

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу

Раводина Ильи Владимировича

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КОЛЕБАНИЙ НЕРАЗРЕЗНЫХ  
УПРУГО ОПЕРТЫХ КОНСТРУКТИВНО-НЕЛИНЕЙНЫХ БАЛОЧНЫХ  
СИСТЕМ ПРИ ДВИЖУЩЕЙСЯ НАГРУЗКЕ

Работа представлена на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

В работе соискателя рассматривается сложная нелинейная задача о динамическом деформировании балочной конструкции при движении по ней подвижной нагрузки. Существенным отличием рассматриваемых в работе систем является наличие в них ограничительных опор. Ограничительные опоры устанавливаются с заданным начальным зазором, который может выбираться в процессе динамического деформирования, что приводит к включению опоры в работу. Расчетная схема зависит от течения динамического процесса, что делает задачу нелинейной. Такая конструктивная нелинейность существенно осложняет динамическое моделирование.

Другой вид нелинейности, который также рассмотрен автором, заключается в учете массы подвижной нагрузки. Решение отмеченной задачи выполняется автором как для модельных примеров, так и для схем реальных сооружений, плоских и пространственных. Автор использует известные программные комплексы, разрабатывает собственные алгоритмы и программы, привлекает экспериментальный контроль результатов. Такой комплексный, всесторонний подход к решению поставленной задачи обеспечивает получение надежных результатов и характеризует выполненную большую работу весьма положительно.

**Актуальность темы диссертации**

На актуальность работы можно смотреть с двух точек зрения. Во-первых, актуальным является развитие и создание методов решения конструктивно-нелинейных задач применительно к рассматриваемым в работе балочным системам, обследование этих методов при использовании различных вариантов расчетных допущений. Во-вторых, актуальность работы определяется наличием достаточного количества видов реальных конструкций, поведение которых под нагрузкой можно анализировать при помощи создаваемых в работе методов. Тематика работы является важной для проектирования и эксплуатации различных инженерных сооружений: мостов, эстакад, крановых путей и т.д.



## **Структура, содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав основной части, заключения, списка литературы из 142 источников и приложения. Рецензируемая работа изложена на 194 страницах и включает 145 рисунков и 15 таблиц. Результаты внедрения представлены в 4 актах в приложении. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011.

**Во введении** диссертационной работы отражена актуальность темы исследования, обоснованы цель и задачи, определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

**В первой главе** диссертации приводится обоснование выбранной методологии исследования по результатам анализа научных работ, посвященных развитию способов расчета колебаний разнообразных балочных систем на динамические воздействия, в том числе на воздействие движущейся нагрузки.

**Во второй главе** представлены выбранная расчетная схема и математическая модель конструктивно-нелинейной упруго опертой несущей системы. При наличии в системе ограничительных опор, время взаимодействия которых в силу очень большой жесткости «мгновенно», возникают нарушения гладкости функций, описывающих поведение системы по временным переменным. Для решения этой задачи математическая модель переформулирована в форме уравнений в частных производных с использованием обобщенных функций. Для построения вычислительного алгоритма применен разработанный автором подход, при котором граничные условия включаются в дифференциальные уравнения для обобщенных функций.

**В третьей главе** представлены результаты серии лабораторных испытаний, выполненных с помощью разработанной автором универсальной экспериментальной установки. Программа испытаний включает в себя анализ деформированного состояния разнообразных балочных систем при статических, вибрационных и движущихся нагрузках. Обосновано использование оптического измерителя для определения перемещений экспериментальной модели балочной системы.

**Четвертая глава** посвящена адаптации современных конечно-элементных комплексов для решения поставленной задачи. Особое внимание уделяется развитию способов совместного моделирования колебаний рассматриваемой динамической системы, где взаимодействие движущейся нагрузки с пролетным строением моделируется с помощью алгоритмов контакта элементов. Протестировано применение различных опций и



встроенных модулей в программе LS-Dyna для оптимизации модели и улучшения стабильности расчета.

**В пятой главе** выполнена проверка расчетных методик с помощью верифицирующих экспериментов. По результатам сравнительного анализа динамических прогибов характерных сечений лабораторной модели балочной системы выполнена оценка адекватности принятых допущений и гипотез, сделанных при построении математической модели. Показано, что реализованный в программе Matlab вычислительный алгоритм, может использоваться для поиска рациональных параметров системы. Программный комплекс LS-Dyna использован для решения прикладных задач для уточненного расчета в пространственной постановке.

**В приложениях** приведены акты внедрения результатов диссертационной работы.

### **Научная новизна положений, сформулированных в диссертации**

Основными положениями научной новизны исследования являются:

1. Математическая модель, записанная для обобщенных функций, и разработанный алгоритм, который обладает вычислительными преимуществами при расчете балочных систем с изменяющимися граничными условиями.
2. Спроектированная и изготовленная универсальная установка для верификации вычислительного алгоритма.
3. Разработанная конечно-элементная модель движущейся нагрузки и балочной системы в конечно-элементном комплексе LS-Dyna для дополнительной верификации и выполнения пространственных расчетов.
4. Параметрические исследования особенностей колебания упруго опертых конструктивно-нелинейных балочных систем, представленные в теоретических примерах и практических задачах.

Перечисленные пункты научной новизны обоснованы, а полученные результаты отражены в выводах и практических рекомендациях.

### **Значимость результатов диссертационной работы для науки и практики**

1. Разработанный вычислительный алгоритм реализован в качестве программы на языке Matlab для моделирования конструктивно-нелинейных колебаний балочных систем. Разработанная программа может использоваться при расчете пролетных строений мостов, путепроводов, нефте- и



газопроводов, несущих элементов конвейерного оборудования на движущуюся нагрузку.

2. Полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований результаты могут быть использованы различными организациями, занимающимися проектированием транспортных сооружений, а также актуализацией и разработкой нормативных документов.

3. Созданная в работе экспериментальная установка может быть использована для исследования реальных конструкций при проектировании.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

1. Результаты моделирования колебаний конструктивно-нелинейных балочных систем с помощью разработанного вычислительного алгоритма подтверждаются экспериментальными данными, полученными в процессе измерений на лабораторной установке.

2. Результаты, полученные по собственному алгоритму и компьютерной программе сопоставляются с результатами, полученными в сертифицированном КЭ комплексе LS-Dyna.

### **Апробация результатов исследования**

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, включая 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных в перечне ВАК и приравняемых к ним. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 6 научных конференциях, в том числе международных.

Опубликованные статьи и изложенные на конференциях материалы достаточно полно раскрывают суть и результаты научных исследований.

### **Дополнительные соображения по работе**

Важной положительной особенностью работы является, на наш взгляд создание собственной компьютерной программ в системе Matlab, которая реализует оригинальный алгоритм автора. Далеко не все диссертационные работы, выносимые на защиту в настоящее время, опираются на использование собственных программных продуктов. Эта часть работы в настоящий момент особенно актуальна.

Результаты, полученные при помощи собственной компьютерной программы, автор сопоставляет с решениями, выполненными в конечно-элементном комплексе ANSYS/LS –Dyna. Правда, здесь следует отметить, что системы расчетных допущений для упомянутых подходов отличаются. Конечно-элементный подход позволяет учитывать массу подвижной нагрузки, созданный автором вычислительный алгоритм рассматривает воздействие на



балку движущейся системы сил. Приведенные в работе численные результаты показывают близкое совпадение искомых динамических параметров. Таким образом в работе определяется область возможного применения соответствующих допущений.

Существенную часть работы представляют выполненные автором множественные лабораторные эксперименты. Эти работы потребовали проектирования и изготовления специальной лабораторной установки. Лабораторная установка, созданная автором, позволяет получать различные скорости движения экипажа, менять расположение упругих и ограничительных опор, в определенных интервалах геометрию конструкции. Особенно следует отметить оптический метод записи перемещений. Этот метод не связан с появлением дополнительных сил сопротивления, что существенно для повышения точности экспериментальных данных. Полученные в работе экспериментальные результаты представляют научную ценность и новизну. Особенный интерес эти данные представляют в сопоставлении с расчетными результатами (см., например, рис 5.3, 5.4 стр. 137 диссертационной работы).

Как положительную сторону работы следует отметить ее качественное оформление, полученные результаты представлены в удобной наглядной форме. В связи с этим хочется отметить рис. 5.5, где функция прогиба балки

$U(x, t)$  представлена в виде поверхности в горизонтальных для двух способов решения.

Работа содержит результаты расчета реальных сооружений. Все эти расчеты имеют практический выход. Отметим, например, моделирование конструктивно нелинейных колебаний балки конвейерной галереи при движущейся нагрузке. Здесь автор определяет скорость движения сбрасывающей тележки, при которой значение динамического коэффициента не выходит за установленное в существующих нормативных документах значение. Полученный здесь результат представляет практический интерес для проектировщиков (см. раздел 5.4). В этом же разделе автор рассматривает опирание балки на тарельчатые пружины с заданным рабочим ходом. При исчерпании рабочего хода пружины происходит её замыкание. Таким образом здесь представлено решение практической задачи, требующей для своего решения применение развиваемой в работе теории расчета конструктивно нелинейных систем, что демонстрирует практическую направленность выполненных исследований.

Работа содержит результаты большого количества параметрических исследований систем, обладающих конструктивной нелинейностью. Здесь прежде всего следует отметить подробный анализ упруго опертой многопролетной балки при действии подвижной нагрузки. Нагрузка в данном случае представляется в виде сосредоточенной силы, имеющей постоянную составляющую и составляющую, меняющуюся по гармоническому закону. Приводятся зависимости максимального изгибающего момента в консольной



части балки от величины начального зазора в ограничительной опоре (рис. 5.13), от изгибной жесткости балки (рис.5.14), от жесткости упругих опор (рис.5.15). Результаты этих параметрических исследований облегчат работу проектировщиков при создании реальных конструкций, что является одним из практических выходов рассматриваемой работы.

Во введении к работе автор выполняет достаточно подробный обзор научных публикаций, в которых рассматриваются системы с выключающимися связями, в том числе и решения этих задач в статической постановке. Можно отметить, что динамическая задача здесь в определенном смысле проще статической. Действительно, моделируемый динамический процесс однозначно определяет последовательность включения или выключения отдельных связей, никакого выбора из многих вариантов здесь делать не нужно. Рассматривая затухающие колебания можно автоматически получать решение и статических задач. Реализация этой дополнительной возможности не показана в работе, но наличие созданных алгоритмов решения динамической задачи такую возможность открывает.

Отмеченное выше наглядное представление результатов относится и к автореферату, который достаточно полно представляет результаты работы. В перечисленных публикациях автора содержание работы отражено в достаточной степени.

### **Замечания и вопросы по диссертационной работе**

По содержанию работы следует сделать и некоторые замечания.

1. Рассмотрение ограничительных опор только как абсолютно жестких является все-таки достаточно сильным допущением. Кроме того это допущение усложняет логику построения расчетной модели. Уточняя расчетную схему, можно было бы рассматривать реальную податливость ограничительных опор или даже рассматривать ограничительные опоры как некоторые деформируемые элементы, несущие массы. Подобное уточнение позволило бы рассматривать ударное взаимодействие балки с ограничителем, что может вносить изменение в моделируемый динамический процесс. Здесь можно указать на эксперимент автора (см. рис.5.4 стр. 137 диссертации), где перемещение точки балки у ограничителя отличается от расчетного.

2. Автор рассматривает и упругие опоры, но с этими опорами связаны и вовлекаемые в движение массы. Учет соответствующих сил инерции может приводить к уточнению расчетной схемы.

Сделанные замечания не снижают уровень положительной оценки, значимости и новизны диссертационной работы. На них следует прежде всего смотреть как на пожелания для дальнейшей работы.



## Заключение

Диссертационная работа Раводина Ильи Владимировича выполнена на актуальную тему и является законченной научной работой. Все положения, выводы и рекомендации логически обоснованы и подтверждаются результатами экспериментальных и теоретических исследований. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.1.9. Строительная механика.

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа «Развитие методики расчета колебаний неразрезных упруго опертых конструктивно-нелинейных балочных систем при движущейся нагрузке» отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Раводин Илья Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

### Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Строительная  
механика» Федерального  
государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Российский университет  
транспорта», научная специальность  
01.02.03 (2.1.9) Строительная механика



Зылев Владимир Борисович

«19» ноября 2024 г.

Адрес: 127994, г. М

ова, д 9, стр. 9

Email: zylevvb@ya

Рабочий телефон

Данная работа заверена.

Управления развития  
персонала

Т. А. Соколаткина