аз ин график бармеояд, ки даври лапшии платформа $T = 0,11$ с, ва декременти логарифмӣ $\delta = 0,218$ -ро ташкил медиҳад. Агар ба назар гирем, ки коэффитсиенти хомушкунии моёги ξ суръати хомушкунии амплитудаҳои лапшиҳои озодро ифода мекунад, он гоҳ аз вобастагӣ пайдо мекунем

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \approx 2\pi\xi ,$$

аз инҷо меёбем

$$\xi \approx \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0,218}{6,28} = 0,0347 \rightarrow 3,47\% .$$



Расми 37. Лапшиҳои озоди хомушшавандаи виброплатформа

Бо зиёд шудани баландии сутунҳо даври лапшиҳо афзоиш ва басомади лапшиҳо коҳиш меёбад.

5.4. Усули гузаронидани озмоиши динамикии модели физикии бинои синҷӣ. Озмоишҳо мувофиқи хуччатҳои меъерии қорӣ дар платформаи лапшишдор аз таъсири борҳои динамикӣ ҳангоми заминларза бо шиддати то 9 балл анҷом дода шуданд. Дар раванди озмоишҳо ченкунии ҷойивазкуниҳо ва шитобҳои модели бино дар се самт иҷро карда шуданд. Барои сабти лапшиҳои системаи «платформа-модели бино» датчикҳои лапшиш истифода шуданд. Лапшиҳои виброплатформа бо ёрии вибраторе, ки аз поён ба платформа насб шудааст, амалӣ мегардад.

5.5. Аппаратура ва асбобҳои ченкунӣ. Барои гузаронидани озмоишҳои модели оҳанубетонӣ аз асбобҳои зерини назоратӣ ченкунӣ истифода карда шуд: остсиллографи Н-700, датчикҳои лапшиш ва вибратор. Таъсири лапшиш ба платформаи лапшишдор бо ёрии вибратори реактивӣ, ки дар маҷмуъ бо двигатели асинхрони барқӣ қор мекунад, амалӣ карда шуд. Асбобҳои насбшуда лапшишоро бо истифода аз асбобҳои ченкунӣ сабт мекард, дар рӯи қоғази фотоии остсиллограф ҷойивазкуниҳои лапшиш сабт карда шуданд.

5.6. Маводҳо ва конструксияҳои модели физикии бинои синҷии сеошёна. Хусусияти қори синҷи биноҳои бисёррошёна оҳанубетонӣ ҳангоми таъсири қувваҳои уфуқии заминларза иборат аст аз тағйирёбии аломати таъягоҳ, ки дар гиреҳҳои рам майл доранд ба косо-симметрӣ. Объекти озмоишӣ модели якравокаи сеошёнаи бинои синҷии оҳанубетонӣ дар масштаби 1:4 (расми 35) мебошад, ки конструксияи болоии он як конструксияи нарми навъи синҷӣ буда, аз унсурҳои оҳанубетонӣ бо андозаҳои 1,6 x 4,6 м ва баландии 2,8 м сохта шуда, массаи умумии 3т дорад. Ин конструксия дар болои системаи ҷудокунаки сеймикӣ насб шудааст. Ба сифати ҷудокунаки сеймикӣ дар фрагменти сеошёнаи бино таъягоҳҳои резинӣ -

филизии тамғаи ОВ-31- М истифода бурда шуданд. Модели физикии бинои синчии сеошёна (расми 35) унсурҳои конструктивии зеринро дар бар мегирад: сутунҳои оҳанубетонӣ бурриши квадратии 10×10 см, ригелҳои бурриши квадратии 10×10 см, ки ба тахтасангҳои яклухт ғафсии 4 см пайваст карда шудаанд ва мувофиқи схемаи таҷягоҳии ҳудудӣ кор мекунад. Асоси модел швеллерҳои филизии №20 мебошанд, ки ба платформа пайваст карда шудаанд. Арматураи сутунҳо ба лавҳаҳои филизий (варақаҳои пӯлодии $10 \times 10 \times 1$ см) кафшер кардашуда, ба швеллерҳо мустақкам карда мешаванд. Бетони ҳамаи унсурҳо синфи В7,5 мебошад.

5.7. Натиҷаҳои озмоишҳои динамикии модели фрагменти бино. Таҳқиқоти таҷрибавии модели сеошёна синчии оҳанубетонӣ ҳангоми боргузории гармоникӣ имкон дод, ки маълумоти муқоисавӣ оид ба шитобҳо ва ҷойивазкуниҳо барои вариантҳои бо ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бидуни он ба даст оянд. Дар давоми озмоишҳо амплитудаҳои лаппишҳо ва ҷойивазкуниҳои уфуқии модел дар тири платформи лаппишдор ҳангоми тағйир додани массаи эксцентрикҳо ва басомади даврзании ротор сабт карда шуданд. Натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ оид ба модели биное, ки болои платформи лаппишдор насб шуда буд ва зери таъсири бори гармоникӣ боқиматҳои гуногуни басомад ва амплитудаи он қарор дошт, ба даст оварда шуданд.

Таҳлили маълумоти таҷрибавӣ нишон медиҳад, ки қиматҳои қуллавии шитобҳои уфуқӣ дар қисми болоии модел тақрибан $2/3$ аз параметрҳои мувофиқи ҳаракати платформи лаппишдорро ташкил медиҳанд.

Ҳамин тавр, метавон хулоса кард, ки ҳангоми муқоисаи натиҷаҳои таҳқиқоти назариявӣ маълумоти таҷрибавӣ картинаи сифатии онҳо мушоҳида мешавад.

Боби шашум «МОДЕЛСОЗӢ ВА НАЗАРИЯИ МОНАНДӢ ДАР МЕХАНИКАИ СОХТМОН» ба масъалаҳои моделсозӣ дар асоси назарияи монандӣ бахшида шудааст. Амалӣ кардани назарияи монандӣ дар мисолҳои системаҳои гуногун баррасӣ шудааст. Ин боб аз 11 бахш иборат буда, бо хулосаҳо ба поён мерасад.

6.1. Методҳои моделсозӣ. Методҳои моделсозии физикӣ ва принципҳои назарияи монандӣ дар соҳаҳои гуногун, аз ҷумла дар таҳқиқи рафтори конструксияҳои сохтмонӣ ва сохтмонҳои муҳандисӣ, истифодаи васеъ доранд. Монандӣ имконияти паҳн кардани натиҷаҳои таҷриба аз модел ба аслиро ифода мекунад. Назарияи монандӣ имкон медиҳад, ки натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ, ки дар моделҳо ба даст оварда шудаанд, ба объектҳои воқеӣ интиқол дода шаванд.

Меъёрҳои монандӣ қойидаҳоро барои интиқоли натиҷаҳои таҷриба аз модел ба объекти воқеӣ муқаррар мекунад. Барои муайян кардани коэффитсиентҳои беандозаи монандӣ усулҳои зерин истифода мешаванд: 1) таҳлили муодилаҳои дифференсиалӣ, ки раванди таҳқиқшавандаро тавсиф медиҳанд (усули нормсозӣ); 2) таҳлили андозаҳои параметрҳои масъалаи пешниҳодшуда.

Дар ин қор усули таҳлили муодилаҳои дифференсиалиро, ки дар асоси принципи Даламбер бадастоварда шудаанд ва равандҳои лаппиширо дар конструксияҳои гуногун тавсиф медиҳанд, баррасӣ мешаванд.

Ҳамин тавр, системаи муодилаҳои дифференсиалӣ, ки ба шакли беандоза табдил дода шуда ва шароити ибтидоӣ ва канориро ба назар гирифтааст, тавсифи математикии масъаларо ҳам барои объекти натураӣ (воқеӣ) ва ҳам барои модел ташкил медиҳад.

6.2. Муодилаҳои дифференсиалии лаппишҳои болори ҳамшаванда. Лаппишҳои озод ва маҷбурии болорро бо массаи тақсимшуда (расми 38) баррасӣ мекунем. Аз шароити тавозуни унсури r_s болори (расми 38, б), ба даст меорем.

$$\sum z=0, \quad -Q + Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx - m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} dx - c \frac{\partial w}{\partial t} dx + q dx = 0, \quad (88)$$

$$\sum M_s = 0, \quad Q dx + M - M - \frac{\partial M}{\partial x} dx - q dx \frac{dx}{2} = 0. \quad (89)$$

Аз вобастагии байни қачӣ ва хамиш (расми 38, а) дида мешавад, ки $ds = \rho d\theta$, аз ин чо $ds \approx dx$ ва $\theta \approx \text{tg}\theta \approx dw/dx$, бадаст меорем

$$1/\rho = d\theta/dx = d^2w/dx^2. \quad (90)$$

Аз деформатсияи болор ҳангоми қатъшавӣ баробарии зерин бармеояд

$$1/\rho = -M/EI, \quad (91)$$

Аз (88), бо дарназардошти (89),

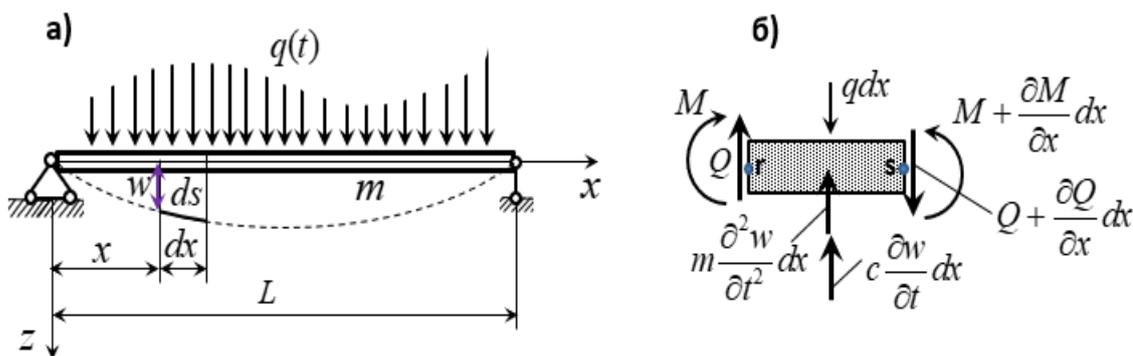
дар ин чо $Q = \partial M/\partial x$, пайдо мекунем

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - c \frac{\partial w}{\partial t} + q(x, t) = 0. \quad (92)$$

Бо баробар кардани тарафҳои рости (6.3) ва (6.4) муодилаи зерин ба даст меорем

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -\frac{M(x, t)}{EI}, \quad (93)$$

ки ҳатти хамшавиҳои болорро тавсиф медиҳад. Ҳангоми ҳалли якҷояи (92) ва (93) функцияҳои $w(x, t)$ ва $M(x, t)$ муайян карда мешаванд.



Расми 38. Ҳатти хамшавии болори хамшуда

Ҳангоми таъсироти сейсмикӣ дар тирӣ l , муодилаи (92) намуди зеринро мегирад

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - c \frac{\partial w}{\partial t} = m\ddot{w}_0(t), \quad (94)$$

дар ин чо $\ddot{w}_0(t)$ – шитоби додашудаи заминчунбӣ.

Бо иваз кардани (93) ба (92), дар сурати мили призмавӣ ($EI = \text{const}$), муодилаи дифференсиалии дараҷаи 4-ум нисбат ба функцияи номаълуми $w(x, t)$ ба даст меорем

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} = q(x, t). \quad (95)$$

Аз ҳалли (94) функцияи $w(x, t)$ муайян карда мешавад, сипас лаҳзаи хамшавӣ ва қувваи амудӣ ҳисоб карда мешаванд

$$M(x, t) = -EI \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2}, \quad Q(x, t) = \frac{\partial M(x, t)}{\partial x}. \quad (96)$$

Ҳамин тавр, барои ҳалли масъалаи лаппишҳои кундалангии болорҳо метавон аз системаи ду муодилаи дараҷаи дуҷум (92) ва (93) ё як муодилаи дараҷаи чорум (95) истифода кард, ки вобаста ба усули интиҳобшудаи ҳалли ададии масъалаи динамикӣ аст. Дар ин чо системаи ду муодилаи дараҷаи дуҷум баррасӣ карда мешавад, ки барои ҳалли он усули такмилҳои пайдарпай истифода мешавад.

6.3. Методҳои табдилдиҳии муодилаҳои дифференсиалӣ. Дар назарияи монандӣ табдил додани муодилаҳои дифференсиалӣ, инчунин шароити ибтидоӣ ва канонии мувофиқ ба шакли беандоза бо роҳҳои гуногун иҷро карда мешавад. Ин раванди табдилдиҳиро инчунин нормсозии муодилаҳои физикӣ меноманд. Аз баробарии меъёрҳои монандӣ ба даст меорем

$$\frac{L_m^2}{M_{0,m}} \frac{m_{0,m} w_{0,m}}{T_{1,m}^2} = \frac{L_n^2}{M_{0,n}} \frac{m_{0,n} w_{0,n}}{T_{1,n}^2}, \rightarrow \frac{w_{0,n}}{M_{0,n}} = \frac{w_{0,m}}{M_{0,m}} \frac{T_{1,n}^2}{T_{1,m}^2} \frac{m_{0,m}}{m_{0,n}} \frac{L_m^2}{L_n^2} = k^2 \frac{w_{0,m}}{M_{0,m}}, \quad (97)$$

$$\frac{L_m^2}{w_{0,m}} \frac{M_{0,m}}{EI_{0,m}} = \frac{L_n^2}{w_{0,n}} \frac{M_{0,n}}{EI_{0,n}}, \rightarrow \frac{M_{0,n}}{w_{0,n}} = \frac{M_{0,m}}{w_{0,m}} \frac{EI_{0,n}}{EI_{0,m}} \frac{L_m^2}{L_n^2} = \frac{1}{k^2} \frac{M_{0,m}}{w_{0,m}}, \quad (98)$$

$$\frac{L_m^2 c_{0,m}}{M_{0,m}} \frac{w_{0,m}}{T_{1,m}} = \frac{L_n^2 c_{0,n}}{M_{0,n}} \frac{w_{0,n}}{T_{1,n}}, \rightarrow c_{0,n} = c_{0,m} \frac{L_m^2}{L_n^2} \frac{w_{0,m}}{w_{0,n}} \frac{M_{0,n}}{M_{0,m}} \frac{T_{1,n}}{T_{1,m}}, \quad (99)$$

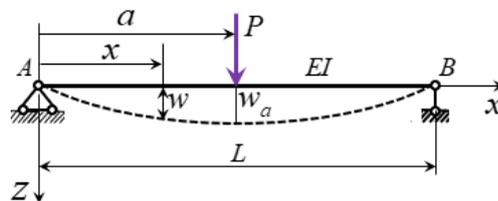
Аз баробарии меъёрҳо пайдо мекунем

$$\frac{T_{1,n} S_{0,n}}{w_{0,n} m_{0,n}} = \frac{T_{1,m} S_{0,m}}{w_{0,m} m_{0,m}} \rightarrow S_{0,n} = S_{0,m} \frac{T_{1,m}}{T_{1,n}} \frac{w_{0,n}}{w_{0,m}} \frac{m_{0,n}}{m_{0,m}}.$$

Ҳамин тавр, баробарии коэффитсиентҳои беандозаи монандӣ имкон медиҳанд, ки параметрҳои воқеӣ ба даст оварда шаванд, ки сипас метавонанд барои ҳисоб кардани объекти таҳқиқшаванда, инчунин барои муқоиса бо маълумоти таҷрибавӣ истифода шаванд.

6.4. Моделсозии масъалаи статикӣ болор. Ҳамшавии болори оддиеро зери таъсири қувваи марказонидашуда (расми 39) баррасӣ мекунем. Муодилаи дифференсиалии ҳамшавии болор ба шакли зерин ифода мешавад

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -\frac{M(x)}{EI}, \quad (100)$$



Расми 39. Тири ҳамшавандаи болор

Муодилаи (100) бо дарназардошти тағйирёбандаҳои беандоза шакли зеринро ба худ мегирад

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= \frac{w_0}{l_0^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2}, \quad \frac{M}{EI} = \frac{M_0}{E_0 I_0} \frac{\bar{M}}{EI}, \\ \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2} &= -\pi \frac{\bar{M}}{EI}, \quad \pi = \frac{M_0 l_0^2}{w_0 E_0 I_0}. \end{aligned} \quad (101)$$

Параметри беандозаи монандӣ π ба шакли зерин ифода карда мешавад

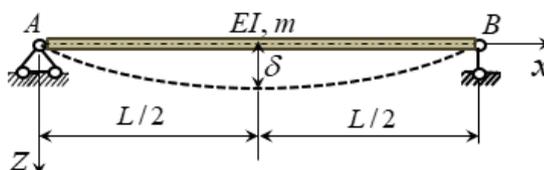
$$\pi = \frac{PL^3}{w_a EI} = c, \Rightarrow w_a = \frac{1}{c} \frac{PL^3}{EI}. \quad (102)$$

Аз муодилаи (102) дида мешавад, ки вобастагии ҳамшавии максималӣ бо параметрҳои дигари масъала бе ҳалли муодилаи (88), бо дарназардошти коэффитсиенти доимии «С» ба даст оварда шудааст.

Бояд таъкид кард, ки муодилаи дифференсиалии беандоза (101) ҳам барои модел ва ҳам барои натурӣ шакли яхела дорад. Аз ин ру, метавон навишт

$$\pi_m = \pi_n, \rightarrow \left(\frac{PL^3}{w_a EI} \right)_m = \left(\frac{PL^3}{w_a EI} \right)_n \rightarrow \frac{w_{a,m}}{w_{a,n}} = \frac{(P_m / P_n)(L_m^3 / L_n^3)}{(E_m / E_n)(I_m / I_n)}. \quad (103)$$

6.5. Моделсозии масъалаи динамикии болор. Лаппишҳои озоди болори оддии бурриши кундалангии росткунҷаро бо массаи баробар тақсимшудаи m (расми 40) баррасӣ мекунем. Дар лаҳзаи ибтидоӣ миёнаи равоки болор ҷойивазкунии ибтидоӣ ба андозаи δ -ро ба даст меорад, ва сипас болор лаппишҳои озодро идома медиҳад.



Расми 40. Болор бо массаҳои тақсимшуда

Лаппишҳои озоди болор бидуни ҳисоб намудани хомушшавӣ бо муодилаи дифференсиалии дараҷаи чорум тавсиф дода мешавад

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0. \quad (104)$$

Муодилаи (104) бо дарназардошти шароити ибтидоӣ ба шакли зерин меояд

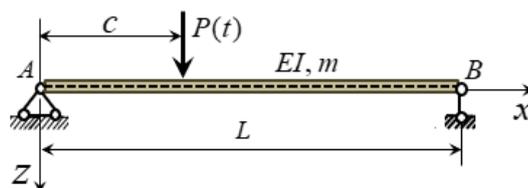
$$\begin{aligned} EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} &= EI \frac{\delta}{L^4} \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^4}, & m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= m \frac{\delta}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^4} + \pi_1 \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial t^2} &= 0, & \pi_1 &= \frac{mL^4}{T_1^2 EI}. \end{aligned} \quad (105)$$

Аз принсипи монандии модел ва воқеӣ, ки лаппишҳои озоди онҳо бо муодилаи (105) тавсиф дода мешаванд, метавон навишт

$$\pi_{1,m} = \pi_{1,n}, \rightarrow \left(\frac{L^2}{c r T_1} \right)_m = \left(\frac{L^2}{c r T_1} \right)_n, \quad T_{1,n} = T_{1,m} \frac{L_n^2 c_m r_m}{L_m^2 c_n r_n}. \quad (106)$$

Аз формулаи бадастомадаи (106) бармеояд, ки агар аз таҷриба дар модел мо маълумотҳо оид ба лаппишҳои озод бо даври $T_{1,m}$ - ро ба даст оварда бошем, он гоҳ метавон даври асосии лаппишҳои озоди болори воқеиро бе ҳалли муодилаи дифференсиалӣ пешгӯӣ кард.

6.6. Лаппишҳои маҷбурӣ. Лаппишҳои маҷбурии болорро зери таъсири бори ларзишӣ баррасӣ мекунем. Ба болоре бо массаи баробар тақсимшудаи $m = \gamma A / g$ қувваи $P(t) = P \sin \theta t$ таъсир мекунад (расми 41).



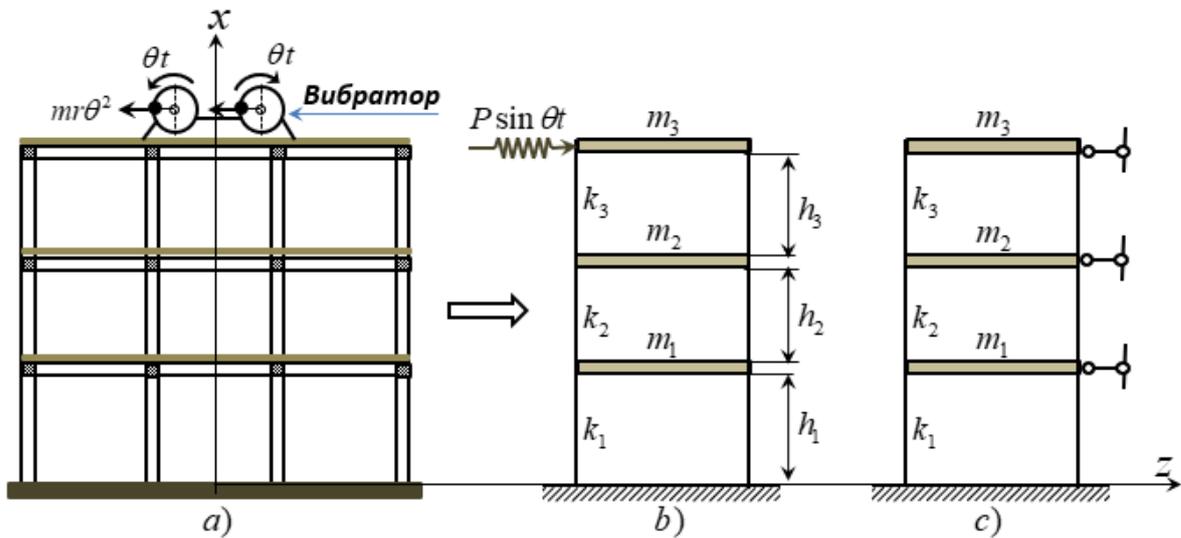
Расми 41. Таъсири борҳои ларзишӣ

Дар сурати болор бо тақияҳои бандакдор (расми 41), шаклҳои нормалии лаппишӣ $X_j(x)$ бо синусоидаҳо ва қаторҳои муайян карда мешаванд. Дар ин ҳолат, шиддати қувваҳои инерсионие, ки ба самти тулии болори ларзида тақсим шудаанд, бо дарназардошти шакли лаппишҳо ба таври зерин навишта мешаванд

Барои системаи семассагӣ (расми 43) бо истифода аз параметрҳои беандоза системаи муодилаҳои дифференсиалӣ (111) шакли зеринро қабул мекунад

$$\begin{aligned} \frac{m_0 w_0}{T_1^2} \bar{m}_1 \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 w_0}{T_1} \bar{c}_{11} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} + k_0 w_0 \bar{k}_{11} \bar{w}_1 + k_0 w_0 \bar{k}_{12} \bar{w}_2 &= 0, \\ \frac{m_0 w_0}{T_1^2} \bar{m}_2 \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 w_0}{T_1} \bar{c}_{22} \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \bar{t}} + k_0 w_0 \bar{k}_{21} \bar{w}_1 + k_0 w_0 \bar{k}_{22} \bar{w}_2 + k_0 w_0 \bar{k}_{23} \bar{w}_3 &= 0, \\ \frac{m_0 w_0}{T_1^2} \bar{m}_3 \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 w_0}{T_1} \bar{c}_{33} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + k_0 w_0 \bar{k}_{32} \bar{w}_2 + k_0 w_0 \bar{k}_{33} \bar{w}_3 &= P_0 \bar{P}_3 \sin \theta_0 \bar{\theta} \bar{t}, \end{aligned} \quad (112)$$

дар ин ҷо $\bar{t} = t/T_1$, $\bar{w}_i = w_i/w_0$, $\bar{c}_{ii} = c_{ii}/c_0$, $\bar{k}_{ij} = k_{ij}/k_0$, $\bar{P}_3 = P_3/P_0$.



Расми 43. Моделикунонии бино аз таъсири борҳои гармоникӣ

Дар ин ҷо тахмин меравад, ки параметрҳои хоси $t_0 = T_1, w_0, c_0, k_0, P_0$ бузургтарин қиматҳоро барои миқдорҳои мувофиқдоранд. Бо тақсим кардани ҳамаи аъзои системаи муодилаҳои (112) ба $m_0 w_0 / T_1^2$, пайдо мекунем

$$\begin{aligned} \bar{m}_1 \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \bar{t}^2} + \frac{T_1 c_0}{m_0} \bar{c}_{11} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{11} \bar{w}_1 + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{12} \bar{w}_2 &= 0, \\ \bar{m}_2 \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \bar{t}^2} + \frac{T_1 c_0}{m_0} \bar{c}_{22} \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \bar{t}} + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{21} \bar{w}_1 + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{22} \bar{w}_2 + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{23} \bar{w}_3 &= 0, \\ \bar{m}_3 \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \bar{t}^2} + \frac{T_1 c_0}{m_0} \bar{c}_{33} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{32} \bar{w}_2 + \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_{33} \bar{w}_3 &= \frac{T_1^2 P_0}{m_0 w_0} \bar{P}_3 \sin(\theta_0 T_1 \bar{\theta} \bar{t}). \\ \bar{m}_1 \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{11} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{11} \bar{w}_1 + \bar{k}_{12} \bar{w}_2) &= 0, \\ \bar{m}_2 \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{22} \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{21} \bar{w}_1 + \bar{k}_{22} \bar{w}_2 + \bar{k}_{23} \bar{w}_3) &= 0, \\ \bar{m}_3 \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{33} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{32} \bar{w}_2 + \bar{k}_{33} \bar{w}_3) &= \pi_3 \bar{P}_3 \sin(\pi_4 \bar{\theta} \bar{t}), \end{aligned} \quad (113)$$

ки дар он параметрҳои монандӣ ба шакли зерин навишта мешаванд

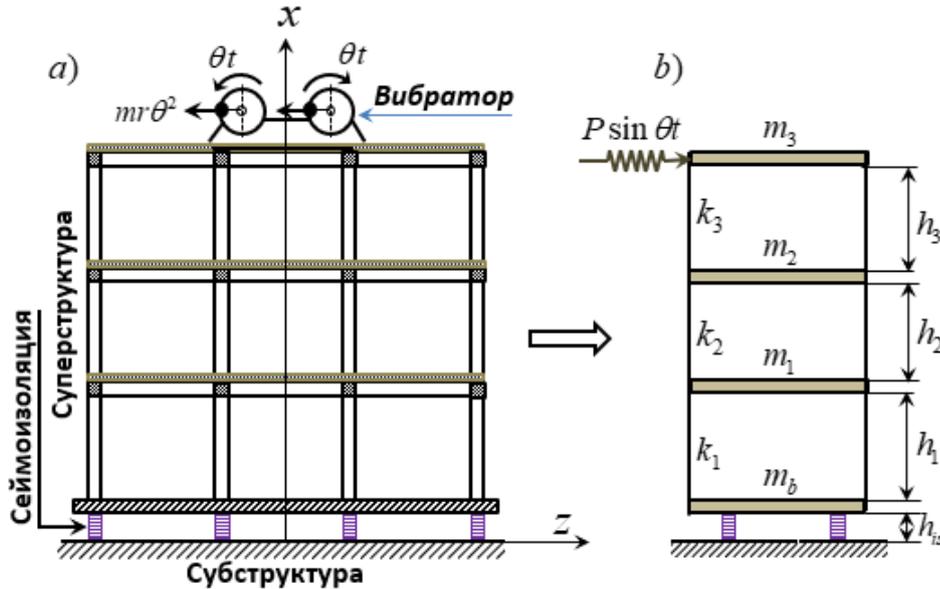
$$\pi_1 = \frac{c_0 T_1}{m_0}, \quad \pi_2 = \frac{k_0 T_1^2}{m_0}, \quad \pi_3 = \frac{T_1^2 P_0}{m_0 w_0}, \quad \pi_4 = \theta_0 T_1. \quad (114)$$

Метавон дид, ки параметрҳои монандӣ (114) бо параметрҳои монандӣ барои системаи бо як дараҷаи озод баробар мебошанд.

6.9. Моделсозии бинои дорон ҷудокунакҳои сейсмикӣ. Барои модели дар расми 44, а, ки болосохтор, ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва зерсохторро дар бар мегирад, ба системаи муодилаҳои (111) илова бар он муодилае, ки ҳаракати массаи пайвастишуда ба ҷудокунакҳои сейсмикӣ тавсиф медиҳад, сабт карда мешавад.

$$m_b \dot{w}_b + f_b - k_1 w_1 - c_1 \dot{w}_1 = 0, \quad (115)$$

Аз ин ру, дар ин ҷо мо системае бо чор дараҷаи озод дорем.



Расми 44. Моделкунонии биноҳои дорон ҷудокунакҳои сейсмикӣ

Мувофиқи Uniform Building Code қонуни ғайрихаттии тағйирёбии қувваи барқароркунанда дар (115) мумкин аст бо модели хаттии баробарқимат, ки дар асоси чандрии сахтии эффективӣ ва хомушкунии моеъгии эффективӣ, иваз карда шавад.

$$f_b = k_{eff} w_b + c_{eff} \dot{w}_b, \quad (116)$$

Муодилаи (115) бо дарназардошти (116) ба шакли зерин ифода мешавад

$$m_b \dot{w}_b + k_{eff} w_b + c_{eff} \dot{w}_b - k_1 w_1 - c_1 \dot{w}_1 = 0, \quad (117)$$

Биёед микдорҳои хоси иловагии k_{is} , c_{is} -ро, ки ба ҷудокунакҳои сейсмикӣ мувофиқанд, ворид кунем ва муодилаи (117)-ро ба шакли беандоза ифода кунем

$$\begin{aligned} \frac{m_0 \bar{m}_b w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_b}{\partial \bar{t}^2} + k_{is} \bar{k}_{eff} w_0 \bar{w}_b + \frac{c_{is} \bar{c}_{eff} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_b}{\partial \bar{t}} - k_0 \bar{k}_1 w_0 \bar{w}_1 - \frac{c_0 \bar{c}_1 w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} &= 0, \\ \bar{m}_b \frac{\partial^2 \bar{w}_b}{\partial \bar{t}^2} + \frac{T_1^2 k_{is}}{m_0} \bar{k}_{eff} \bar{w}_b + \frac{T_1 c_{is}}{m_0} \bar{c}_{eff} \frac{\partial \bar{w}_b}{\partial \bar{t}} - \frac{T_1^2 k_0}{m_0} \bar{k}_1 \bar{w}_1 - \frac{T_1 c_0}{m_0} \bar{c}_1 \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} &= 0, \\ \bar{m}_b \frac{\partial^2 \bar{w}_b}{\partial \bar{t}^2} + \pi_{2b} \bar{k}_{eff} \bar{w}_b + \pi_{1b} \bar{c}_{eff} \frac{\partial \bar{w}_b}{\partial \bar{t}} - \pi_2 \bar{k}_1 \bar{w}_1 - \pi_1 \bar{c}_1 \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} &= 0, \end{aligned} \quad (118)$$

$$\pi_{2b} = \frac{T_1^2 k_{is}}{m_0}, \quad \pi_{1b} = \frac{T_1 c_{is}}{m_0}, \quad \pi_2 = \frac{T_1^2 k_0}{m_0}, \quad \pi_1 = \frac{T_1 c_0}{m_0}. \quad (119)$$

Чунон, ки аз муодилаи (118) дида мешавад, дар модели бо ҷудокунакҳои сейсмикӣ, ғайр аз параметрҳои монандӣ (114), параметрҳои иловагии α_s ва β_s пайдо мешаванд. Агар дар натиҷаи таҷриба дар модели бо ҷудокунакҳои сейсмикӣ сабтҳои лаппишҳои озод ба даст оварда шуда бошанд, он гоҳ бо истифода аз α_s ё β_s вобаста ба хусусиятҳои додасуда, метавонем даври лаппишҳои озодро барои воқеи муайян кунем.

6.11. Моделсозии тахтасангҳо. Лаппишҳои лавҳаи тунуки росткунҷаи тахтасанг баррасӣ мешавад. Муодилаи дифференсиалии ҳамшавии лавҳа, ки дар ҷаҳорҷуби тахминҳои маълум навишта шудааст, шакли зеринро дорад:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q^*}{D}; \quad (120)$$

Ҳангоми лаппишҳои арзӣ

$$q^*(x, y, t) = q(x, y, t) - \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \quad (121)$$

ва муодилаи (120)-ро, бо дарназардошти (121), ба шакли беандоза ифода мекунем

$$\begin{aligned} \frac{w_0}{a^4} \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \bar{x}^4} + 2 \frac{w_0}{a^4} \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2 \partial \bar{y}^2} + \frac{w_0}{a^4} \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \bar{y}^4} + \mu_0 \frac{w_0 \bar{\mu}}{T_1^2 D_0 \bar{D}} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial t^2} &= \frac{q_0 \bar{q}}{D_0 \bar{D}}, \\ \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \bar{x}^4} + 2 \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \bar{x}^2 \partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial \bar{y}^4} + \pi_1 \frac{\bar{\mu}}{\bar{D}} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial t^2} &= \pi_2 \frac{\bar{q}}{\bar{D}}, \\ \pi_1 = \frac{\mu_0 a^4}{D_0 T_{11}^2}, \quad \pi_2 = \frac{q_0 a^4}{D_0 w_0}, \quad D_0 = \frac{Eh}{12(1-\nu^2)}, \quad T_{11}^2 = \frac{4a^4 b^4}{\pi^2 (a^2 + b^2)} \frac{\mu}{D}, \end{aligned} \quad (122)$$

Ҳангоми соختани модели лавҳа дар андозаи $1:k$ аз ҳамон маводее, ки воқеи сохта шудааст, ба даст меорем

$$\begin{aligned} \left(\frac{\mu_0 a^4}{D_0 T_{11}^2} \right)_n &= \left(\frac{\mu_0 a^4}{D_0 T_{11}^2} \right)_m, \quad \rightarrow \quad T_{11,n}^2 = T_{11,m}^2 \frac{\mu_{0,n} a_n^4 D_{0,m}}{\mu_{0,m} a_m^4 D_{0,n}}, \\ \frac{\mu_{0,n}}{\mu_{0,m}} = k, \quad \frac{a_n^4}{a_m^4} = k^4, \quad \frac{D_{0,m}}{D_{0,n}} = \frac{1}{k^3}, \quad T_{11,n} &= k T_{11,m}. \end{aligned}$$

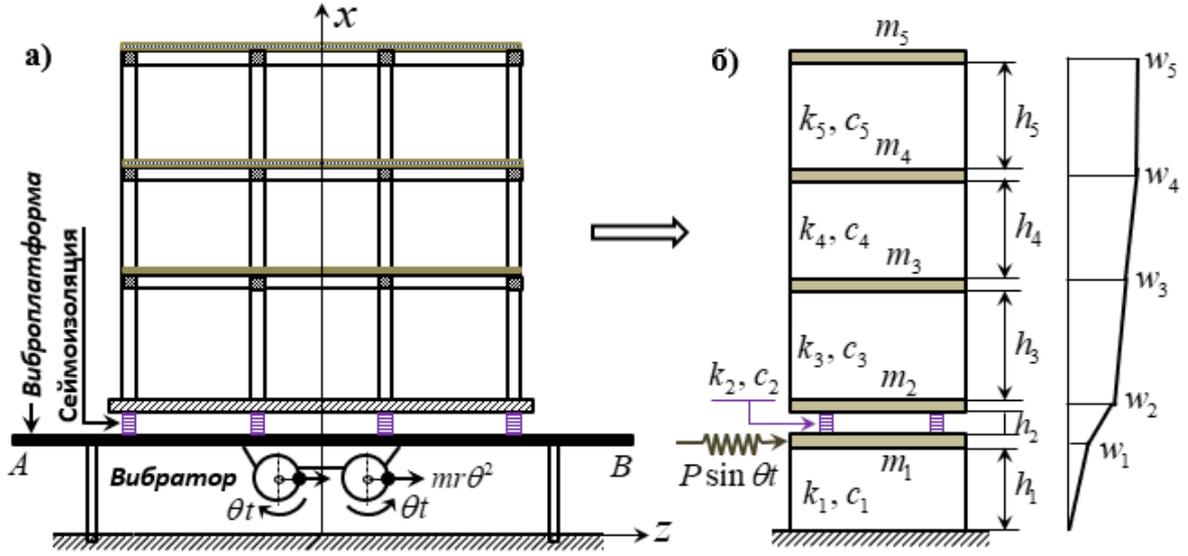
6.11. Модели насбшуда дар болои виброплатформа. Модели дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ, ки болои платформаи лаппишдор насб шудааст (расми 45, а), баррасӣ мешавад. Модели ҳисобии ин система дар расми 45, б пешниҳод шудааст. Ин система панҷ дараҷаи озодро ташкил медиҳад. Системаи муодилаҳои дифференсиалӣ, ки ҳаракати системаро тавсиф медиҳад, метавонад ба намуди мувофиқ, бо дарназардошти хусусиятҳои динамикии платформаи лаппишдор, ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва дигар ҷузъҳои модел, ифода карда шавад.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{w}_1 + c_{11} \dot{w}_1 + c_{12} \dot{w}_2 + k_{11} w_1 + k_{12} w_2 &= P \sin \theta t, \\ m_2 \ddot{w}_2 + c_{21} \dot{w}_1 + c_{22} \dot{w}_2 + c_{23} \dot{w}_3 + k_{21} w_1 + k_{22} w_2 + k_{23} w_3 &= 0, \\ m_3 \ddot{w}_2 + c_{32} \dot{w}_2 + c_{33} \dot{w}_3 + c_{34} \dot{w}_4 + k_{32} w_2 + k_{33} w_3 + k_{34} w_4 &= 0, \\ m_4 \ddot{w}_4 + c_{43} \dot{w}_3 + c_{44} \dot{w}_4 + c_{45} \dot{w}_5 + k_{43} w_3 + k_{44} w_4 + k_{45} w_5 &= 0, \\ m_5 \ddot{w}_5 + c_{54} \dot{w}_4 + c_{55} \dot{w}_5 + k_{54} w_4 + k_{55} w_5 &= 0. \end{aligned} \quad (123)$$

Коэффитсиентҳои хомушкунӣ ва саҳтӣ қиматҳои зеринро қабул мекунанд

$$\begin{aligned} c_{11} = c_1, \quad c_{12} = -c_2 = -c_{eff}, \quad k_{11} = k_1 + k_2, \quad k_{12} = -k_2 = -k_{eff}, \\ c_{21} = c_{12}, \quad c_{22} = c_2 + c_3, \quad c_{23} = -c_3, \quad k_{21} = k_{12}, \quad k_{22} = k_2 + k_3, \quad k_{23} = -k_3, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_{32} &= -c_3, \quad c_{33} = c_3 + c_4, \quad c_{34} = -c_4, \quad k_{32} = -k_3, \quad k_{33} = k_3 + k_4, \quad k_{34} = -k_4, \\
c_{43} &= -c_4, \quad c_{44} = c_4 + c_5, \quad c_{45} = -c_5, \quad k_{43} = -k_4, \quad k_{44} = k_4 + k_5, \quad k_{45} = -k_5, \\
c_{54} &= -c_5, \quad c_{55} = c_5, \quad k_{54} = -k_5, \quad k_{55} = k_5.
\end{aligned} \tag{124}$$



Расми 45. Системи «виброплатформа-чудокунак-модел»

$$\begin{aligned}
\frac{m_0 \bar{m}_1 w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 \bar{c}_{11} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} + k_0 \bar{k}_{11} w_0 \bar{w}_1 + k_0 \bar{k}_{12} w_0 \bar{w}_2 &= P_0 \bar{P} \sin \theta_0 \bar{\theta} T_1 \bar{t}, \\
\frac{m_0 \bar{m}_2 w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 \bar{c}_{22} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \bar{t}} + k_0 \bar{k}_{21} w_0 \bar{w}_1 + k_0 \bar{k}_{22} w_0 \bar{w}_2 + k_0 \bar{k}_{23} w_0 \bar{w}_3 &= 0, \\
\frac{m_0 \bar{m}_3 w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 \bar{c}_{33} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + k_0 \bar{k}_{32} w_0 \bar{w}_2 + k_0 \bar{k}_{33} w_0 \bar{w}_3 + k_0 \bar{k}_{34} w_0 \bar{w}_4 &= 0, \\
\frac{m_0 \bar{m}_4 w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_4}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 \bar{c}_{44} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_4}{\partial \bar{t}} + k_0 \bar{k}_{43} w_0 \bar{w}_3 + k_0 \bar{k}_{44} w_0 \bar{w}_4 + k_0 \bar{k}_{45} w_0 \bar{w}_5 &= 0, \\
\frac{m_0 \bar{m}_5 w_0}{T_1^2} \frac{\partial^2 \bar{w}_5}{\partial \bar{t}^2} + \frac{c_0 \bar{c}_{55} w_0}{T_1} \frac{\partial \bar{w}_5}{\partial \bar{t}} + k_0 \bar{k}_{54} w_0 \bar{w}_4 + k_0 \bar{k}_{55} w_0 \bar{w}_5 &= 0, \\
\bar{m}_1 \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{11} \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{11} \bar{w}_1 + \bar{k}_{12} \bar{w}_2) &= \pi_3 \bar{P}_3 \sin(\pi_4 \bar{\theta} \bar{t}), \\
\bar{m}_2 \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{22} \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{21} \bar{w}_1 + \bar{k}_{22} \bar{w}_2 + \bar{k}_{23} \bar{w}_3) &= 0, \\
\bar{m}_3 \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{33} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{32} \bar{w}_2 + \bar{k}_{33} \bar{w}_3 + \bar{k}_{34} \bar{w}_4) &= 0, \\
\bar{m}_4 \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{44} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{43} \bar{w}_3 + \bar{k}_{44} \bar{w}_4 + \bar{k}_{45} \bar{w}_5) &= 0, \\
\bar{m}_5 \frac{\partial^2 \bar{w}_5}{\partial \bar{t}^2} + \pi_1 \bar{c}_{55} \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \bar{t}} + \pi_2 (\bar{k}_{54} \bar{w}_3 + \bar{k}_{55} \bar{w}_5) &= 0, \\
\bar{t} = t/T_1, \quad \bar{w}_i = w_i/w_0, \quad \bar{m}_i = m_i/m_0, \quad \bar{k}_{ij} = k_{ij}/k_0, \quad \bar{c}_{ii} = c_{ii}/c_0.
\end{aligned} \tag{125}$$

Параметрҳои монандӣ π_i шакли (114) ва (119)-ро доранд. Ҳамин тавр, бо афзудани шумораи дараҷаҳои озод, шумораи параметрҳои монандӣ тағйир намеёбад.

ХУЛОСА

Ин таҳқиқот ба моделсозии масъалаҳои динамикӣ ҳангоми ҳисобу таҳлили биноҳои бо ҷудокунакҳои сейсмикӣ мучаҳҳаз бо истифода аз методи мутамарказкунонии деформатсияҳо бахшида шудааст, ки яке аз самтҳои муҳим ва мубрами механикаи сохтмон ва назарияи зилзилатобоварӣ ба ҳисоб меравад. Дар шароити афзудани ҳавфи сейсмикӣ таҳияи методҳои муосири ҳисоб, ки имкони бозътимоди баҳогузорӣ намудани ҳолати шиддатнокии деформатсияшавии иншоотро фароҳам месозанд, аҳамияти хоса пайдо менамояд.

Дар қори мазкур модели математикӣ барои бинои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар асоси пешниҳоди унсурҳои борбардор ҳамчун системаи массаҳои мутамарказонидашуда, саҳтӣ ва пайвастиҳои демпфиронӣ дар доираи методи мутамарказкунонии деформатсияҳо таҳия гардидааст. Муодилаҳои ҳаракати иншоот ҳангоми таъсири лаппиши сейсмикӣ бо дарназардошти ҳосиятҳои инерсионӣ, чандрӣ, демпфиронӣ ва инчунин хусусиятҳои ғайриҳаттии ҷудокунакҳои сейсмикӣ тартиб дода шудаанд.

Барои ҳал намудани масъалаҳои динамикӣ алгоритмҳои адабии ҳисоб дар асоси усулҳои муосири интегралгирӣ аз рӯи вақт амалӣ гардонидани шудаанд. Таҳлили спектралӣ ва таҳлили мустақими динамикӣ барои муайян намудани аксуламали сейсмикии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ ҳангоми таъсирҳои гуногуни заминларза иҷро карда шудааст. Ҳамчунин муқоисаи натиҷаҳои бадастомада бо усулҳои анъанавии ҳисоб гузаронида шуда, самаранокии татбиқи ҷудокунакҳои сейсмикӣ баҳогузорӣ шудааст.

Дар асоси натиҷаҳои ҳисобҳои адабӣ муайян карда шудааст, ки истифодаи системаҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ ба коҳиш ёфтани қувваҳои сейсмикӣ, ҷойивазкуниҳо ва шитоб оварда расонида, сатҳи бозътимодӣ ва амнияти истифодабарии биноҳоро ба таври назаррас баланд мебардорад. Натиҷаҳои таҳқиқот метавонанд дар амалияи тарҳрезӣ ва ҳисобу санҷиши биноҳо ва иншооти зилзилатобовар дар минтақаҳои ҳафноки сейсмикӣ истифода шаванд.

Таҳқиқот дорои аҳамияти илмӣ ва амалӣ буда, метавонад дар фаъолияти илмӣ-тадқиқотӣ ва раванди тайёр намудани мутахассисони соҳаи сохтмон ва зилзилатобоварӣ мавриди истифода қарор гирад. Натиҷаҳои асосии илмии диссертатсия:

1. Модели математикӣ ва алгоритми ҳисобӣ таҳия шудаанд, ки таҳлили муқаммали рафтори динамикии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ ҳангоми намудҳои гуногуни борбардорӣ, аз ҷумла таъсирҳои сейсмикӣ, ки бо акселерограммаҳои заминларзаҳои воқеӣ муайян мегарданд, таъмин менамоянд [1-М], [2-М], [7-М], [9-М], [10-М], [13-М], [15-М], [16-М], [17-М], [18-М], [19-М], [22-М], [26-М], [37-М], [47-М], [48-М], [50-М], [51-М], [60-М], [61-М], [64-М], [68-М], [72-М], [73-М].

2. Истифодаи тақягоҳҳои фриксионӣ-маятникӣ ба сифати ҷудокунакҳои сейсмикӣ ба коҳишёбии назарраси омилҳои қуввагии дохилӣ дар унсурҳои конструктивӣ нисбат ба системаҳои анъанавии борбардори бидуни ҳифзкунакҳои сейсмикӣ оварда мерасонад [1-М], [2-М], [15-М], [16-М], [18-М], [19-М], [20-М], [23-М], [27-М], [34-М], [35-М], [39-М], [42-М], [47-М], [48-М], [61-М], [75-М], [79-М].

3. Алгоритм ва барномаи компютери таҳияшуда имконият медиҳанд, ки озмоишҳои адабӣ ҷиҳати таҳлили хусусиятҳои динамикии биноҳо бо схемаҳои гуногуни конструктивӣ ва камарбанди ҷудокунакҳои сейсмикӣ ҳангоми таъсирҳои гуногуни беруна гузаронида шаванд. Методикаи пешниҳодшуда инчунин имконияти таҳқиқи модели физикии фрагменти бинои синҷиро фароҳам меорад [4-М], [5-М], [8-М], [11-М], [14-М], [21-М], [28-М], [32-М], [33-М], [43-М], [44-М], [53-М], [63-М], [66-М], [83-М].

4. Модели математикӣ ва барномаи компютерӣ барои таҳқиқи ҳолати шиддатнокӣ-деформатсионии модели бинои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо дарназардошти қори ғайриҳаттии тақягоҳҳои резинофилизӣ таҳия шудаанд. Нишон дода шудааст, ки истифодаи ҷудокунакҳои сейсмикӣ шитоб ва ҷобачогузории нисбии байниқабатиро ба таври назаррас коҳиш медиҳад, вале ҳамзамон ҷойивазкунии мутлақи бино нисбат ба объекти ҳаммонанди бидуни ҷудокунакҳои сейсмикӣ афзоиш меёбад. Мутобикати амалии басомадҳо, ки бо ду усул бадаст омадаанд, эътимоднокии натиҷаҳои ҳосилшударо тасдиқ менамояд [1-М], [22-М], [23-

М], [26-М], [27-М], [29-М], [32-М], [33-М], [38-М], [42-М], [47-М], [50-М], [55-М], [56-М], [68-М], [72-М], [74-М], [75-М], [82-М].

5. Дар асоси усули аппроксиматсияҳои пайдарпай алгоритми ҳисобӣ барои таҳлили масъалаи динамикӣ бо дарназардошти соиши хушк таҳия гардида, таъсири қувваҳои фриксионӣ ба рафтори динамикии конструксия таҳқиқ шудааст [1-М], [6-М], [27-М], [35-М], [36-М], [50-М], [51-М], [55-М].

6. Методи мутамарказкунонии деформатсияҳо барои ҳалли масъалаҳои динамикии ҳисобкунии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ ҳангоми таъсирҳои сейсмикӣ бомуваффақият мутобик карда шудааст. Алгоритм ва барномаҳои компютери таҳияшуда таҳқиқи мукаммали лаппишҳои озод ва маҷбурии конструксияҳои муҳофизатшударо ҳангоми намудҳои гуногуни борбардории динамикӣ таъмин менамоянд. Натиҷаҳои моделсозии ададӣ самаранокии баланди таъғоҳҳои резинофилизи бо ҷудокунакҳои сейсмикӣ боэътимод тасдиқ мекунад [1-М], [11-М], [12-М], [13-М], [15-М], [37-М], [39-М], [40-М], [41-М], [47-М], [53-М], [64-М], [65-М], [77-М], [78-М], [80-М], [81-М].

7. Модели ҳисобии динамикии бинои бисёррошонаи синҷӣ бо системаи ҷудокунакҳои сейсмикӣ пешниҳод шудааст, ки маҷмӯи ҷойивазкуниҳои тулонӣ, хаттӣ, хашишӣ ва тобхурдаи массаҳоро бо методи мутамарказкунонии деформатсияҳо ба инобат мегирад. Ҳалли масъалаи лаппишҳои бинои баландрошонаи дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар асоси методи мутамарказкунонии деформатсияҳо пайдоиши лаппишҳои уфукии басомади баландро ҳангоми дарназардошти таъсирҳои тобхурӣ ба таҳкурсии ошкор намуд. Истифодаи равиши пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки таҳлили мукаммали рафтори динамикии иншоот ҳангоми таъсирҳои мураккаби бисёркомпонентии сейсмикӣ анҷом дода шавад [1-М], [9-М], [10-М], [12-М], [19-М], [15-М], [22-М], [26-М], [30-М], [31-М] [36-М], [39-М], [42-М], [77-М], [78-М], [81-М].

8. Самаранокии иқтисодии системаҳои ҷудокунакҳои сейсмикӣ махсусан ҳангоми заминларзаҳое, ки аз параметрҳои ҳисобӣ зиёдтаранд, ба таври равшан зоҳир мегардад, зеро онҳо осебпазирии конструксияҳои борбардор ва таҷҳизоти гаронарзишро ба таври назаррас коҳиш дода, хароҷотро барои корҳои барқарорсозӣ ва тақвиятдиҳӣ кам менамоянд [1-М], [24-М], [32-М], [38-М], [57-М], [58-М].

9. Дар асоси назарияи монандӣ натиҷаҳои моделсозии пластаҳо ва фрагменти бинои бисёррошона бо дарназардошти ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бидуни он бадаст оварда шудаанд. Коэффитсиентҳои монандӣ муайян карда шудаанд, ки интиқоли маълумотро аз модели микроспазир ба объекти асли таъмин менамоянд [1-М], [3-М], [6-М], [16-М], [18-М]. [22-М], [34-М], [54-М].

10. Сохтани конструксияҳои самараноки зилзилатобовар барои шароити мураккаби муҳандисӣ-геологӣи Ҷумҳурии Тоҷикистон тақмили усулҳои муосири ҳисобкуниро ба таъсирҳои сейсмикӣ талаб менамояд. Дар шароити шаҳри Душанбе истифодаи таъғоҳҳои резинофилизи ҳамчун системаи самараноки ҳифзкунакҳои сейсмикӣ оптималӣ эътироф шудааст. Модели математикӣ ва барномаи компютери таҳияшуда метавонанд барои таҳқиқи объектҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар марҳилаи тарҳрезии вариантӣ истифода шаванд [1-М], [3-М], [6-М], [16-М], [20-М], [25-М], [49-М], [76-М], [82-М], [84-М].

Тавсияҳо оид ба истифодаи амалии натиҷаҳои таҳқиқот

Методикаҳои пешниҳодшудаи ҳисобкунӣ ва барномаҳои компютери таҳияшуда имкон медиҳанд, ки рафтори динамикии биноҳои бисёршӯна бо дарназардошти ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бидуни он ҳангоми таъсирҳои гуногун, аз ҷумла таъсирҳои сейсмикӣ, мавриди таҳқиқ қарор дода шавад. Маводҳои диссертатсия метавонанд аз ҷониби муҳандисон-ҳисобгарони ташкилотҳои лоиҳакашӣ ҳангоми таҳияи лоиҳаҳои биноҳои бисёршӯнаи системаҳои гуногуни конструктивӣ бо дарназардошти ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бидуни он, инчунин дар корҳои илмӣ-таҳқиқотӣ истифода шаванд.

Маҷмуи барномавии таҳияшуда, ки методи мутамарказкунонии деформатсияҳо ва таҳлили мустақими динамикиро татбиқ менамояд, ба амалияи лоиҳакашии ҶСК НИПИИ «САНИИОСП» ва КВД НИПИ «Душанбешаҳрсоз» ҷорӣ карда шуда, барои иҷрои ҳисобкунонии муқоисавии биноҳои синҷӣ ба таъсирҳои сейсмикӣ бо дарназардошти ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бидуни он истифода мегардад. Истифодаи минбаъдаи ин методика имкон медиҳад, ки қарорҳои лоиҳавии биноҳои бисёршӯна аз рӯи нишондиҳандаҳои мустақамӣ ва саҳтӣ оптимизатсия гардида, арзиши сохтмон коҳиш ёфта ва муҳлатҳои иҷрои корҳои васлкунӣ кӯтоҳ гарданд.

Барномаҳои компютери таҳияшуда минбаъд ҳангоми ҳисобкунӣ ва лоиҳакашии биноҳои бисёршӯнаи системаҳои гуногуни конструктивӣ, аз ҷумла биноҳое, ки бо системаҳои тахтагин иҷро шудаанд, истифода хоҳанд шуд. Натиҷаҳои илмӣ таҳқиқоти диссертатсионӣ ба раванди таълимии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осими ҷорӣ гардида, ҳангоми омодагии магистрантон ва докторантони PhD, инчунин дар раванди арзёбии экспертизаи лоиҳаҳои кории биноҳои бисёршӯнаи синҷӣ татбиқ мегарданд (ниг. замимаи №1 диссертатсия).

Ба барномаҳои компютери таҳияшуда 8 то шаҳодатномаҳои муаллифӣ ва як патенти хурд - № TJ 1453 аз 04 декабри соли 2023 дода шудаанд (ниг. замимаи №2 диссертатсия), аз ҷумла:

1. Барномаи моделсозии ададии бинои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ ҳангоми таъсири бисёркомпонентӣ бо методи мутамарказкунонии деформатсияҳо;
2. Барномаи моделсозии ададии биноҳо бо тақягоҳҳои резина - филизӣ;
3. Барномаи ҳалли ададии масъалаи динамикии бинои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо камарбанди лағжанда;
4. Барномаи ҳалли ададии масъалаҳои статикӣ ва динамикии болорҳо бо методи мутамарказкунонии деформатсияҳо;
5. Барномаи ҳисобкунии биноҳои бисёршӯна ба таъсирҳои сейсмикӣ бо методи мутамарказкунонии деформатсияҳо;
6. Барномаи ҳисобкунии биноҳои бисёршӯна ба таъсирҳои сейсмикӣ бо дарназардошти хомушкунандаи динамикӣ;
7. Барномаи ҳисобкунии болорҳо дар таҳқурии чандири бо методи мутамарказкунонии деформатсияҳо;
8. Барномаи ҳалли ададии системаи «Платформа-модел-бино» ҳангоми таъсири борҳои ларзишӣ.
9. Патенти хурд № TJ 1453 аз 04 декабри соли 2023 барои ихтирои стенд ҷиҳати моделсозии таъсири сейсмикӣ ба модели физикии бино ва иншоот.

РУЙХАТИ АДАБИЁТ

- [1]. Айзенберг, Я.М. Сейсмоизоляция. Теория и реальное поведение при землетрясениях: сейсмоизоляция зданий и сооружений [Текст] / Я.М. Айзенберг // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2006. - №4. - С. 28 -33.
- [2]. Акимов, П.А. Дискретно-континуальные методы расчета строительных конструкций: дис. докт. техн. наук : 05.23.17 / П.А.Акимов; Москов. гос. стр. ун-т. - Москва, 2005. - 460 с
- [3]. Батэ, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст] / К. Батэ, Р. Вильсон. - М. Стройиздат. 1982. – 447с.
- [4]. Болотин, В.В. Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений [Текст] / В.В.Болотин. - М.: Стройиздат. 1982.
- [5]. Болотин, В.В. Применение статистических методов для оценки прочности конструкций при сейсмических воздействиях [Текст] /В.В. Болотин // Инженерный сборник, т.27., М., Изд-во АН СССР, 1960. - С.55-65.
- [6]. Власов, В.З. Балки, плиты, оболочки на упругом основании [Текст] / В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев // М.: Физматгиз, 1966.
- [7]. Габбасов, Р.Ф. Численное построение разрывных решений задач строительной механики [Текст] / Р.Ф. Габбасов, А.Р. Габбасов, В.В. Филатов. - М.: Издательства АСВ, 2008. - 277с.
- [8]. Гольденблат, И.И. Расчёт конструкций на действие сейсмических и импульсивных сил [Текст] / И.И. Гольденблат, Н.А. Николаенко. – М.: Госстройиздат. 1961. – 320 с.
- [9]. Горбунов-Посадов, М.И. Расчёт конструкций на упругом основании [Текст] / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин. - М.: Стройиздат, 1984. - 679с.
- [10]. Додонов, М.И. Развитие и применение метода сосредоточенных деформаций к расчёту проёмных диафрагм многоэтажных зданий [Текст] / М.И. Додонов // Строительная механика и расчёт сооружений, 1984. - № 6. - С. 65 - 69.
- [11]. Дукарт, А.В. Задачи теории ударных гасителей колебаний [Текст] / А.В. Дукарт. - М.: АСВ, 2006. - 205 с.
- [12]. Дюкина, Н.С. Численное моделирование взаимодействия заглубленных сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях [Текст]: - дисс. на соиск. учен. степ. кан. физ. мат наук/ Н.С. Дюкина. - Нижний Новгород, 2009. - 118с.
- [13]. Жунусов, Т.Ж. Исследования каркасного здания на сейсмоизолирующих опорах [Текст] / Т.Ж. Жунусов, Ю.Г. Шахнович, И.Г. Горовиц, А.Н. Королёв. – Бетон и железобетон, 1985. – №7. – С. 42 – 43.
- [14]. Каландарбеков, И. Развитие метода сосредоточенных деформаций применительно к расчётам конструкций с учётом податливости соединений [Текст]: дисс. докт. техн. наук/ И. Каландарбеков. - М., 2009. - 425 с.
- [15]. Каландарбеков, И.К. Сравнительный анализ различных типов сейсмоизоляции в многоэтажных зданиях [Текст] / И.К. Каландарбеков, Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков // Известия АН РТ. Отд. физ - мат., хим., геолог. и техн. наук, 2016. - №4 (165). - С. 58 – 64.
- [16]. Каландарбеков, И. Исследование влияния сухого трения в здании со скользящим поясом [Текст]/ И. Каландарбеков, Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков М.Б. Марамов // Научно-технический журнал Машиноведение - Бишкек, Республика Кыргызистан, 2022. - С. 93- 104.
- [17]. Килимник, Л.Ш. Анализ работы зданий со скользящим поясом с использованием многомассовой расчётной модели [Текст] / Л.Ш. Килимник, Л.Л. Солдатова, Л.И. Ляхина //Строительная механика и расчёт сооружений, 1986. - №6. - С. 69 -73.
- [18]. Киселев, Ф.Б. Численное моделирование в задачах механики грунтов [Текст]: дисс. на соиск. учён. степени к.ф.-м.н. / Ф.Б. Киселев. - Москва. 2006.-135с
- [19]. Клаф, Р. Динамика сооружений [Текст] / Р. Клаф, Дж. Пензиен. - М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.

- [20]. Коренев, Б.Г. Динамический расчёт сооружений на специальные воздействия [Текст] / Б.Г. Коренев И.М. Рабинович. - М.: Стройиздат, 1981. – 232 с
- [21]. Коренев, Б.Г. Динамические гасители колебаний. Теория и технические приложения [Текст] / Б.Г. Коренев, Л.М. Резников. - М.: Наука, 1988. – 304 с.
- [22]. Кузнецов, С. В. Волны Лэмба в анизотропных средах: шестимерный формализм Коши // Математическое моделирование. - 2017. - Т. 29, № 10. - С. 86 -94.
- [23]. Ляхов, Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах [Текст] / Г.М. Ляхов. - М.: Наука. 1982. - 288с.
- [24]. Мамин, А.Н. Сопротивление перекрытий из плит безопалубочного формирования кручению и деформированию в плоскости [Текст]: авторе. дисс. канд. техн. наук/ А.Н. Мамин. - М. -1986. - 20с.
- [25]. Мкртычев, О.В. Проблемы учёта нелинейностей в теории сейсмостойкости. (гипотезы и заблуждения) [Текст] / О.В. Мкртычев, Г.А. Джинчвелашвили. - Монография. МГСУ, 2012, 192с.
- [26]. Мкртычев, О.В. Надёжность железобетонных зданий с системой сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор при землетрясении [Текст] / О.В. Мкртычев, А.А. Бунов. - М.: Издательство АСВ, 2016. - 121 с.
- [27]. Мондрус, В. Л. Статистические характеристики сейсмических волн в случайно-неоднородной упругой среде: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.03 / В.Л. Мондрус; Моск. инж. - строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. - Москва, 1988. -179 с.
- [28]. Назаров, А.Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил [Текст] / А. Г. Назаров. - Ереван, 1959. - 286 с.
- [29]. Низомов, Д.Н. Метод граничных уравнений в решении статических и динамических задач строительной механики [Текст]/Д.Н. Низомов - М.: Издательство АСВ, 2000. - 282с.
- [30]. Низомов, Д.Н. Численное моделирование динамических задач по расчёту сейсмоизолированных зданий [Текст] / Д.Н. Низомов // Материалы международной научной конференции. - НАНТ, Душанбе, 14-15 сентября 2020. - С. 62-70.
- [31]. Низомов, Д.Н. Численное решение задачи со скользящим поясом в системе «платформа - модель здания». [Текст] / Д.Н. Низомов, И.К. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков // Международной научно-практической конференции «Новые направления развития науки в технических отраслях» Таджикский технический университет
- [32]. Ормонбеков, Т. Слоистые эластомерные конструкции [Текст] / Т. Ормонбеков, У. Бегалиев, Г.Максимов // - Бишкек, Издательский центр «МОК», 2004. - 144 с.
- [33]. Пастернак, П.Л. Основы нового метода расчёта фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели [Текст] / П.Л. Пастернак. - М.: Госстройиздат, 1964.
- [34]. Поляков, С.В. Современные методы сейсмозащиты зданий [Текст] / С.В. Поляков, Л.Ш. Килимник, А.В.Черкашин - М.: Стройиздат, 1989. - 320 с.
- [35]. Резников, Л.М. Эффективность динамического гасителя колебаний при нестационарных случайных воздействиях [Текст] / Л.М. Резников, Г.М. Флишман // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1981. – № 1. – С. 56 – 59.
- [36]. Ржаницын, А.Р. Расчёт сплошных конструкций методом упругих сосредоточенных деформаций [Текст] / А.Р. Ржаницын //Стр. мех. и расч. соор., 1980. – № 5.– С. 15 – 20.
- [37]. Розин, Л.А. Основы метода конечных элементов в теории упругости [Текст] / Л.А. Розин. - Л., 1972. -77с.
- [38]. Рутман, Ю.Л. Определение оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции [Текст] / Ю.Л. Рутман, Н.В. Ковалева, Г.В. Давыдова //Инженерно – строительный журнал. – СПбГПУ, 2013. – №5 (40). – С. 107 – 115.
- [39]. Савинов, О.А. Сейсмоизоляция сооружений. [Текст] / О.А. Савинов //Избранные статьи и доклады. Динамические проблемы строительной механики. – СПб., 1993. – С.155 – 178.
- [40]. Саргсян, А.Е. Строительная механика [Текст] / А.Е. Саргсян // Высшая школа,

Москва, 2004

- [41]. Сеницын, А. П. Метод конечных элементов в динамике сооружений: [Текст] / А. П. Сеницын. - М: Стройиздат, 1978. - 231с.
- [42]. Смирнов, А.Ф. Расчёт сооружений с применением вычислительных машин [Текст] / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лашеников, Н.Н. Шапошников. - М.: Стройиздат, 1964. - 380с.
- [43]. Смирнов, В.И. Испытания зданий с системами сейсмоизоляции динамическими нагрузками и реальными землетрясениями [Текст] / В.И. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – М., 2009. – № 4.– С. 23 – 28.
- [44]. Смирнов, В.И. Сейсмоизоляция для вновь проектируемых и усиления существующих зданий [Текст] / В.И. Смирнов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2004. - № 4. - С. 49 -54.
- [45]. Тяпин, А.Г. Сочетание двух моделей в расчётах сейсмической реакции сооружения, взаимодействующего с грунтовым основанием [Текст] / А.Г. Тяпин // Строительная механика и расчёт сооружений. №1, 2006. - С.43-47.
- [46]. Тимошенко, С.П. Статические и динамические проблемы теории упругости [Текст] / С.П. Тимошенко. – Киев, «Наукова думка», 1975. – 564 с.
- [47]. Уздин, А.М., Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений [Текст] / А.М. Уздин, Т.А. Сандович, М.С. Аль Насер. - СПб.: Издательство ВНИИГ, 1993. - 176 с.
- [48]. Филатов, В.В. Развитие теории и разработка численной методики расчёта составных стержней и пластин [Текст]: автореф. дис. д – ра. техн. наук / В.В. Филатов. - М.: МГСУ, 2015, 38 с.
- [49]. Хачиян, Э.Е. Сейсмические воздействия на высотные здания и сооружения [Текст] / Э.Е. Хачиян. - Ереван: Айастан, 1973. - 328с.
- [50]. Черепинский, Ю.Д. Сейсмоизоляция зданий. Строительство на кинематических опорах [Текст] / Ю.Д. Черепинский. // (Сборник статей). - М.: Blue Apple, 2009. - 47 с.
- [51]. Шапошников, Н.Н. Расчёт пластинок на изгиб по методу конечного элемента [Текст] / Н.Н. Шапошников // Труды МИИТ, вып. 260, М.: Изд. литературы по строительству. - 1968. - С. 134 - 144.
- [52]. Chopra, A.K. Dynamic of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering. [Text] / A.K. Chopra // – New Jersey: Prentice – Hall, 2006. – 794p.
- [53]. Hirokazu, I. Optimum design of resilient sliding isolation system to protect equipments [Text] / I. Hirokazu, T. Taghikhany //Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. – 2004. – Reference paper. – P.1362.
- [54]. Kelly, J.M. Earthquake resistant design with rubber [Text] / J.M. Kelly. – London: Springer – Verl., 1997. – 243 p.
- [55]. Robinson, W.H. A lead – rubber shear damper. [Text] / W.H. Robinson Bull // N. Z. Natl. Soc. Earthq. Eng., 1977. – 3. – PP. 93 – 101.
- [56]. Skinner, R.I., An Introduction to Seismic Isolation; [Text] / R.I. Skinner, W.H. Robinson, G.H. Mc. Verry // John Wiley and Sons Inc.: New York, NY, USA, 1993.

Натиҷаҳои асосии кор дар наирияхои зерин ҷоп карда шудаанд.

Монография

[1-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование динамических задач по расчёту зданий с учётом сейсмоизоляции/ Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков//Душанбе, Дониш, 2025. – 286с.

Мақолаҳои, ки дар наирияхои пешниҳодкардаи КОА -и назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ҷоп шудаанд.

[2-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное построение спектров сейсмических колебаний [Текст]/ Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков// Доклады НАНТ 2025, том 68, №6. - С. 588-597.

[3-М]. **Каландарбеков, И.И.** Экспериментальные исследования моделей железобетонных балок на основе теории подобия [Текст]/ Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, У.М.Махмадиев, И.И.Каландарбеков, И.Ш.Ашуров// Доклады НАНТ 2025, том 68, №6. - С. 578-587.

[4-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование обратного преобразования Фурье [Текст]/ Д.Н.Низомов, И.К.Каландарбеков, И.И.Каландарбеков // Доклады НАНТ 2025, том 68, №5. - С. 496-504.

[5-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование системы «платформа-модель здания»с сейсмоизолирующим поясом [Текст]/ Низомов Д. Н., Каландарбеков И. К., Каландарбеков И. И. // «Вестник гражданских инженеров»- Санкт-Петербург, 2025, № 3 (110). - С. 60-67. doi: 10.23968/1999-5571-2025-22-3-60-67.

[6-М]. **Каландарзода, И.И.** Критерии подобия как результат преобразования дифференциальных уравнений для моделирования строительных конструкций [Текст] / Каландарзода И.И. // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук ТНУ Душанбе. 2025, № 3. - С. 99-106. ISSN: 2664-1534

[7-М]. **Каландарзода, И.И.** Модели и методы анализа динамических задач взаимодействия здания с грунтовым основанием при сейсмическом воздействии. [Текст] / Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарзода И.И.// Политехнический вестник, Серия «Инженерные исследования». Душанбе, №3 (71), 2025. - С. 144-151.

[8-М]. **Каландарзода, И.И.** Амплитудные спектры различных землетрясений. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарзода И.И.// Политехнический вестник, Серия «Инженерные исследования». Душанбе, №2 (70), 2025. - С. 188-195.

[9-М]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование свободных колебаний сейсмоизолированного здания на основе линейной модели [Текст] / Каландарбеков И.И. // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. ТНУ, Душанбе. 2025, № 2. - С. 92-98. ISSN: 2664-1534

[10-М]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование системы «платформа – модель здания» [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.// Моделирование системы «платформа – модель здания». *НАУКА и ТЕХНИКА*. Минск. Республика Беларусь. 2025, 24(4):297-306. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-297-306>

[11-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное решение статической задачи по расчёту дисков перекрытий методом сосредоточенных деформаций. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Исвалиев Д.Дж., Каландарбеков И.И.// Политехнический вестник, Серия «Инженерные исследования». Душанбе, №1 (69). - 2025. - С. 134-137.

[12-М]. **Каландарбеков, И.И.** Динамический расчёт рам методом сосредоточенных деформаций [Текст]/ Каландарбеков И.И. // Известия НАН Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. Душанбе: НАНТ, 2024, № 3 (196). - С. 67-74.

[13-М]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование изгиба плит с защемленными краями методом сосредоточенных деформаций [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.И., Каландарбеков И.К. // Известия НАН Таджикистана. Отделение физико – математических, химических, геологических и технических наук. – Душанбе: НАНТ, 2024, № 2 (195). – С. 25-31. ISSN 0002-3485

[14-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование динамических задач пологой оболочки [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И., Джонмамадова М.Т., Мамаднабиева А.П. // Научный журнал. Политехнический вестник, (серия инженерные исследования) - Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2024, №1 (59). – С. 127-130. ISSN 2520-2227

[15-М]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование сейсмоизолированных зданий [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.И., Каландарбеков И.К. // Известия НАНТ. Отделение физико – математических, химических, геологических и технических наук. – Душанбе: НАНТ, 2023, № 2(191) – С.133-140. ISSN 0002-3485

[16-М]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование каркасных зданий с элементами сейсмоизоляции на основе теории подобия [Текст]/ Каландарбеков И.И.// Доклады НАНТ. 2023, том 66. № 7-8. - С. 434-438.

[17-М]. **Каландарбеков, И.И.** Проблема сейсмической безопасности глинобитных домов на территории Республики Таджикистан [Текст]/ Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Шарифзода А.Ш. // Научный журнал. Политехнический вестник, Серия инженерные исследования. - Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, №2 (62) – 2023. – С. 214-219. ISSN 2520-2227

[18-М]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование сейсмоизолированных зданий на основе теории подобия [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И. // Известия НАНТ. Отделение физико – математических, химических, геологических и технических наук. – Душанбе: НАНТ, 2023, № 1(190). – С.109-116. ISSN 0002-3485

[19-М]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование динамической модели здания с дискретными параметрами при гармоническом колебании основания [Текст]/ Каландарбеков И.И.//Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2022, № 3 (59). - С. 121-127.

[20-М]. **Каландарбеков, И.И.** О некоторых полученных результатах экспериментальных исследований физической модели здания из железобетона. [Текст]/ Каландарбеков И.И. // Научный журнал. Политехнический вестник, Серия инженерные исследования. Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2022, №1 (57). – С.142-148. ISSN 2520-2227

[21-М]. **Каландарбеков, И.И.** Анализ точности и сходимости метода сосредоточенных деформаций [Текст]/ Каландарбеков И.И. // Известия НАНТ. Отделение физико – математических, химических, геологических и технических наук. – Душанбе: НАНТ, 2022, № 3(188). – С. 143-151. ISSN 0002-3485

[22-М]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование в задачах строительной механики [Текст] / Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. - №3 (59) – 2022. Душанбе: – С.127-130. ISSN 2520-2227

[23-М]. **Каландарбеков, И.И.** Экспериментальные исследования на модели сейсмоизолированного здания. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И. // Научный журнал. Политехнический вестник, Серия инженерные исследования. Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2022. №2 (58). – С. 152-157. ISSN 2520-2227

[24-М]. **Каландарбеков, И.И.** Экономическая эффективность сейсмоизолированного здания. [Текст]/ Давлатзода К.К., Каландарбеков И., Саидов Ф.Ю., Каландарбеков И.И. // Научный журнал. Политехнический вестник, Серия Интеллект. Инновации. Инвестиции. Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2022. №1(57). – С. 60- 65. ISSN 2520-2227

[25-М]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование задачи взаимодействия здания с основанием в условиях высокой сейсмичности. [Текст]/ Каландарбеков И.К., Махмадиев У.М., Каландарбеков И.И. // Политехнический вестник, Серия инженерные исследования. - Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, – 2022. №1 (57). - С. 132-141. ISSN 2520-2227

[26-М]. **Каландарбеков, И.И.** Математическое моделирование зданий с учётом работы резинометаллических опор. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И. // Вестник ТТУ. - Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2022, №1. - С. 121- 127. ISSN 2520-2227

[27-М]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование влияния сухого трения в здании со скользящим поясом [Текст]/ Каландарбеков И., Низомов Д.Н., Каландарбеков И.И., Марамов М.Б // Научно-технический журнал Машиноведение - Бишкек, 2022. - С. 93- 104. ISSN 1694-7657.

[28-М]. **Каландарбеков, И.И.** О методах расчёта несущих систем многоэтажных зданий на основе дискретных моделей [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И. Известия НАНТ. Отделение физико – математических, химических, геологических и технических наук. – № 4(185) - 2021. – С.110-117. ISSN 0002-3485

[29-М]. **Каландарбеков, И.И.** Об учёте податливости стыковых соединений в расчётах элементов многоэтажных зданий [Текст]/ Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И., Низомов Д.Н. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. - №2(54) – 2021. Душанбе: – С.135-141. ISSN 2520-2227

[30-М]. **Каландарбеков, И.И.** Об оценке зависимости между коэффициентом допускаемых повреждений и пластичности в рамках спектральной теории сейсмостойкости [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Шарипов Ш.Ш., Каландарбеков И.И. // Политехнический вестник. Серия инженерных исследования. ТТУ им. акад. М.С. Осими. - Душанбе, 2020, №4(52). - С. 117-122. ISSN 2520-2227

[31-М]. **Каландарбеков, И.И.** Динамические характеристики железобетонных высотных сооружений [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Шарипов Ш.Ш., Каландарбеков И.И. // Политехнический вестник. Серия инженерных исследования. - Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2020, №4(52). - С. 117-122. ISSN 2520-2227

[32-М]. **Каландарбеков, И.И.** Оценка напряженно – деформированного состояния конструкций зданий по результатам остаточной прочности [Текст] / Каландарбеков И.И., Валиев Х.Ш., Джонмамадова М. // Наука и инновация, ТНУ, серия геологической и технической науки. - Душанбе: ТНУ, 2020, №2. - 66-73. ISSN 2664-1534

[33-М]. **Каландарбеков, И.И.** Оценка напряженно – деформированного состояния конструкций зданий по результатам визуального обследования [Текст] / Каландарбеков И.И., Валиев Х.Ш., Джонмамадова М.// Наука и инновация, ТНУ, серия геологической и технической науки.-Душанбе: ТНУ, 2020, №1. - С. 85-92. ISSN 2664-1534

[34-М]. **Каландарбеков, И.И.** Инновационные методы защиты зданий и сооружений от землетрясений [Текст] /И.К. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков, Д.Н. Низомов //Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. - 2018. - №1(170). – С. 64 - 72.

[35-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование сейсмоизолированных зданий с сухим трением [Текст] /Д.Н. Низомов, И.К. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков //Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2018. - том 61. - №1. – С. 47 - 53.

[36-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование динамической системы «платформа-модель здания» [Текст] /Д.Н. Низомов, И.К. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков //Вестник гражданских инженеров. Санкт – Петербург, 2018. - №3(68). – С. 66 - 72.

[37-М]. **Каландарбеков, И.И.** Дискретная динамическая модель расчёта рам методом сосредоточенных деформаций [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков //Вестник Таджикского технического университета. Серия инженерных исследований. - 2017. - №2(38). – С. 96-101.

[38-М]. **Каландарбеков, И.И.** Сейсмоизоляция как средство защиты зданий от землетрясений [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков //Наука и инновация. Серия естественных наук. – 2017. - №2. – С. 133 - 136.

[39-М]. **Каландарбеков, И.И.** Спектры сейсмических колебаний на воздействие в виде заданной акселерограммы [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2017. - том 60. - №3-4. – С. 151-156.

[40-М]. **Каландарбеков, И.И.** Расчёт неразрезных балок от действия статических нагрузок методом сосредоточенных деформаций [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков //Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отдел. физико-математ., хим., геолог. и технич. наук. - 2016. - №1(162). – С. 85-91.

[41-М]. **Каландарбеков, И.И.** Расчёт неразрезных балок от действия динамических нагрузок методом сосредоточенных деформаций [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков //Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отдел. физико-математ., хим., геолог. и технич. наук. - 2016. - №2(163). – С. 63-68.

[42-М]. **Каландарбеков, И.И.** Сравнительный анализ различных типов сейсмоизоляции в многоэтажных зданиях [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков, И. Каландарбеков //Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. - 2016. - №4 (165). – С. 58-64.

Мақолаҳо дар скопус

[43-М]. **Kalandarbekov, I.I.** Lightweight and ultra-high ductility engineered geopolymer composite for marine application: Design and material characterization [Text]/ Jun Li ^{a b}, Lingzhi Li ^a, Lei Su ^a, Mahfouz Ahmadi ^c, Iftikhor Kalandarbekov ^d, Kequan Yu ^a, Fei Wang ^{a/} ELSEVIER, Case Studies in Construction Materials. Volume 22, July 2025, e04857, Scopus Q1

[44-М]. **Kalandarbekov, I.I.** Investigation of shrinkage and mechanical properties in iron sand high-strength engineered cementitious composites: effects of water-to-binder ratio and fiber volume fraction [Text]/ Zhi Zhangb, Nauman Ahmadb, Ajad Shresthab, Ziwei Caib, Iftikhor Kalandarbekov, Kequan Yu, Lingzhi Li// ELSEVIER, Case Studies in Constuction Materials. – China -2024, Scopus Q1

[45-М]. **Qalandarbekov, I.** Nature-based solutions for a sustainable future impact of phytotechnology on the environmental footprint and water resources [Text]/ Smuleac L., Davlatzoda S., Jurakhonzoda R., Qalandarbekov I. // Norwegian Journal of development of the International Science № 140, Norway-2024. - P.92-96

[46-М]. **Kalandarbekov, I.I.** Mathematical model construction of the isotropic filtration process based on darcy's law [Текст]/ I.I. Kalandarbekov, Laura Smuleac., R. Jurakhonzoda, U. Rasulov // Research Journal of Agricultural Science, 54 (1), 2022; ISSN: 2668-926X

Мақолаҳо дар маводҳои конференсияҳо ва дигар маҷаллаҳои илмӣ

[47-М]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование сейсмоизолированных зданий методом сосредоточенных деформаций. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.// Международная научно-практическая конференция по передовым технологиям в инженерии (2025). Ташкентский государственный транспортный университет, 8–10 октября 2025 г., г. Ташкент, Республика Узбекистан.

[48-М]. **Каландарбеков, И.И.** Методы сейсмозащиты зданий. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.// Международная научно-практическая конференция, г. Ташкент, 25 апреля, 2025.

[49-М]. **Каландарбеков, И.И.** Теоретические основы и инженерное применение теории подобия при моделировании строительных конструкций. [Текст]/ Каландарбеков И.К., Махмадиев У.М., Каландарбеков И.И.// Республиканская конференция. Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими, 17-18 апреля 2025, г. Душанбе. - С. 152-158.

[50-М]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование колебания модели здания со скользящим поясом. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И., Фарходов Р.С., Рахимов С.С. // Республиканская конференция. Таджикский технический университет им. акад. М.С.Осими, Душанбе, 17-18 апреля 2025. - С. 147-152.

[51-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное решение динамической задачи зданий с сейсмоизолирующим скользящим поясом [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.// Международная научно-техническая конференция на тему «сейсмическая безопасность зданий и сооружений, энергоэффективность, инновационные технологии в современном строительстве. Ташкентский государственный транспортный университет, 22–23 октября 2024 г., г. Ташкент, Республика Узбекистан, 2024. – С. 50 - 57.

[52-М]. **Каландарбеков, И.И.** Экспериментальные исследования модели железобетонных балок [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Махмадиев У.М., Каландарбеков И.И.// Международная научно – практическая конференция Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера, сегодня, завтра, посвящённая 60-летию образования архитектурной специальности. Душанбе, 2022. - С. 213-216.

[53-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное моделирование динамических задач пологих оболочек методом конечных разностей [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Джонмамадова М.Т.// Международная научно-теоретическая конференция «Развитие науки и образования в условиях глобализации на примере горных условий: проблемы, новые подходы и актуальные исследования», посвящённой 30 – летию сессии Верховного совета Республики Таджикистан и 30 -летию Хорогского государственного университета им. М. Назаршоева. Хорог, 2022. - С. 32-36.

[54-М]. **Каландарбеков, И.И.** Методы расчёта балок на упругом основании. [Текст]/ Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Саидов Ф. Ю.// Международная научно – практическая конференция Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера, сегодня, завтра, посвящённая 60-летию образования архитектурной специальности. Душанбе, 2022. - С. 193-196.

[55-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное решение динамической задачи по расчёту зданий со скользящим поясом [Текст]/ Каландарбеков И., Низомов Д.Н., Каландарбеков И.И.// Международная научно – практическая конференция Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера, сегодня, завтра, посвящённая 60-летию образования архитектурной специальности. Душанбе, 2022. - С. 210-213.

[56-М]. **Каландарбеков, И.И.** Экспериментальные исследования системы “платформа-модель здания” с элементами сейсмоизоляции. [Текст]/ Каландарбеков И., Низомов Д.Н., Каландарбеков И.И., Каримов Р.Ш., Сангинов А. М.// Международная научно – практическая конференция Архитектура и градостроительство Таджикистана: вчера, сегодня, завтра, посвящённая 60-летию образования архитектурной специальности. Душанбе, 2022. - С. 217-220.

[57-М]. **Каландарбеков, И.И.** Сравнительный анализ расчёта железобетонной ребристой плиты по зарубежным нормам [Текст]/ Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Насер Ахмад, Собит Масъуд, Гулов А.Н. Приоритетные направления развития науки и

образования. Сб. статьей XVIII международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНЦ «Наука и Просвещение», 2021. - С. 14-19. УДК 001.1 ББК 60 ISBN 978-5-00159-845-9

[58-М]. **Каландарбеков, И.И.** Анализ расчёта сечений железобетонных изгибаемых элементов по классическим методам [Текст]/ Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Джонмамадова М.Т., Собит Масъуд, Гулов А.Н.// Современная наука и молодые учёные. Сб. статьей VI международной научно-практической конференции. Состоявшейся 20 мая 2021г.- Пенза: МЦНЦ «Наука и Просвещение», 2021. - С. 35-40. УДК 001.1 ББК 60 ISBN 978-5-00159-866-4

[59-М]. **Каландарбеков, И.И.** Сравнительный анализ расчёта железобетонной многослойной плиты по разным методам [Текст]/ Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Марамов М.Б., Назаров А.М.// Молодые учёные России: сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции. В 2 ч. Ч.1. - Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2021. – С. 42-47. УДК 001.1 ББК 60 ISBN 978-5-00159-900-5 Ч.1

[60-М]. **Каландарбеков, И.И.** Математическое моделирование высотных сооружений [Текст]/ Каландарбеков И., Шарипов Ш.Ш., Каландарбеков И.И.// Материалы международной научно-практической конференции «Электроэнергетика Таджикистана. Проблемы энергосбережения, энергоэффективности и использования возобновляемых источников энергии», 19 мая 2021 года: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Душанбе, 2021. - С.155-158.

[61-М]. **Kalandarbekov, I.I.** Studies of free oscillations of buildings taking into account seismic isolation [Текст] /I.K. Kalandarbekov, D.N. Nizomov, I.I. Kalandarbekov //International conference «30 years after the Spitak earthquake: experience and perspective». Yerevan, Armenia, 3-7 December, 2018. - PP. 75 - 76.

[62-М]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование свободных колебаний динамической модели здания с учётом виброгасителя [Текст] /Д.Н. Низомов, И. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков //Материалы международной научно - практической конференции «Опыт, проблемы и перспективы повышения качества строительных работ на основе лучших отечественных и зарубежных практик (Часть 1), Душанбе, 2018. – С. 61- 67.

[63-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное решение динамической задачи системы «здание-виброгаситель» [Текст] /Д.Н. Низомов, И. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков //Материалы Международной научно-практической конференции «Вода - важный фактор для устойчивого развития» посвящённой международному десятилетию действия «Вода для устойчивого развития, 2018-2028» 21 апреля 2018г., Душанбе, 2018. – С. 274 - 278.

[64-М]. **Каландарбеков, И.И.** Математическое моделирование динамических задач методом сосредоточенных деформаций [Текст] /Д.Н. Низомов, И. Каландарбеков, И.И. Каландарбеков //Современные проблемы математики и её приложений. Материалы международной конференции, посвящённой 70-летию со дня рождения Илолова М., Душанбе, 14-15 марта 2018г., Душанбе. – С. 177 - 180.

[65-М]. **Каландарбеков И.И.** О некоторых результатах математического моделирования динамической системы «платформа – модель здания» [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Ходжибоев А.А., Каландарбеков И.И. //Труды ИГССиС АН РТ, вып. 1-2018. Душанбе: - С. 21-25. УДК 55.624.627(575.3)

[66-М]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование реакции виброплатформы при действии динамической нагрузки общего вида [Текст] /Д.Н. Низомов, И.И. Каландарбеков //Материалы республиканской научно-практической конференции «Повышение сейсмической безопасности городов и населённых пунктов» (г. Душанбе, Комитет по архитектуре и строительству при Правительстве РТ), Душанбе, 2017. – С. 49 - 55.

[67-М]. **Каландарбеков, И.И.** Амплитудный спектр акселерограммы землетрясения Фукусима [Текст] /И.И. Каландарбеков //Материалы второй международной научно-

практической конференции «Роль молодых учёных в развитии науки, инноваций и технологий» (г. Душанбе, Академии наук Республики Таджикистан). Душанбе, Таджикистан, 2017. – С. 108 -111.

[68-М]. **Каландарбеков, И.И.** Динамические исследования модели зданий с использованием виброплатформы [Текст] /Д.Н. Низомов, Каландарбеков И.И. //Материалы республиканской научно-практической конференции «Повышение сейсмической безопасности городов и населённых пунктов» (г. Душанбе, Комитет по архитектуре и строительству при Правительстве Республики Таджикистан), Душанбе, 2017. – С. 42 - 48.

[69-М]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование зданий с учётом нелинейной работы сейсмоизоляции [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И.// Материалы VIII международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования в XXI веке», Душанбе, 2016. - С. 234-238.

[70-М]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование взаимодействия здания с основанием методом сосредоточенных деформаций. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.// Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии. Вып. 9, 2025. – С. 307-311.

[71-М]. **Каландарбеков, И.И.** Теория подобия и моделирование при исследовании строительных конструкций зданий и сооружений. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.// Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии. Вып. 6, 2025. – С. 218-224.

[72-М]. **Каландарбеков, И.И.** Моделирование сейсмоизолированных зданий. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каримов Р.Ш., Каландарбеков И.И., Сангинов А.М.// Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии. Вып. 6, 2025. – С. 211-217.

[73-М]. **Каландарбеков, И.И.** Построение спектров кинематических реакций. [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И., Шарифзода А.Ш. // Сб. трудов Инженерной Академии, 2025. – С. 273-280.

[74-М]. **Каландарбеков, И.И.** Численное решение динамической задачи по расчёту сейсмоизолированного многоэтажного здания при различных воздействиях [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И., Марамов М.Б. // Научные труды Инженерной академии РТ. Душанбе, 2021. - С. 219-226.

[75-М]. **Каландарбеков, И.И.** Исследование свободных колебаний зданий с учётом сейсмоизоляции [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Труды института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН РТ, вып. 2. Душанбе: ИГССС, 2019. - С. 182-189.

Патентҳо, шаходатномаҳои муаллифӣ ва бақайдгирии давлатии захираҳои интеллектуалӣ

[76-М]. **Каландарбеков, И.И.** Стенд барои моделсозии таъсири сейсмикӣ ба моделҳои физикии биноҳо ва иншоот [Текст]/ Махмадиев У.М., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Нахустпатент ТҶ 1453, 16.05.23, № 2301836, дар феҳристи давлатии ихтироотҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 04.12.2023 с. ба қайд гирифта шуд.

[77-М]. **Каландарбеков, И.И.** Программа численного решения статических и динамических задач балок методом сосредоточенных деформаций [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон, шӯъбаи ҳуқуқ, ҳифзи ҳуқуқи муаллиф ва ҳуқуқи вобаста, рақами қайди давлатӣ №129, 24.12.2021г.

[78-М]. **Каландарбеков, И.И.** Программа расчёта многоэтажных зданий на сейсмические воздействия методом сосредоточенных деформаций [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон, шӯъбаи ҳуқуқ, ҳифзи ҳуқуқи муаллиф ва ҳуқуқи вобаста, рақами қайди давлатӣ №130, 24.12.2021г.

[79-М]. **Каландарбеков, И.И.** Программа расчёта многоэтажных зданий на сейсмические воздействия с учётом динамического гасителя [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон, шӯбаи ҳуқуқ, ҳифзи ҳуқуқи муаллиф ва ҳуқуқи вобаста, рақами қайди давлатӣ №131, 24.12.2021г.

[80-М]. **Каландарбеков, И.И.** Программа расчёта балок на упругом основании методом сосредоточенных деформаций [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Вазорати фарҳанги Ҷумҳурии Тоҷикистон, шӯбаи ҳуқуқ, ҳифзи ҳуқуқи муаллиф ва ҳуқуқи вобаста, рақами қайди давлатӣ №132, 24.12.2021г.

[81-М]. **Каландарбеков, И.И.** Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. Программа численного моделирования сейсмоизолированного здания при многокомпонентном воздействии методом сосредоточенных деформаций // Министерство культуры Республики Таджикистан. Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №76 от 11 марта 2019г.

[82-М]. **Каландарбеков, И.И.** Программа численного моделирования зданий с резино-металлическими опорами [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Министерство культуры Республики Таджикистан. Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №77 от 11 марта 2019г.

[83-М]. **Каландарбеков, И.И.** Программа численного решения динамической задачи сейсмоизолированного здания со скользящим поясом [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Министерство культуры Республики Таджикистан. Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №78 от 11 марта 2019г.

[84-М]. **Каландарбеков, И.И.** Программа численного решения системы «Платформа-модель здания» при вибрационной нагрузке [Текст]/ Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И. // Министерство культуры Республики Таджикистан. Свидетельство о государственной регистрации информационного ресурса №79 от 11 марта 2019г.

АННОТАЦИЯ

диссертации Каландарзоды Ифтихора Имомёра «Моделирование динамических задач по расчёту сейсмоизолированных зданий методом сосредоточенных деформаций», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.1. Геология, геодезия, гидрология, строительство и архитектура (2.1.5. Строительная механика)

Ключевые слова: моделирование, сейсмоизоляция, сухое трение, метод сосредоточенных деформаций, матрица жёсткости, крутильные колебания, методы моделирования, дифференциальные уравнения, метод последовательной аппроксимации, динамические задачи, податливость основания, теории подобия.

Целью исследования - развитие эффективных методов расчёта сейсмоизолированных зданий на основе численного моделирования и экспериментальных исследований, направленных на повышение их устойчивости при различных внешних воздействиях.

Полученные результаты и их новизна заключается в комплексном подходе к моделированию сейсмоизолированных зданий с учётом нелинейных эффектов; сравнительный анализ различных типов сейсмоизоляции; разработан алгоритм численного решения задачи обратного преобразования Фурье; разработан алгоритм численного решения динамической модели сухого трения со многими степенями свободы; реализован математической модели *Vous - Wen* для анализа нелинейной работы сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор; разработана методика расчёта модели сейсмоизолированного здания на основе метода сосредоточенных деформаций; экспериментально подтверждено адекватности расчётных моделей; разработаны алгоритмы моделирования статических задач балок, плит, и фрагмента каркасного здания с учётом сейсмоизоляции и без неё на основе теории подобия; разработаны алгоритмы моделирования динамических задач балок, плит, и фрагмента каркасного здания с учётом сейсмоизоляции и без учёта сейсмоизоляции на основе теории подобия; получены коэффициенты подобия, которые позволяют переходить от модели объекта к его натуре.

Рекомендации по использованию: разработки методики и компьютерной программы для расчёта сейсмоизолированных зданий на основе метода сосредоточенных деформаций. Разработанные методика, алгоритма и компьютерные программы могут быть успешно применены при вариантном проектировании многоэтажных зданий, а также может быть использована для исследования напряженно-деформированного состояния многоэтажных зданий различных конструктивных систем с учётом и без учёта сейсмоизоляцией.

Основные результаты диссертационной работы приняты к внедрению в ОАО НИПИИ «САНИИОСП», ГУП НИПИ «Душанбешахрсоз», а также в учебный процесс Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Область применения: промышленное и гражданское строительства, теория сейсмостойкости, моделирование зданий и сооружений, строительная механика, подготовка специалистов и др.

АННОТАТСИЯ

диссертатсияи Қаландарзода Ифтихор Имомёр «Моделсозии масъалаҳои динамикӣ оиди ҳисоби биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо методи мутамарказкунонии деформатсияҳо», ки барои дарёфти дараҷаи илмии доктори илмҳои техникӣ аз рӯи ихтисоси 2.1. Геология, геодезия, гидрология, сохтмон ва меъморӣ (2.1.5. Механикаи сохтмон) пешниҳод шудааст.

Калимаҳои калидӣ: моделсозӣ, ҷудокунакҳои сейсмикӣ, соиши хушк, методи мутамарказкунонии деформатсияҳо, матритсаи сахтӣ, лаппишҳои тобхуранда, методҳои моделсозӣ, муодилаҳои дифференциалӣ, методи аппроксиматсияи пайдарпай, масъалаҳои динамикӣ, нармии таҳкурсии, назарияҳои монандӣ.

Ҳадафи таҳқиқот ин рушд додани усулҳои самараноки ҳисобкунии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар асоси моделсозии ададӣ ва таҳқиқоти таҷрибавӣ аз таъсири омилҳои гуногуни беруна.

Натиҷаҳои бадастомада ва навовари илмӣ дар татбиқи муносибати мукамал ба моделсозии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ бо дарназардошти таъсирҳои ғайрихаттӣ ифода меёбанд. Таҳлили муқоисавии намудҳои гуногуни ҷудокунакҳои сейсмикӣ гузаронида шудааст; алгоритми ададии ҳаллу фасли масъалаи табдили баръакси Фурье таҳия гардидааст; алгоритми ададии ҳаллу фасли модели динамикии соиши хушк бо дараҷаҳои зиёди озод пешниҳод шудааст; модели математикӣ аз рӯи амсилаи Вouc - Wen барои таҳлили қори ғайрихаттии ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар шакли таҷағоҳҳои резинӣ-физилӣ амалӣ карда шудааст; методикаи ҳисобкунии модели бинои ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар асоси методи мутамарказкунонии деформатсияҳо таҳия шудааст. Адекватии моделҳои ҳисобӣ ба таври таҷрибавӣ тасдиқ гардидааст. Алгоритмҳои моделсозии масъалаҳои статикӣ ва динамикии болорҳо, таҳтасанҳо ва фрагменти бинои синҷӣ бо дарназардошти ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бидуни он дар асоси назарияи монандӣ таҳия шудаанд. Коэффитсиентҳои монандӣ ба даст оварда шудаанд, ки имкон медиҳанд аз модели объект ба объекти воқеӣ гузариш анҷом дода шавад.

Тавсияҳо оид ба истифода: методика ва барномаи компютерӣ барои ҳисобкунии биноҳои дорои ҷудокунакҳои сейсмикӣ дар асоси методи мутамарказкунонии деформатсияҳо таҳия шудаанд. Методика, алгоритмҳо ва барномаҳои компютери пешниҳодшуда метавонанд ҳангоми тарҳрезии вариантии биноҳои бисёррошона, инчунин барои таҳқиқи ҳолати шиддатнокӣ-деформатсионии биноҳои дорои системаҳои гуногуни конструктивӣ бо дарназардошти ҷудокунакҳои сейсмикӣ ва бидуни он самаранок истифода шаванд.

Натиҷаҳои асосии диссертатсия дар ҶСК НИПИИ «САНИИОСП», ҚВД НИПИ «Душанбешаҳрсоз» ва дар раванди таълимии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осими ба татбиқ қабул шудаанд.

Соҳаи татбиқ: сохтмони саноатӣ ва шаҳрвандӣ, назарияи зилзилатобоварӣ, моделсозии биноҳо ва иншоот, механикаи сохтмон, омодагии мутахассисон ва ғайра.

ANNONATION

of the doctoral dissertation by Kalandarzoda Iftikhor Imomyor “Modeling of Dynamic Problems in the Analysis of Seismically Isolated Buildings Using the Method of Concentrated Deformations”, submitted for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 2.1. Geology, Geodesy, Hydrology, Construction and Architecture (2.1.5. Structural Mechanics).

Keywords: modeling, seismic isolation, dry friction, method of concentrated deformations, stiffness matrix, torsional vibrations, modeling methods, differential equations, successive approximation method, dynamic problems, soil compliance, similarity theory.

The purpose of the research is to develop efficient methods for the analysis of seismically isolated buildings based on numerical modeling and experimental studies aimed at improving their stability under various external actions.

The obtained results and their scientific novelty consist in a comprehensive approach to modeling seismically isolated buildings with due consideration of nonlinear effects. A comparative analysis of various types of seismic isolation systems has been carried out. An algorithm for the numerical solution of the inverse Fourier transform problem has been developed. An algorithm for the numerical solution of a dynamic dry friction model with multiple degrees of freedom has been proposed. The mathematical Bouc–Wen model has been implemented to analyze the nonlinear behavior of seismic isolation systems in the form of rubber–metal bearings. A methodology for analyzing a seismically isolated building based on the method of concentrated deformations has been developed. The adequacy of the computational models has been experimentally confirmed. Algorithms for modeling static and dynamic problems of beams, plates, and a frame building fragment with and without seismic isolation have been developed based on similarity theory. Similarity coefficients have been obtained, enabling the transition from a scaled model to a full-scale prototype.

Recommendations for practical application: a methodology and computer software for the analysis of seismically isolated buildings using the method of concentrated deformations have been developed. The proposed methodology, algorithms, and software can be effectively applied in the alternative design of multi-storey buildings, as well as in studying the stress–strain state of buildings with various structural systems, both with and without seismic isolation.

The main results of the dissertation have been accepted for implementation at JSC NIPPI “SANIOSP”, State Unitary Enterprise NIPPI “Dushanbeshahrsoz”, and in the educational process of the Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi.

Field of application: industrial and civil construction, seismic resistance theory, modeling of buildings and structures, structural mechanics, professional training, and related fields.