

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**на диссертационную работу Литвинова Владислава Львовича
«Математическое моделирование и исследование резонансных свойств
механических объектов с движущейся границей», представленной на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук по специальности
1.2.2 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»**

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представленная диссертационная работа посвящена решению важной научной проблемы математического моделирования динамики механических систем с подвижными границами. Актуальность темы обусловлена как фундаментальной сложностью задач математической физики в нестационарных областях, так и практической значимостью для машиностроения и повышения надежности технических устройств.

В современных условиях развития техники особую важность приобретает задача анализа резонансных явлений в системах с движущимися границами. Возникновение резонансных явлений в таких технических системах как грузоподъемные установки, лифты, подвесные канатные дороги, железнодорожная контактная сеть и т.д. может представлять серьезную опасность и должно быть исключено в процессе эксплуатации. Существующие методы анализа колебаний объектов с движущимися границами требуют развития, поскольку точные решения в основном ограничены волновым уравнением и граничными условиями первого рода.

Проведенный анализ современного состояния проблемы показывает, что в научной литературе отсутствуют универсальные методологические подходы к анализу ключевых явлений, таких как установившийся резонанс и прохождение через резонанс, особенно при учете демпфирующих свойств системы. Большинство опубликованных работ ограничивается качественным описанием возможности возникновения резонансных явлений, не предлагая количественных методов оценки их параметров.

Особую актуальность приобретает разработка новых математических методов, способных преодолеть указанные ограничения и обеспечить всесторонний анализ динамического поведения механических систем с движущимися границами. Необходимость таких исследований обусловлена как фундаментальной значимостью проблемы, так и ее практической важностью для решения прикладных инженерных задач.

Следует особо подчеркнуть, что рассматриваемая проблема имеет междисциплинарный характер, находясь на стыке математики, механики и теории управления. Фундаментальная сложность задачи заключается в необходимости разработки новых математических подходов к описанию динамических процессов в областях с изменяющимися границами, что требует существенного развития существующего математического аппарата. В этой связи представляется особенно важным тот факт, что автору удалось не только выявить и систематизировать основные

проблемы данной области, но и предложить конкретные пути их решения, основанные на современных достижениях математической физики и вычислительной математики.

Вышеизложенное позволяет считать тематику диссертационной работы весьма актуальной в теоретическом плане и имеющей прикладные перспективы.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация включает введение, семь глав, заключение, библиографию и четыре приложения. Общий объем диссертации составляет 310 страниц, включая 38 рисунков, 24 таблицы. Библиография включает 280 наименований.

Во введении описана актуальность диссертационных исследований, сформулированы цели и задачи работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится комплексный аналитический обзор современных отечественных и зарубежных исследований в области динамики механических систем с подвижными границами. Автор проводит критический анализ существующих математических моделей, методов решения краевых задач и анализа резонансных характеристик, выявляя нерешенные проблемы и перспективные направления исследований. Особого внимания заслуживает проведенный анализ работ таких ученых, как Асланов С.К., Боголюбов Н.Н., Весницкий А.И., Владимиров С.А., и многих других, что демонстрирует глубокое понимание автором исторического контекста и современного состояния проблемы.

Вторая глава посвящена разработке методов анализа динамики объектов с движущимися границами, включая переход между дифференциальной и интегро-дифференциальной формами, аппарат собственных функций для нестационарных областей, оценку скорости изменения длины объектов. Здесь же определяются понятия собственных функций и собственных чисел для краевой задачи в области, ограниченной изменяемыми во времени пределами интегрирования. Важным достижением автора является доказательство близости решений интегро-дифференциального уравнения колебаний объектов постоянной длины и соответствующего уравнения колебаний объектов переменной длины.

Третья глава содержит изложение разработанного приближенного метода построения решений интегро-дифференциальных уравнений, обобщенного на более широкий класс модельных краевых задач с условиями, заданными на подвижных границах. Особое внимание уделено рассмотрению наиболее распространенного на практике случая, когда внешние возмущения действуют на границах. Представленные в этой главе результаты имеют существенное значение для практических приложений, поскольку позволяют учитывать комплексное воздействие внешних факторов, включая действие на систему сил сопротивления среды, изгибную жесткость объекта и жесткость подложки. В третьей главе также изложены разработанные асимптотические методы построения решений однородных интегро-дифференциальных уравнений и систем обыкновенных дифференциальных уравнений с изменяющимися параметрами, при

помощи которых получены выражения для амплитуд и фаз колебаний. Применительно к решению задач с демпфированием развит метод Канторовича – Галеркина.

В четвертой главе рассмотрены системы, границы которых движутся равномерно с одинаковыми скоростями. Разработан метод замены переменных, позволяющий свести задачу для дифференциального уравнения в частных производных к решению двухточечной краевой задачи для обыкновенного дифференциального уравнения. Этот метод имеет важное практическое значение для анализа таких технических систем как гибкие звенья передач, нити в перемоточных механизмах и других аналогичных устройств.

Пятая глава содержит разработку нелинейных математических моделей продольно-поперечных колебаний механических объектов с движущимися границами. С помощью вариационного принципа Гамильтона получена нелинейная постановка задачи о поперечных колебаниях балки с движущейся границей. Особого внимания заслуживает проведенный автором сравнительный анализ линейной и нелинейной моделей колебаний струны, который показал, что некорректности линейной модели связаны с увеличением натяжения струны при увеличении интенсивности колебаний. Рассмотрен численный метод решения нелинейных задач, описывающих продольно-поперечные колебания объектов с движущимися границами.

Шестая глава посвящена разработке численного метода и алгоритмического обеспечения для исследования резонансных процессов, характерных для объектов с движущимися границами. Подробно анализируются явления установившегося резонанса и прохождения через резонанс. Разработанные в этой главе алгоритмы позволяют определять границы резонансной области и исследовать выражения для амплитуды колебаний на максимум, что имеет важное значение для практического применения.

В седьмой главе описывается программный комплекс «TB-ANALYSIS-7», разработанный на основе результатов диссертационного исследования. Комплекс программ реализует численно-аналитические, приближенные и численные методы для анализа колебательных и резонансных явлений в механических системах с движущимися границами. Важным достоинством разработанного программного обеспечения является его универсальность и способность решать широкий класс прикладных задач. При помощи разработанного программного комплекса проведен анализ новых качественных и количественных свойств пятнадцати модельных краевых задач

В заключении сформулированы основные полученные научные результаты.

Автореферат диссертации адекватно отражает ее основное содержание. Все ключевые положения, выводы и результаты, изложенные в диссертации, нашли свое отражение в автореферате

3. СООТВЕТСТВИЕ РАБОТЫ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

Диссертационная работа полностью соответствует специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим пунктам:

- пункт 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»;

- пункт 3 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»;

- пункт 4 «Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели»;

- пункт 5 «Разработка новых математических методов и алгоритмов валидации математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента или на основе анализа математических моделей».

4. НАУЧНАЯ НОВИЗНА, ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДОВ

Научная новизна работы носит фундаментальный характер и подтверждается следующими результатами:

1. Впервые проведено обобщение и развитие фундаментальных приближенных и численно-аналитических методов применительно к анализу резонансных свойств одномерных объектов переменной длины, позволяющих учитывать действие на механическую систему демпфирующих сил, жёсткость основания и жёсткость на изгиб, вязкоупругость объекта, а также слабую нестационарность граничных условий, отличных от условий первого рода. Выполнена оценка погрешности приближенных методов.

2. Для моделирования колебаний систем с подвижными границами построены решения однородных интегро-дифференциальных уравнений описывающих движение объектов переменной длины и систем обыкновенных дифференциальных уравнений с изменяющимися параметрами при помощи асимптотических методов.

3. Произведена постановка новых нелинейных краевых задач о колебаниях объектов с движущимися границами в виде математических моделей, позволяющих учитывать большее число факторов, влияющих на динамический процесс. Проведено сравнительное исследование линейных и нелинейных модельных подходов к описанию колебательных процессов в системах с подвижными границами.

4. Разработан оригинальный численный метод для решения нелинейных задач, моделирующих продольно-поперечные колебания систем с изменяющимися во времени граничными условиями.

5. Для моделирования резонансных эффектов систем с демпфированием впервые получены результаты, позволяющие количественно оценить влияние демпфирующих сил и движения границ на амплитуду колебаний, возникающих при прохождении через резонанс.

6. Впервые подробно исследованы колебания и резонансные характеристики пятнадцати механических объектов с движущимися границами, широко распространённых в технике. На основе разработанного программного комплекса проведен анализ новых качественных и количественных свойств разработанных моделей.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, является высокой. Это обеспечивается строгой математической постановкой краевых задач с использованием фундаментальных законов механики и вариационных принципов, корректным применением современного аппарата теории дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений, а также методов асимптотического анализа.

Достоверность результатов подтверждается верификацией на тестовых задачах с известными аналитическими решениями, совпадением решений линейной и нелинейной моделей в области малых амплитуд, практическим внедрением результатов в учебный процесс и опытно-конструкторскую работу, апробацией основных результатов на международных и всероссийских конференциях, публикацией основных результатов в ведущих рецензируемых журналах.

Публикации автора полностью соответствуют содержанию диссертации и раскрывают ее основные положения и отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

5. ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ НАУКИ

Теоретическая значимость работы заключается в обобщении и развитии фундаментальных приближенных и численно-аналитических методов решений краевых задач с движущимися границами, численных методов решения нелинейных задач при исследовании резонансных свойств объектов. Разработаны и исследованы новые линейные и нелинейные математические модели, описывающие колебания объектов с движущимися границами в форме интегро-дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных.

Определена эквивалентность формулировок задач динамики объектов переменной длины в дифференциальной и интегро-дифференциальной формах, оценена близость интегро-дифференциальных уравнений динамики объектов переменной длины к соответствующим интегро-дифференциальным уравнениям с фиксированными параметрами. Впервые строго определено понятие собственных функций и собственных чисел для краевых задач в области, ограниченной изменяемыми во времени пределами интегрирования.

Особый теоретический интерес представляют разработанные асимптотические методы построения решений однородных интегро-дифференциальных уравнений и систем обыкновенных дифференциальных уравнений с изменяющимися параметрами. Полученные выражения для амплитуд и фаз колебаний, а также общее решение

однородного интегро-дифференциального уравнения движения объектов переменной длины в первом приближении существенно расширяют математический аппарат для анализа динамики систем с подвижными границами.

Практическая ценность работы подтверждена:

1. Внедрением в образовательный процесс:

Результаты диссертации использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» для подготовки магистрантов направления 01.04.02 «Прикладная математика и информатика» по дисциплинам «Уравнения математической физики», «Численные методы решения краевых задач», «Математическое моделирование и компьютерные технологии в науке», «Нелинейное моделирование материалов и механических систем» и аспирантов направления 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника» по дисциплине «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Имеется соответствующий акт внедрения. Разработанные методы и модели используются в лабораторных, курсовых и выпускных квалификационных работах.

2. Применением в промышленности:

Результаты работы внедрены в опытно-конструкторскую работу ООО «Специальное Конструкторско-Технологическое Бюро «Пластик» (г. Сызрань) и АО «Тяжмаш» (г. Сызрань). Имеются соответствующие акты внедрения, подтверждающие практическое использование разработанных методов и моделей. Внедрение результатов диссертации способствует повышению надежности работы технических объектов с переменными во времени границами и повышению точности расчетов конструкций на динамическую прочность.

3. Созданием программного обеспечения:

Разработан программный комплекс "TB-ANALYSIS-7", зарегистрированный в качестве электронного ресурса (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613649 от 13.02.2025 г.). Комплекс позволяет решать широкий класс краевых задач с движущимися границами и исследовать резонансные свойства технических систем. Программный комплекс предоставляет возможности для получения и анализа численных решений модельных уравнений, исследования резонансных свойств моделей в зависимости от различных факторов, подбора параметров модели для исключения возникновения резонансных эффектов.

4. Повышением безопасности технических устройств:

Разработанные методы и модели позволяют на стадии проектирования технических устройств предотвратить условия возникновения резонансных явлений и колебаний большой интенсивности в грузоподъемных установках, лифтах, подвесных канатных дорогах, железнодорожной контактной сети, лентопротяжных механизмах, звеньях передач с гибкой связью, ленточных пилах, турбинах, бурильных колоннах и других технических системах. Возникновение колебаний большой амплитуды в указанных

объектах часто бывает недопустимым, поэтому разработанные методы анализа резонансных свойств имеют исключительно важное практическое значение.

6. АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации получили широкую апробацию на международных и всероссийских конференциях. Результаты работы опубликованы в 102 научных работах, включая 20 статей в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК и приравненных к ним, 3 монографии, 5 учебных пособий и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Публикационный портфель полностью соответствует требованиям ВАК к докторским диссертациям и отражает основные научные результаты работы. Соискатель является автором или соавтором всех публикаций по теме диссертации, что подтверждает его личный вклад в полученные научные результаты.

Анализ публикационной активности показывает, что автор последовательно и целенаправленно работал над темой диссертации в течение длительного времени. Первые публикации по теме появились в 2005 году, а последние - в 2025 году, что свидетельствует о систематической и плодотворной научной деятельности автора.

7. ЗАМЕЧАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Несмотря на безусловно высокий уровень работы, необходимо сделать следующие замечания и рекомендации:

1. В работе рассматриваются детерминированные модели. Представляется перспективным развитие стохастических подходов к учету неопределенностей в параметрах систем и внешних воздействиях, что особенно актуально для задач анализа надежности технических систем. Рекомендуется разработать методы учета случайных вариаций параметров материалов и внешних нагрузок. Это позволит более адекватно описывать поведение реальных технических систем, работающих в условиях неопределенности.

2. Автор отмечает возможность учёта слабых возмущений на границах. Однако в тексте не раскрывается содержание этого термина. Целесообразно было бы дать его явное определение, указав, относится ли он к малым неоднородностям в граничных условиях, к малым внешним силам в граничных точках или к иным эффектам.

3. При описании моделей пятнадцати объектов в пункте 7.5 отсутствуют схемы для некоторых из них, что усложняет динамическую интерпретацию объекта и граничных условий. Включение таких схем способствовало бы более наглядному и полному восприятию предлагаемых математических моделей.

Данные замечания не являются принципиальными и не умаляют ценности полученных результатов. Они могут быть учтены автором в дальнейших исследованиях и при развитии разработанного математического аппарата.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Литвинова Владислава Львовича «Математическое моделирование и исследование резонансных свойств механических объектов с движущейся границей» представляет собой завершённое научное исследование, в котором решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение для отрасли машиностроения в областях повышения надёжности при проектировании широкого круга технических устройств, в которых присутствуют одномерные механические объекты с движущимися границами. Автором получены научные результаты, обладающие новизной, теоретической и практической значимостью.

Работа полностью соответствует паспорту научной специальности 1.2.2 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертация Литвинова В.Л. соответствует всем критериям, изложенным в пунктах 9 - 11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 в ред. от 16.10.2024 № 1382), предъявляемым к докторским диссертациям.

Автор диссертации Литвинов Владислав Львович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры
«Высшая математика» Федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования «Ульяновский
государственный технический
университет»

Вельмисов П.А.

« 25 » февраля 2026 г.

Подпись Вельмисова Петра Александровича заверяю
Ученый секретарь Ученого совета УлГТУ

Фалова О.Е.

Выходные данные организации:
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования «Ульяновский
государственный технический университет»

Адрес:

Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец,

Телефон: 8(8422) 43-10-45, 77-81-17

Адрес электронной почты: velmisonov@ulstu.ru

