

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор ФГБОУ ВО «ПГУАС»

Н., доцент

И. Болдырев

» Октябрь 2024г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» на диссертационную работу Раводина Ильи Владимировича на тему «Развитие методики расчета колебаний неразрезных упруго опертых конструктивно-нелинейных балочных систем при движущейся нагрузке», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9 Строительная механика.

Актуальность диссертационного исследования.

Подвижные нагрузки оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние транспортных сооружений и разнообразных элементов оборудования. Учитывая все более широкое применение в инженерной практике конструктивно – нелинейных упруго опертых балочных систем, изучение и анализ их поведения под действием различной по характеру и времени воздействия подвижной нагрузки приобретает важное научное и практическое значение. Разработка и развитие универсального и достоверного способа моделирования колебаний рассматриваемых систем является актуальной задачей, решение которой позволит более точно оценивать динамический эффект от движущейся нагрузки и предотвращать возможные негативные последствия.

Структура и содержание диссертации. Диссертация Раводина Ильи Владимировича состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложения, подтверждающего практическую реализацию выполненного исследования. Автором выполнены все регламентированные требования по структуре, содержанию и оформлению диссертации и автореферата.

Во введении обоснована тема исследования, её актуальность, определены цель и задачи, методологические и теоретические основы. Автор демонстрирует во введении ясность понимания предметного поля исследования, раскрывает научную новизну полученных результатов, их теоретическую и практическую значимость.

В главе 1 выполнен анализ научных работ отечественных и зарубежных авторов. Представлен подробный анализ существующих методов расчета колебаний разнообразных балочных систем на движущуюся нагрузку, выявлены их основные недостатки. Показано, что расчет конструктивно-нелинейных динамических систем при движущейся нагрузке является сложной задачей, требующей углубленного изучения.

Глава 2 диссертации посвящена разработке оптимального вычислительного алгоритма для динамического расчета упруго опертых балочных систем с ограничительными опорами.

В первой части главы рассмотрен расчет упрощенной схемы данной системы с недеформируемым стержнем, где показаны различные подходы включения новых опор в уравнения модели. Автором сформулированы условия замыкания и размыкания зазоров на концевых опорах, при которых происходит смена граничных условий. Решение данной задачи позволило автору проанализировать влияние жесткости и параметров демпфирования ограничительных опор на характер колебаний стержня.

Во второй части главы рассмотрено применение глобальных функций для аппроксимации изгибных колебаний упруго опертой балки с ограничительными опорами по концам. Показано, что использование упругих связей очень большой жесткости для моделирования работы ограничительных опор приводит к вычислительной неустойчивости. Увеличение числа удерживаемых форм не позволяет получить решение, так как вызывает экспоненциальный рост вычислительных ошибок алгоритма. Автором на основе математической модели, записанной для обобщенных функций, предложен вычислительный алгоритм с применением локальных функций кусочно-линейного вида для построения решения. Данный алгоритм является универсальным и позволяет получить решение при большей жесткости упругих связей, моделирующих смену граничных условий.

В главе 3 описаны цель и задачи эксперимента, обоснованы допущения и гипотезы, принятые при разработке проекта установки для проведения испытаний. Обоснованы преимущества использования лабораторной установки для верификации предложенного вычислительного алгоритма по сравнению с испытанием натуральных объектов. Приведено полное техническое описание разработанных и изготовленных автором испытательных стендов и дополнительных компонентов, позволяющих моделировать различные динамические воздействия и обеспечивающих корректную работу оборудования при проведении испытаний. Экспериментальная установка протестирована в ходе большого количества статических и динамических опытов, позволивших выполнить анализ погрешностей измерительного оборудования и оценить достоверность результатов испытаний. В конце главы приведены графики колебаний характерных сечений конструктивно-нелинейной балочной системы, полученные оптическим способом при варьировании скорости движущейся тележки и жесткости балки.

В главе 4 рассмотрены способы моделирования колебаний конструктивно-нелинейной динамической системы при движущейся нагрузке в современных конечно-элементных комплексах. Обосновано использование алгоритмов контакта для моделирования воздействия подвижной нагрузки при решении задач в постановке Моргаевского-Фрыбы-Барченкова. На основе известных динамических моделей транспортных средств предложен способ построения упрощенной конечно-элементной модели автомобиля в программном комплексе LS-Dyna, позволяющий значительно сократить затраты вычислительного времени. Описан алгоритм построения конечно-элементной модели балочной системы и движущейся тележки, включающий в себя выбор типов элементов, материалов, параметров демпфирования и контакта. Приведен анализ напряженно-деформированного состояния характерных сечений балочной системы, используемой при проведении экспериментов.

В главе 5 приведены результаты верификационных расчетов лабораторной модели конструктивно-нелинейной балочной системы. Показано, что максимальная погрешность результатов, полученных с помощью разработанной автором программы в среде Matlab,

наблюдается вблизи ограничительной опоры и не превышает 10%. Увеличение погрешности при определении амплитуды колебаний в этом сечении связано с допущением о точечном взаимодействии балки с ограничительной опорой. Данное предположение подтверждается результатами расчета МКЭ в LS-Dyna.

С помощью разработанной программы в среде Matlab выполнен параметрический анализ колебаний протяженной неразрезной упруго опертой балки с ограничительными опорами по концам. Такая система может быть использована в качестве расчетной схемы наплавного железнодорожного или автомобильного моста.

Предложенный способ моделирования движущейся инертной нагрузки в программе LS-Dyna использован для оценки деформированного состояния пролетного строения сталежелезобетонного моста через р. Кальмиус, г. Донецк. Показано, что наибольшие нормальные напряжения в поясах главных балок превышают расчетной сопротивление на 11,3%.

В заключении изложены основные выводы проведенного исследования, даны практические рекомендации и сформулированы перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложении приведены 4 акта внедрения результатов выполненного исследования.

Таким образом, рецензируемая работа на соискание ученой степени кандидата технических наук является цельной завершенной работой, оформленной в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Научная новизна. Результаты, полученные в диссертационной работе, обладающие научной новизной:

1. Разработанный автором вычислительный алгоритм с использованием кусочно-линейных базисных функций, который позволяет моделировать колебания универсальной балочной системы с произвольным количеством упругих и ограничительных опор при движущейся нагрузке.

2. Разработанные рекомендации по использованию современных конечно-элементных комплексов для создания адекватных пространственных моделей конструктивно-нелинейных балочных систем с инертной движущейся нагрузкой.

3. Результаты всесторонних лабораторных измерений, позволившие выявить особенности динамического поведения разнообразных конструктивно-нелинейных балочных систем в зависимости от соотношений параметров.

4. Полученные соотношения жесткости балки и упругих опор, длин пролетов, величины зазоров ограничителей хода для подбора рациональных параметров системы при проектировании.

Достоверность полученных соискателем результатов подтверждается сопоставлением результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными при инструментальных измерениях на физической модели балочной системы.

Теоретическая и практическая значимость.

По итогу выполнения научной работы получены следующие результаты:

- разработаны теоретические и методические основы численного моделирования поведения конструктивно-нелинейных упруго опертых несущих систем под действием различных нагрузок, а также систем с граничными условиями, которые нелинейно изменяются при движении системы;

- построен вычислительный алгоритм и на его основе разработана программа, позволяющая определять зависимости параметров колебания динамической системы от соотношения длин пролетов, жесткости упругих связей, зазоров ограничительных опор и т.д.;

- усовершенствована методика конечно-элементного моделирования динамического взаимодействия инертной подвижной нагрузки и несущей системы с использованием алгоритмов контакта элементов;

- даны рекомендации по выбору параметров модели и алгоритма для подавления нефизических деформаций конечных элементов при точечном моделировании взаимодействия инертной подвижной нагрузки и несущей системы;

- разработана и изготовлена экспериментальная установка для получения обширного и достоверного эмпирического материала для верификации методов расчета упруго-опертых балок с ограничительными опорами при движущейся нагрузке;

- выполнена серия лабораторных испытаний и численных экспериментов, позволяющая установить основные закономерности поведения балочных систем в зависимости от соотношения динамических параметров и при различных вариантах нагружения.

Полученные результаты имеют как теоретическое и методологическое значение для моделирования указанного типа инженерных систем, так и практическое значение. Сфера применения вычислительного комплекса может быть значительно расширена на различные системы с подвижными нагрузками.

С применением разработанной методики произведен расчет сталежелезобетонного пролетного строения через реку Кальмиус по проспекту Ильича, г. Донецк, выполненного по схеме 33,84 + 37,6 + 33,84 (м), на проезд колонны следующих друг за другом трехосных грузовиков КАМАЗ-6520.

Результаты исследований автора также внедрены в учебный процесс Воронежского государственного технического университета на кафедре «Строительная механика».

Личное участие автора в получении результатов.

Все основные идеи и разработки, сформировавшие основу научно-методического подхода и экспериментальной части исследования, анализ и обобщение полученных результатов принадлежат автору и выполнены непосредственно с его участием. А именно:

1. На основе разработанного вычислительного алгоритма реализованы программы на языках Wolfram Mathematica и Matlab для расчета колебаний балочных систем при движущейся нагрузке.

2. В несколько этапов спроектирована и изготовлена универсальная лабораторная установка с применением новых технических решений в нагружающем оборудовании и измерительных приборах.

3. Разработан и апробирован способ моделирования инертной движущейся нагрузки с использованием алгоритмов контакта элементов в универсальных конечно-элементных комплексах.

4. Предложен новый способ учета неровностей дорожного покрытия в МКЭ, который протестирован на известной задаче расчета балочной системы на проезд через одиночную неровность подрессоренного груза.

5. Выполнен сравнительный анализ результатов численных расчетов и лабораторных инструментальных измерений.

Публикация и апробация основных результатов диссертации. Диссертационная работа прошла достаточную апробацию. Основные результаты исследований доложены на следующих научных конференциях:

1. XIX Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры», г. Тула, 2017;
2. XXVII Российско-Словацко-Польский научно-практический семинар «Теоретические основы гражданского строительства» – Ростов-на-Дону, 2018;
3. 24-я Международная конференция «Механика-2019» – Каунас, Литва, 2019;
4. XXI Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры», г. Тула, 2020;
5. XXIX Российско-Словацко-Польский научно-практический семинар «Теоретические основы гражданского строительства» – Вроцлав, Польша, 2020 г.
6. XXII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры», г. Тула, 2021;
7. Международная конференция на тему «Материалы, конструкции, строительные технологии и инспекция строительства – MSC 2022» – Ханой, Вьетнам 2022;
8. XXIII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры», г. Тула, 2022;
9. Международная научно-техническая конференция «Строительство и Архитектура: Теория и практика инновационного развития» SATPID – Махачкала, 2023;
10. XXIII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры», г. Тула, 2023;
11. Расширенное заседание кафедры строительной механики ФГБОУ ВПО ВГТУ – Воронеж, 11 декабря 2023 г.

По теме диссертации опубликовано 12 работ. Из них 4 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК и приравняваемых к ним (3 индексируются в международных базах Web of Science и Scopus).

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Диссертационная работа носит одновременно теоретический и практический, прикладной характер. В теоретическом плане следует отметить значительный вклад автора в разработку общей методики расчета колебаний конструктивно-нелинейных динамических систем на движущуюся нагрузку. Полученные результаты рекомендованы к практическому внедрению в учебном процессе и могут быть использованы в проектных организациях.

Дальнейшее развитие предложенной методики представляется по пути выполнения комплекса исследований:

- Создание математической модели конструктивно-нелинейных колебаний упруго опертых несущих систем в пространственной постановке в форме системы дифференциальных уравнений в частных производных для обобщенных функций. Разработка вычислительного алгоритма для различных систем базисных функций на прямоугольной пространственной сетке.

- Распараллеливание вычислительных алгоритмов численного моделирования поведения конструктивно-нелинейных упруго опертых несущих систем в пространственной постановке. Реализация параллельных алгоритмов на

многопроцессорных и многоядерных гибридных системах с использованием центральных процессоров (CPU) и ускорителей на графических картах (GPU).

- Разработка программного комплекса для выполнения экспертной оценки колебаний конкретных упруго опертых несущих систем. Разработка практических рекомендаций по оптимизации параметров рассматриваемых систем.

- Разработка в конечно-элементном комплексе LS-Dyna способа учета неровностей дорожного покрытия, заданных случайной функцией распределения.

Вопросы и замечания по работе. По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Почему не использовать обычный шаговый алгоритм для расчета конструктивно-нелинейной динамической системы с уточнением расчетной схемы на каждом временном шаге?

2. Сколько базисных функций использовалось для построения решения? Рекомендуется дополнить диссертацию графиком сходимости.

3. Почему в вычислительном алгоритме используются кусочно-линейные функции, а не сплайны? Производные кусочно-линейных функций имеют разрывы.

4. По тексту диссертации есть небольшие орфографические и пунктуационные ошибки (например, на стр.58 пропущен символ « δ » для определения дельта функции в предложении перед последним абзацем).

5. Что подразумевается под деформациями «песочных часов» при расчете в МКЭ? Следует дать определение данному термину.

6. При построении модели был использован ряд гипотез об идеализации сечения и свойств материала балки. Насколько эти гипотезы корректны? Плюс возникают погрешности метода расчета. Какой вклад вносят те или иные погрешности?

7. Диссертация посвящена расчету балочных систем при движущейся нагрузке. В то же время, на рис. 6 автореферата (или рис. 4.21 диссертации) и в тексте речь идет об оболочке, на плоскости которой передается нагрузка. Объясните – почему?

Следует отметить, что указанные недостатки не снижают значимости и достоверности результатов диссертации, а являются направлениями для дальнейшей работы соискателя.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.1.9 Строительная механика:

п. 2 Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета;

п. 4 Численные и численно-аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях;

п. 12. Исследование и моделирование нагрузок и воздействий на здания и сооружения.

Общее заключение. Диссертационная работа Раводина Ильи Владимировича на тему «Развитие методики расчета колебаний неразрезных упруго опертых конструктивно-нелинейных балочных систем при движущейся нагрузке» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему и обладающей научной новизной. Выдвигаемые соискателем положения, а также сформированные выводы и

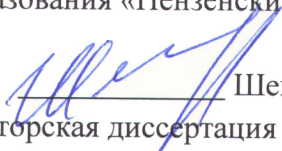
результаты исследования являются обоснованными и значимыми для науки и практики. Материалы диссертации полностью отражены в работах, опубликованных соискателем.

Диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Раводин Илья Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9 Строительная механика.

Отзыв рассмотрен и утвержден на расширенном заседании кафедры «Механика» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства». По результатам обсуждения сформулировано положительное заключение. Присутствовало на заседании 7 человек. Проголосовало за утверждение заключения – 7, против – нет, воздержалось – 0. Протокол № 2 от 12 октября 2024 года.

Отзыв составил:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»



Шейн Александр Иванович

Докторская диссертация защищена по специальности 05.23.17 Строительная механика.

Адрес: 440028, Пензенская область, город Пенза, ул. Германа Титова, д.28

Email: shein-ai@yandex.ru

Рабочий телефон: +7 950 231-90-00

