

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, профессора Гордона Владимира Александровича на диссертационную работу Левина Артёма Сергеевича, выполненную на тему «Моделирование изгибного деформирования стержневых упругих элементов с сосредоточенными массами», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Для подготовки отзыва официальному оппоненту были представлены: диссертация, изложенная на 145 страница машинописного текста, включающего 54 рисунка и 7 таблиц, список литературы из 116 наименований работ отечественных и зарубежных авторов, а также автореферат диссертации, имеющий объём 16 страниц, в том числе 12 рисунков.

Рассмотрение представленных материалов позволяет сделать вывод о том, что диссертационная работа Левина Артёма Сергеевича на тему «Моделирование изгибного деформирования стержневых упругих элементов с сосредоточенными массами» содержит признаки научно-квалификационной работы, соответствующей паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ и отвечает областям исследований, предусмотренным п.2 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», п.3 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» и п.8 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

1. Актуальность выбранной темы исследований

Актуальность избранной диссертантом темы не вызывает сомнений.

Предметом исследований диссертационной работы является комплексный процесс деформирования стержневых амортизаторов переменного поперечного сечения с фиксированными сосредоточенными массами. Известно, что функционирование множества механизмов и устройств непосредственно связано с ограничениями, определяемыми их узлами амортизации. Интенсивное силовое воздействие на узлы устройства, а иногда и на самого оператора, использующего устройство, негативно сказывается на их возможности выполнять требуемые задачи в заданных режимах эксплуатации. Отдельно можно выделить амортизирующие устройства, использующие в качестве основного амортизирующего элемента стержневые упругие элементы. Часто, в связи с заданными габаритами амортизирующего устройства, именно стержневые упругие элементы являются единственно возможным вариантом реализации амортизирующего элемента.

Создание в сжатые сроки макетного образца проектируемого устройства часто требует высоких материальных и временных затрат, поэтому тема диссертационного исследования, сформулированная автором и состоящая в разработке высокопроизводительных программных комплексов, обладающих приемлемой для конструкторских потребностей точностью и трудоёмкостью, является **актуальной**.

2. Структура и содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, приведена степень её разработанности, сформулированы цель и задачи работы, обозначены элементы научной новизны, а также теоретическая и практическую значимость полученных результатов работы, включая основные положения, которые автор выносит на защиту. Представлены результаты апробации исследования на научных конференциях, информация о публикациях и внедрении результатов.

В **первой** главе продемонстрирована область применения стержневых упругих элементов и представлен обзор литературы по теме исследования.

Во **второй** главе автором рассматривается моделирование изгибного

деформирования стержневых элементов с использованием классического уравнения изгиба Эйлера-Бернулли с применением современных численных методов в алгоритме его решения. Для сокращения временных затрат решения приведённой системы уравнений, описывающей статику стержневого элемента, автором предлагается использовать методы численной минимизации целевой функции. Как видно из полученных автором материалов, предложенный алгоритм решения позволяет добиваться приемлемых по точности результатов за приемлемую трудоёмкость. Производится сравнение авторского метода расчёта статики с известными методами.

В **третьей** главе анализируются полученные выражения для расчёта динамических параметров стержневых элементов и амортизируемых тел. Приведённые выражения основываются на классическом законе сохранения энергии. Демонстрируются результаты расчётов, выполненных с помощью разработанных автором программных комплексов.

В **четвёртой** главе представлен авторский подход к учёту волновых явлений в составе закона сохранения для более точного расчёта динамических параметров. Приводятся выражения для расчёта профилей поперечных волн для геометрически неоднородных стержней и представлена их конечно-разностная реализация.

В **пятой** главе изложен совокупный материал работы, модифицированный для расчёта стержневых упругих элементов с зафиксированными сосредоточенными массами. Продемонстрировано влияние параметров сосредоточенных масс на статические и динамические параметры стержневых элементов. В главе приведены результаты экспериментальных исследований автора, из которых следует возможность расчёта динамических характеристик стержневых упругих элементов с сосредоточенными массами и без них с приемлемой точностью.

В **заключении** описаны основные результаты исследования и сформулированы перспективы дальнейших работ.

В приложениях приводятся сведения о регистрации программных комплексов для ЭВМ и акты о внедрении результатов на АО «СКБ» и в учебном процессе Тульского государственного университета.

Анализ содержания диссертации Левина А.С. позволяет утверждать о завершённости работы. Материал излагается последовательно, ясным научным языком и качественно оформлен.

3. Степень обоснованности и достоверности полученных результатов

Автор диссертационной работы достаточно корректно использует известные научные методы обоснования полученных результатов. Автором изучены и критически проанализированы известные достижения и теоретические положения многих отечественных и зарубежных исследователей, занимающихся проблемами, близкими к рассматриваемым диссертантом.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается корректным использованием в работе известных апробированных методов теории упругости и подходов к проведению численного моделирования. Степень достоверности подтверждается удовлетворительными результатами относительных ошибок, полученных при сравнении результатов теоретического расчёта и эксперимента.

4. Научная новизна

Научная новизна результатов состоит в следующем:

- разработана оригинальная математическая модель, описывающая статику стержневых упругих элементов для различных схем нагружения, приведённая реализация отличается использованием минимизации целевых функций для уменьшения трудоёмкости решения;
- разработана авторская методика расчёта динамических параметров стержневых элементов, позволяющая рассчитывать динамические характеристики системы по априори рассчитанным статическим характеристикам элементов;

- предложена оригинальная схема зарождения поперечных волн в стержневых упругих элементах, позволяющая ввести в закон сохранения энергии системы компонента, отвечающего за контактное взаимодействие тел;
- проведён комплекс экспериментальных работ на установках в двух различных исполнениях для оценки динамических параметров стержневых элементов с сосредоточенными массами и без них;
- предложен оригинальный подход к анализу экспериментальных данных, позволяющий оценить время первой остановки амортизируемого тела даже с помощью экспериментальной аппаратуры низкой точности.

5. Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в предложенных автором моделях статического изгибного безперегибного деформирования стержневых упругих элементов с зафиксированными сосредоточенными массами, позволяющих моделировать стержневые элементы, нагруженные по различным схемам, а также в предложенном упрощённом подходе к зарождению фронта поперечной волны и учёту контактно-волновых явлений в модели динамики стержневых элементов.

6. Практическое значение работы

Основное практическое значение диссертации заключается в разработке 4-х программных комплексов, позволяющих численно моделировать деформирование стержневых упругих элементов.

Результаты работы позволяют различным предприятиям моделировать статическое и динамическое изгибное деформирования стержневых упругих элементов, обеспечивая более высокую эффективность работы амортизационных устройств.

7. Достаточность и полнота публикаций по теме диссертации

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 17-ти печатных работах, из которых 2 статьи опубликованы в научном рецензируемом издании из списка, определённого ВАК РФ. Автором

получено 4 свидетельства о регистрации программных комплексов для ЭВМ, приравняемых к публикациям в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

8. Замечания по диссертационной работе и автореферату

8.1 В первой главе «Состояние исследуемого вопроса» автор приводит примеры использования стержневых упругих элементов в устройствах автомобильной, измерительной и медицинской техники, можно было бы также отметить перспективу использования рассматриваемых амортизирующих элементов в строительной и горнодобывающей технике, непосредственно связанной с высокоимпульсным периодическим нагружением.

8.2 Все расчёты, приведённые в работе, выполнены для стали 60С2А, представляет интерес сравнение квазистатических и динамических характеристик упругих элементов, сделанных из различных материалов.

8.3 В выражении (5.4) автором предлагается специальная функция $f_m(x)$, было бы логично использовать известную, классическую единичную функцию, описанную в источнике [30] списка литературы.

8.4 В структуре результатов расчётов и предложенных методик автор в основном использует конкретные численные значения. При проведении расчётов и построении математических моделей важно, по возможности, приводить выражения к безразмерному виду.

8.5 В работе анализируется выбор приведённого вида целевых функций. Возможно ли уменьшение трудоёмкости решения или повышение точности решения при использовании других видов целевых функций?

8.6 В работе величиной w обозначена координата по длине стержня, однако в классических работах, связанных со статикой и динамикой стержня, данной буквой обозначается значение прогиба упругого элемента, для преемственности работ одной тематики рекомендуется соответствие обозначений.

8.7 В четвёртой главе работы не рассмотрена возможность

возникновения откольного разрушения в стержне при отражении волн в точке заделки стержня.

8.8 В автореферате на рисунках 10, 11 и 12 трудно видимы номера позиций на графиках, а также трудноразличимы пунктирные линии, что, стоит отметить, не мешает восприятию информации в связи с подробным описанием в тексте автореферата.

Высказанные замечания не снижают общую ценность выполненной диссертационной работы и могут быть уточнены соискателем в его дальнейших исследованиях

9. Соответствие автореферата содержанию диссертации

Содержание автореферата в целом отражает содержание диссертации. Основные выводы и результаты отражены в автореферате диссертации. Формулировки основных выводов и результатов в автореферате соответствуют формулировкам в диссертации.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертация Левина А.С. выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет законченную научно-квалификационную работу. Представленная работа является актуальной и имеет признаки научной новизны. В работе решена актуальная научно-техническая задача совершенствования методов расчёта и анализа безперегибного двухмерного изгиба стержневых упругих элементов. Полученные результаты, представленные модели и их реализации, а также разработанные программные комплексы имеют существенное значение для развития страны.

Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), а именно пунктам 2, 3 и 8 паспорта специальности.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям п.п. 9 – 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025 г.), утвержденного постановлением Правительства

Российской Федерации от 24.09.2013 г. N 842 (ред. от 16.10.2024 г.), а её автор, Левин Артём Сергеевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Официальный оппонент

Заслуженный работник высшей школы РФ,
советник Российской академии архитектуры и строительных наук,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технической физики и математики
ФГБОУ ВО «Орловский
государственный университет
имени И.С. Тургенева»

Myerson

/Гордон Владимир Александрович/

Дата: « 14 » 08 2025 г.

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Адрес: 302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95.
Телефон: +7 (4862) 41-98-48. E-mail: gordon1312@mail.ru
Сайт организации: <https://oreluniver.ru>

Подпись официального оппонента Гордана Владимира Александровича
удостоверяю.

И.о. проректора по научно-технологической деятельности
и аттестации научных кадров ОГПУ им. П.В. Вавилова
д.т.н., профессор



С.Ю. Радченко

В диссертационный совет 24.2.417.02 при
ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет»

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук, доцента, доцента кафедры «Прикладная математика и механика» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» на диссертационную работу Левина Артёма Сергеевича на тему «Моделирование изгибного деформирования стержневых упругих элементов с сосредоточенными массами», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

1. Актуальность темы исследования.

Многочисленные приспособления и механизмы основаны на явлении сопротивления изгибу стержневых упругих элементов. Отдельно стоит отметить стержневые упругие элементы амортизаторов, достигающие больших прогибов в процессе функционирования, расчёт таких упругих элементов является «нетривиальной» задачей, особенно для случая переменного поперечного сечения элемента. В случае активного динамического воздействия на амортизатор, в составе которого имеется стержневой упругий элемент, важным является расчёт изменения скорости во времени, особенно до момента первой полной остановки амортизируемого тела. В работе продемонстрирована необходимость учёта влияния сосредоточенных масс при моделировании процесса изгибного деформирования, а также возможность использования сосредоточенных масс как управляющих элементов, позволяющих изменять статические и динамические характеристики стержневых упругих элементов.

Поэтому диссертация А.С. Левина, ставящая целью разработку математических моделей динамического изгиба, а также программных комплексов для расчётов характеристик стержневых упругих элементов с сосредоточенными массами - **актуальна** для науки и производства.

2. Оценка содержания диссертации.

Диссертация А.С. Левина общим объёмом 145 страниц, содержащая 54 рисунка и 7 таблиц, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 116 наименований и 2-х приложений.

Диссертация оформлена в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, текст логичен и качественно оформлен.

Во **введении** отражена актуальность темы работы, поставлены цель и задачи исследования, представлены объект и предмет исследования, методы исследования, научная новизна, достоверность полученных результатов, положения, выносимые на защиту, информация об апробации результатов, личный вклад автора, научная и практическая ценность.

В **первой** главе «Состояние исследуемого вопроса» приводятся результаты патентного поиска и приведены изделия из техники различных отраслей, в которых используются стержневые упругие элементы. Представлены результаты обзора современной научной литературы. Рассматриваются основные системы уравнений для каждой компоненты комплексного процесса динамического изгиба стержневых упругих элементов.

Во **второй** главе «Квазистатическое деформирование стержневых упругих элементов амортизаторов» рассматривается статический изгиб стержневых упругих элементов, как процесса квазистатического изгиба упругих элементов амортизаторов, нагруженных согласно четырём основным схемам нагружения. Автором предлагается модель статического изгиба стержневых упругих элементов переменного сечения, полученную систему дифференциальных уравнений предлагается решать с использованием метода Рунге-Кутты 4-го порядка и метода минимизации целевой функции.

В **третьей** главе «Динамическое деформирование стержневых упругих элементов амортизаторов» автором предлагаются модели динамического деформирования стержневых упругих элементов. В главе представлены выражения, позволяющие производить расчёты изменения скорости во времени для процесса амортизации стержневым упругим элементом ударяющегося тела.

В **четвёртой** главе «Начальное контактно-волновое взаимодействие» описывается авторский подход к процессу зарождения и распространения поперечной волны в ходе контактного взаимодействия стержневого упругого элемента и ударяющегося тела. Представлена конечно-разностная реализация модели распространения поперечных волн и выражения по расчёту касательных напряжений, возникающих в стержне.

В **пятой** главе «Стержневые упругие элементы с зафиксированными сосредоточенными массами» рассматриваются стержневые элементы с сосредоточенными массами, закреплёнными на их оси. Автором разработаны математические модели изгибного деформирования элементов с

сосредоточенными массами, являющиеся интегральной совокупностью ранее разработанных автором моделей, обобщённых на случай изгиба элементов с сосредоточенными массами. Продемонстрирована необходимость учёта сосредоточенных масс при расчёте динамики стержневых упругих элементов. Показана возможность управления характеристиками стержневых упругих элементов за счёт использования сосредоточенных масс. Приводятся результаты экспериментов, подтверждающие точность предлагаемых моделей.

В **заключении** приведены основные выводы и результаты исследования.

Работа снабжена большим количеством графиков, на которых подробно демонстрируются результаты численных экспериментов, выполненных с использованием разработанных автором программных комплексов.

3. Соответствие автореферата содержанию диссертации

Содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации. Выводы и основные результаты соответствуют указанным в диссертации.

4. Научная новизна работы и полученных результатов

Автор работы разработал комплексные математические модели, позволяющие моделировать комплексный процесс изгибного деформирования стержневых упругих элементов с сосредоточенными массами. Разработанные модели реализованы в виде комплексов программ для ЭВМ.

Следующие результаты работы обладают **научной новизной**.

В области математического моделирования:

- автором разработаны математические модели динамических изгибных процессов для стержневых упругих элементов переменного сечения, основанные на комплексном представлении процесса, как совокупности квазистатической, динамической и контактно-волновой составляющей.

В области численных методов:

- в работе предложен алгоритм решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка на основе уравнения Эйлера-Бернулли, использующий численный метод минимизации целевой функции, что позволяет решать предложенную систему уравнений для стержневых упругих элементов переменного сечения подверженных большим прогибам.

В области программных комплексов:

- разработаны и реализованы программные комплексы с использованием языков программирования Matlab, Python и QBasic, позволяющие производить расчёты статических и динамических характеристик стержневых упругих элементов с сосредоточенными массами. Разработанные программные комплексы зарегистрированы и на них получены свидетельства о регистрации;

- проведена серия экспериментов, результаты которых подтверждают работоспособность разработанных программных комплексов.

5. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов сформулированных в работе

Сформулированные в диссертации научные положения соответствуют поставленной цели. Выводы, полученные в диссертации обоснованы результатами теоретических и экспериментальных исследований. Достоверность результатов обеспечивается применением известных численных методов и апробированных методов математического моделирования. Достоверность полученных результатов подтверждается результатами расчётов по методу конечных элементов и результатами экспериментальных работ.

Анализ содержания диссертации позволяет утверждать о том, что все положения, выносимые на защиту являются обоснованными и доказанными, а диссертация представляет из себя законченную научно-квалификационную работу.

Результаты исследований опубликованы в 17 публикациях, из которых 2 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки Российской Федерации. По теме диссертации получено 4 свидетельства о регистрации программных комплексов. Вышеуказанное позволяет судить о достаточности публикаций по теме работы.

6. Апробация результатов исследования

Результаты исследования докладывались на Всероссийских научных конференциях в числе которых: «Техника XXI века глазами молодых учёных и специалистов», «Научно-практические конференции профессорско-преподавательского состава ТулГУ с Всероссийским участием», «Проблемы развития стрелковой отрасли в Российской Федерации».

7. Теоретическая и практическая значимость, полученных результатов

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в разработанных автором моделях комплексного процесса динамического

изгиба стержневых упругих элементов с зафиксированными сосредоточенными массами, а также в предложенном алгоритме решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений на основе уравнения Эйлера-Бернулли, использующем метод минимизации целевой функции.

Практическая значимость результатов исследований, полученных в диссертации заключается в разработке масштабируемых моделях динамического изгиба стержневых упругих элементов, а также в разработанных и зарегистрированных программных комплексах, внедрённых на предприятии АО «СКБ» и в учебный процесс ФГБОУ ВО ТулГУ (в приложении к работе представлены подтверждающие акты).

8. Замечания по диссертации

1. Во второй главе работы предлагается использовать метод минимизации целевой функции для уменьшения времени решения задачи расчёта квазистатических характеристик упругих элементов, однако при разработке программных комплексов автором применяются такие языки программирования как: QBasic, Matlab, Python, обладающие большим временем выполнения программ. При разработке программных комплексов было бы логично применить высокопроизводительные языки программирования, таких как: C++, Rust, Assembler, Java.

2. Современные реализации алгоритма минимизации «дифференциальная эволюция» имеют большое количество входных параметров, определяющих работу алгоритма, в работе не приведены значения данных параметров, а также сравнения результатов расчётов при использовании различных наборов параметров.

3. На странице 50 работы, автором предлагается останавливать процесс минимизации целевой функции при значении менее 10^{-6} , однако из текста работы не ясна причина выбора именно данной величины критерия останова.

4. Вместо дублирования рисунка 2.3 рисунком 2.4, можно было ограничиться ссылкой на иллюстрацию.

5. В работе приведены уравнения моментов для четырёх основных схем нагружения (2.2.1) – (2.2.4), представляет интерес универсальное уравнение момента применяемое к представленным четырём схемам, а также к их композициям и иным произвольным схемам.

Замечания не снижают общего **положительного** впечатления от работы.

9. Заключение о соответствии диссертационной работы установленным требованиям.

Диссертация Левина А.С. является научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача комплексного математического моделирования динамического процесса изгибного деформирования стержневых упругих элементов с сосредоточенными массами. Созданные модели и разработанные на их основе программные комплексы для ЭВМ имеют существенное значение для отраслей машиностроения и приборостроения.

Представленная диссертационная работа Левина Артёма Сергеевича выполнена на высоком научно-техническом уровне. По научному уровню, полученным результатам, актуальности, теоретической и практической значимости, оформлению и содержанию диссертация полностью соответствует всем требованиям п.п. 9 – 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Левин Артём Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Доцент кафедры «Прикладная математика и механика» ФГБОУ ВО "Воронежского государственного технического университета", кандидат физико-математических наук, доцент (Диссертация защищена по специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

Горайнов
Виталий
Валерьевич

14 августа 2025 г.

Подпись Горайного Виталия Валерьевича заверяю

Начальник отдела по работе с персоналом
ФГБОУ ВО "Воронежского государственного
технического университета"



О.В. Козлова

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"
Адрес: 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84.
Веб-сайт: <https://cchgeu.ru/>
Адрес электронной почты: gorvit77@mail.ru
Телефон: +7 (473) 2-71-53-62