

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, доцента Сердюка Дмитрия Олеговича

на диссертацию Царева Романа Олеговича

на тему «Нелокальная во времени модель динамического деформирования стержневых систем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела

Актуальность темы исследования

Все более широкое применение композитных материалов в различных областях инженерной практики, обусловленное высокой вариативностью их свойств, требует развития методов прочностного анализа и поиска новых подходов к моделированию их работы под нагрузкой, поэтому тема диссертационного исследования Царева Р.О., безусловно, представляется актуальной.

На практике, элементы инженерных объектов почти всегда подвержены динамическим воздействиям, таким как вибрации от транспорта и оборудования, сейсмические воздействия, аэродинамические воздействия, и т.д. При решении задачи о колебаниях больших систем, выполненных из композиционных материалов, применение трехмерных моделей, позволяющих с высокой степенью детализации задать элементы связующего и армирования, требует крайне высоких вычислительных мощностей, а часто и вовсе невозможно. Кроме того, при проектировании систем, выполненных из новых материалов, часто возникает необходимость выполнения многовариантных расчётов, что также увеличивает время математического анализа.

Таким образом необходимым становится построение одномерных и двумерных моделей композитных элементов, позволяющих добиться адекватного соответствия эксперименту. Для решения этой задачи могут быть использованы неклассические подходы, такие как применяемая в настоящей диссертации гипотеза о нелокальности во времени жесткостных свойств материала.

Отдельную сложность представляет задача моделирования процесса диссипации энергии колебаний, так как ни одна существующая на сегодняшний день модель внутреннего трения в материале не является универсальной. Построение непротиворечивого описания динамического поведения композитных элементов позволило бы расширить класс решаемых задач.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения диссертации не противоречат современным научным представлениям в области механики деформируемого твердого тела и динамического анализа композитных конструкций. Постановка задачи выполнена корректно, а выбор методов для её решения обоснован подробным анализом результатов, достигнутых в этой области.

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты апробированы на научно-практических конференциях российского и международного уровня, в том числе:

- XI и X Международные научные конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» «Золотовские чтения» (2023, 2024)
- XII, XIII и XIV Всероссийские научные конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского (2022, 2023, 2024)
- IX Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (2025)

Степень достоверности и новизна, полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением методов механики деформируемого твердого тела и численного анализа, сопоставлением полученных результатов с результатами численного моделирования, полученными с использованием верифицированного программного обеспечения, а также с результатами экспериментов, выполненными с применением поверенного лабораторного оборудования.

Основные результаты диссертационной работы отражены в 7 научных публикациях, включая 3 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий. Также соискателем получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В ходе настоящего исследования получены следующие новые результаты:

- на основании предположения о нелокальности во времени упругих свойств материала разработана математическая модель, применимая для динамического анализа стержневых систем, выполненных из композитных материалов;
- исследован характер влияния масштабного параметра на характер моделируемого колебательного процесса;
- показана возможность использования разработанной модели при описании диссипативного поведения материалов, уровень демпфирования в которых не зависит от частоты колебаний.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 148 наименований и 3 приложений, содержит 122 страницы, 58 рисунков, 6 таблиц.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, рассмотрена степень её научной разработанности, сформулированы цель и основные задачи исследования. Также представлены научная новизна работы, её теоретическая и практическая значимость, описаны используемые методы исследования и приведено обоснование достоверности полученных результатов. Кроме того, сформулированы положения, выносимые на защиту, и приведены сведения об апробации результатов работы.

Первая глава представляет собой обзор отечественных и зарубежных исследований, посвящённых рассматриваемой тематике. Соискатель подчеркивает, что задача сокращения размерности математических моделей физических объектов не имеет универсального решения. В том случае, если классических моделей оказывается недостаточно для адекватного описания поведения современных

материалов, особенно композитов, для моделей сокращённой размерности возможно применение неклассических гипотез.

Также автором рассмотрены основные подходы к описанию процессов диссипации энергии при колебаниях механических систем. Проведён анализ классических вязкоупругих моделей, моделей внутреннего трения и наследственных теорий, а также рассмотрены экспериментальные исследования, посвящённые изучению демпфирующих свойств материалов. Автор показывает, что несмотря на большое количество существующих моделей, большинство из них описывает частотно-зависимое демпфирование, тогда как результаты ряда экспериментальных исследований свидетельствуют о преимущественно частотно-независимом характере внутреннего трения в реальных материалах.

Третья часть обзора посвящена основным подходам к построению нелокальных моделей динамического поведения конструктивных элементов и систем. Показано, что применение положений нелокальной механики позволяет создавать модели сокращённой размерности, способные учитывать влияние внутренней структуры материала, масштабные эффекты и наследственные свойства. В обзоре рассмотрены как пространственно-нелокальные модели, так и модели с временной нелокальностью. По результатам проведённого обзора определены цель и задачи диссертационной работы, а также сформулированы положения, характеризующие её научную новизну.

В завершении главы сформулирована математическая постановка решаемой задачи. Автор отмечает, что нелокальная во времени модель упругих свойств материала является обобщением локальной классической модели и может быть сведена к ней при определенном значении неклассической константы, характеризующей масштаб памяти материала. В диссертации эта константа названа «масштабным параметром».

Во второй главе автором выполнен вывод конечно-элементных соотношений для нелокальной во времени модели динамического деформирования стержневых элементов и систем. Разработанная модель интегрирована в алгоритм метода конечных элементов, а для численного решения уравнения движения использована неявная схема. Далее представлено исследование влияния масштабного параметра

нелокальной модели на характер колебательного процесса. Для этого выполнено моделирование динамического поведения изгибаемой балки и плоской рамы при различных значениях масштабного параметра. Анализ результатов показал, что изменение масштабного параметра оказывает влияние на амплитуду колебаний, при этом не меняя их частоту. Кроме того, показано, что учёт временной нелокальности упругих свойств материала не противоречит классическим решениям и может быть использован для моделирования динамического поведения сложных стержневых систем.

В третьей главе автором разработана методика калибровки масштабного параметра нелокальной во времени модели динамического деформирования на основе метода наименьших квадратов и метода золотого сечения. Предложенный подход позволяет определять значение масштабного параметра по результатам численного или экспериментального исследования путём минимизации расхождения между расчётными и эталонными данными. Также в главе приведено обоснование корректности процедуры калибровки и показано, что целевая функция – среднеквадратическая ошибка – имеет выраженный минимум, обеспечивающий устойчивость процедуры определения параметра.

Для тестирования разработанной методики были построены трёхмерные конечно-элементные модели композитных балок и рамных систем с учётом трансверсальной изотропии материала. Проведено сравнение результатов трёхмерного моделирования с результатами одномерной локальной и нелокальной моделей. Показано, что откалиброванная нелокальная модель обеспечивает существенно более высокое соответствие данным численного эксперимента по сравнению с классической локальной моделью.

Кроме того, исследована устойчивость масштабного параметра при изменении геометрии конструкций. Автором установлено, что при частотно-независимом внутреннем демпфировании масштабный параметр сохраняет постоянное значение для конструкций, выполненных из одного материала, что позволяет рассматривать его как характеристику материала. Также показана возможность применения разработанной модели для описания динамического поведения более сложных стержневых систем, включая П-образные рамы.

При калибровке модели плоской рамы получен очень важный результат. Показано, что несмотря на совершенно различную геометрию, изгибаемая балка и рама с близкими первыми собственными частотами колебаний, характеризуются близкими же масштабными параметрами, что подтверждает предположение, что масштабный параметр – это параметр материала.

В четвёртой главе автором выполнена экспериментальная верификация разработанной нелокальной во времени модели динамического деформирования на основе результатов лабораторных испытаний балок из цементных композитов. Описана экспериментальная установка, методика проведения динамических испытаний и процедура регистрации акселерограмм при импульсном воздействии на балки с различными схемами закрепления.

На основании экспериментальных данных проведена калибровка масштабного параметра нелокальной модели для различных типов композитных материалов. Выполнено сравнение результатов лабораторных испытаний с результатами одномерного моделирования как по классической локальной модели, так и по откалиброванной нелокальной модели. Показано, что нелокальная модель обеспечивает более точное воспроизведение колебательного процесса и позволяет существенно уменьшить среднеквадратичную ошибку по сравнению с классическим подходом.

Также проведена дополнительная проверка устойчивости найденных значений масштабного параметра при изменении положения импульсного воздействия. Установлено, что масштабный параметр сохраняется при различных схемах нагружения для одного и того же материала, что подтверждает вывод о том, что масштабный параметр является характеристикой материала.

В заключении сформулированы выводы по результатам теоретических, численных и экспериментальных исследований, обоснована возможность применения разработанной модели в качестве альтернативы подробным трёхмерным моделям при анализе динамического поведения композитных конструкций, а также определены перспективы дальнейшего развития предложенного подхода.

В приложении 1 представлено свидетельство о регистрации разработанной программы для ЭВМ.

В приложении 2 представлены тексты основных компьютерных программ.

В приложении 3 представлены обработанные результаты, полученные в ходе лабораторных экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов математического моделирования динамического поведения элементов и систем, выполненных из композитных материалов.

Практическая значимость состоит в том, что разработанная модель интегрирована в алгоритм метода конечных элементов, что обеспечивает возможность её адаптации для использования в расчётных комплексах. Кроме того, автором предложена методика определения неклассической константы нелокальной во времени модели упругих свойств материала на основе обработки экспериментальных данных.

Замечания по диссертационной работе

По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания:

1. Во второй главе при выводе конечно-элементных соотношений нелокальной во времени модели динамического деформирования не отмечено, какая использовалась балочная теория – Бернулли-Эйлера, Тимошенко, Чоу и т.д. О том, что учтены гипотезы Бернулли-Эйлера, приходится догадываться по косвенным признакам.

Обоснование выбора данной теории, характеризующейся бесконечной скоростью распространения возмущений, в работе также не обсуждается.

2. В третьей главе при проведении численных расчетов отмечается, что рассмотрен трансверсально-изотропный материал – термореактивный винилэфирный стеклопластик I класса, однако тензор упругих постоянных для указанных модулей упругости первого и второго рода в сочетании с коэффициентами Пуассона не демонстрирует связь компоненты тензора $c_{66} = (c_{11} - c_{12})/2$.

3. Третья глава посвящена численным расчётам с применением метода конечных элементов. Метод конечных элементов – это не экспериментальный метод, поэтому говорить об «эксперименте» — значит вводить читателя в заблуждение.

4. В четвертой главе ставится серия экспериментальных исследований динамического отклика балок, выполненных из цементных композитов, где в качестве наполнителей использовались керамические и стеклянные микросферы, в том числе с добавлением микрофибры. Однако, при проведении численных расчетов автор задал приведенные характеристики композита изотропными. Такой подход требует пояснения.

5. Все расчеты, кроме одного, выполнены для граничных условий жесткого защемления торцов балки. В свою очередь, метод конечных элементов достаточно гибок в этом плане, и проведение расчётов для иных граничных условий обогатило бы работу и продемонстрировало отсутствие проблем в разработанном конечном элементе.

6. В численных расчетах П-образной рамы автор использует нерациональное расположение поперечного сечения ригеля.

Указанные замечания не являются препятствием для общей положительной оценки диссертационного исследования.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Соответствие диссертации пунктам 10, 11 и 14 Положения о присуждении ученых степеней


Диссертация обладает внутренним единством и содержит новые, полученные лично автором результаты, что соответствует п. 10 Положения о присуждении ученых степеней. В соответствии с п. 11 Положения о присуждении ученых степеней, основные результаты исследования опубликованы в трех статьях, входящих в перечень ВАК РФ. В диссертации присутствуют все необходимые ссылки на авторов и источники заимствования в соответствии с п. 14 Положения о присуждении ученых степеней

Заключение

Диссертация Царева Р.О. на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи о колебаниях стрержневых элементов и систем, решаемой с использованием предположения о нелокальности во времени упругих свойств материала, и имеющей значение для развития механики деформирования твердого тела, что соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

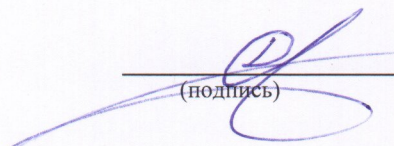
Официальный оппонент:

д.ф.-м.н. (1.1.8. Механика деформируемого твердого тела), доцент, профессор кафедры «Сопrotивление материалов, динамика и прочность машин» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,
+79150511075,
d.serduk55@gmail.com

 Д.О. Сердюк
14 мая 2026 г.

Я, Сердюк Дмитрий Олегович, даю согласие на включение своих персональных данных, содержащихся в настоящем отзыве, в документы, связанные с защитой диссертации Царева Романа Олеговича, и их дальнейшую обработку.

14 мая 2026 г.

 Д.О. Сердюк
(подпись)

Подпись _____ Сердюка Дмитрия Олеговича _____ удостоверяю
(фамилия имя отчество оппонента полностью)

*Зам. нач. отдела
кадров*
(должность)

 (подпись)
 М.П.
Матвеев М.А.
(Ф.И.О.)