ОТЗЫВ

официального оппонента Могилевича Льва Ильича
на диссертационную работу Калягина Максима Юрьевича «Динамическое поведение пористых материалов под действием высокоинтенсивных нагрузок различной физической природы», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

Пористые материалы и материалы с выраженной микроструктурой находят широкое применение в авиационной и аэрокосмической технике, транспортном машиностроении, защитных конструкциях, биомеханике, геомеханике, задачах термо- и шумозащиты. При этом классические модели упругости не всегда позволяют адекватно описывать поведение таких сред, поскольку не содержат внутренних масштабных параметров и не учитывают влияние микроструктурных дефектов, свободных дилатаций и градиентных эффектов.

Особую значимость работа приобретает в связи с необходимостью моделирования поведения пористых материалов при динамическом и высокоинтенсивном воздействии, когда свойства среды, ее способность к демпфированию, перераспределению энергии удара и изменению локальных деформационных характеристик могут существенно влиять на прочность и работоспособность конструкций.

Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

Научная новизна заключается в:

– разработке вариационной модели обобщенных градиентных пористых сред со свободной и стесненной дилатацией;

– построении моделей деформирования пористых тонких структур, в частности стержней и пластин, с учетом двух масштабных факторов: пористости-дефектности и градиентности;

– получении оценок эффективных свойств пористых структур на основе соотношений механики композитов;

– исследовании механических и динамических свойств пористых материалов при статическом и динамическом нагружении;

– разработке и апробации расчетной модели ударного взаимодействия пористого тела с преградой, в том числе с использованием конечно-элементного моделирования.

Указанные результаты обладают признаками научной новизны, поскольку расширяют существующие подходы к моделированию пористых материалов и позволяют учитывать эффекты, которые не описываются в рамках классической теории упругости.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются в целом обоснованными. Автор использует комплексный подход, включающий аналитическое построение моделей пористых сред, вариационные методы, численное моделирование, конечно-элементные расчеты, а также экспериментальные исследования механических и динамических свойств пористых образцов.

По **структуре** диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 100 источников. Работа содержит 123 страницы текста.

Во введении дается обоснование актуальности, а также формулируются цели и задачи, отражается научная новизна, излагаются методы исследования, обосновывается достоверность полученных результатов.

Отдел корреспонденции
и контроля исполнения
документов МАИ
«25» 05 2026 г.

В первой главе рассмотрены теоретические основы описания пористых материалов как специального случая деформируемых сред со свободными, неинтегрируемыми деформациями. Автор анализирует обобщенную теорию сред с полями дефектов, формулирует модель среды со свободными дилатациями, рассматривает градиентную среду Миндлина и переходит к динамической модели градиентных дефектных сред. Важным результатом является представление обобщенной модели, включающей как классические упругие свойства, так и параметры, характеризующие алгебраическую пористость, градиентность и взаимодействие соответствующих полей.

Во второй главе приведены экспериментальные исследования пористых образцов. Рассмотрены статические испытания, динамические испытания, исследование микроструктуры, а также валидация результатов. Экспериментальная часть работы усиливает достоверность теоретических построений и позволяет связать параметры модели с реальными физико-механическими характеристиками материала.

В третьей главе построена вариационная модель пористых стержней. Автор рассматривает кинематическую модель, работу внешних сил, потенциальную энергию деформации, статические постановки для растяжения и изгиба, а также динамическую постановку с учетом кинетической энергии. Достоинством данной части работы является последовательное применение вариационного подхода, позволяющего получить уравнения равновесия и движения для стержневых элементов из пористого материала.

В четвертой главе исследуются физико-механические свойства пористых материалов. Рассматриваются оценки модулей упругости на основе материала с эквивалентными свойствами, анализируются диссипативные свойства пористых сред, проводится моделирование с учетом динамических и статических экспериментальных данных. Полученные результаты имеют прикладное значение, поскольку позволяют перейти от абстрактной континуальной модели к расчетным характеристикам реальных пористых материалов.

В пятой главе изучается высокоскоростной удар пористого тела о преграду. Автор рассматривает приведение реальной конструкции головной части летательного аппарата к модели ударника, формулирует модель ударного взаимодействия, описывает схему численного решения уравнений взаимодействия методом сеток, анализирует результаты нормального и косого удара, а также выполняет численное моделирование процесса проникания в Ansys. Данная глава имеет выраженную инженерную направленность и демонстрирует возможность применения разработанных подходов к задачам оценки ударного взаимодействия.

В заключении диссертации представлены выводы по работе и перечислены основные результаты проведенного исследования.

Обоснованность выводов подтверждается тем, что они следуют из разработанных математических моделей, результатов численных расчетов и экспериментальных данных. Положения, выносимые на защиту, логически связаны с содержанием диссертации и отражают основные результаты исследования.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированного математического аппарата классической и градиентной теории упругости, вариационных методов, теории колебаний, численных методов решения дифференциальных уравнений и конечно-элементного моделирования. Автором применяются современные программные средства, включая MATLAB и Ansys Workbench, а экспериментальные исследования выполнены с использованием специализированного оборудования.

Достоверность результатов также обеспечивается сопоставлением численных расчетов с экспериментальными данными, а также использованием конечно-элементного моделирования

для проверки расчетных оценок в задачах ударного взаимодействия. В работе показано согласование результатов моделирования с экспериментальными и расчетными данными, что подтверждает корректность предложенных подходов в рассматриваемых диапазонах параметров.

Практическая ценность работы заключается в возможности использования предложенных моделей и расчетных методик при оценке динамических характеристик пористых материалов и конструктивных элементов из них. Результаты работы могут быть полезны при проектировании элементов авиационной и аэрокосмической техники, защитных конструкций, изделий из пористых и композиционных материалов, а также при разработке инженерных методик расчета ударного взаимодействия неоднородных тел с преградами.

Особый интерес представляет разработанный подход к описанию пористо-смесевого ударника, позволяющий учитывать неоднородную структуру реального объекта и переходить от сложной конструкции к расчетной модели, пригодной для инженерного анализа.

Полнота опубликования результатов и оценка автореферата.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в достаточном объеме. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ (категория К1), а также 3 статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных и приравненных к категории К1. Остальные публикации являются тезисами докладов на научно-практических конференциях и симпозиумах (включая международные). Это свидетельствует об апробации основных положений работы и их представлении научному сообществу.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, отражает ее цель, актуальность, научную новизну, практическую значимость, основные положения, выносимые на защиту, структуру работы, сведения об апробации и публикациях. Существенных расхождений между авторефератом и диссертацией не выявлено.

Замечания по диссертационной работе и автореферату:

1. В работе следовало бы более подробно обсудить область применимости предложенной обобщенной модели пористой среды, в частности ограничения, связанные с предположениями линейной изотропной среды и использованием упрощенного варианта теории Миндлина.
2. При введении большого числа физических постоянных целесообразно было бы подробнее рассмотреть вопрос их экспериментальной идентификации, включая чувствительность расчетных результатов к изменению отдельных параметров.
3. Экспериментальная часть работы является важной, однако описание статистической обработки результатов испытаний, погрешностей измерений и повторяемости экспериментов могло бы быть представлено более подробно.
4. В пятой главе переход от реальной конструкции головной части летательного аппарата к пористо-смесевой модели ударника представляет существенный практический интерес. Вместе с тем алгоритм такого перехода желательно было бы формализовать более подробно, чтобы облегчить его применение к другим типам конструкций.
5. В работе было бы полезно расширить сравнение предложенной модели с альтернативными моделями пористых и поврежденных сред, особенно в части учета масштабных эффектов и диссипативных свойств.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, поскольку они носят уточняющий и рекомендательный характер и могут рассматриваться как направления дальнейших исследований.

Заключение.

Считаю, что представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача развития моделей, методов расчета и экспериментально-численного исследования динамического поведения пористых материалов и конструктивных элементов из указанного класса материалов. Полученные в работе результаты обладают новизной, представляют как научный, так и практический интерес и являются обоснованными и достоверными. Основное содержание работы соответствует паспорту специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин, в частности, в пунктах 13, 14, 15.

Представленные результаты получены автором лично или при его непосредственном участии, что подтверждается публикациями.

Диссертация **соответствует** требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор, Калягин Максим Юрьевич, **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» СГТУ имени Гагарина Ю.А., д.т.н., профессор — Л.И. Могилевич

«20» 05 2026г.

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» Адрес места работы: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77. Телефон: +7 (8452) 99-88-70 E-mail: strunovava@sstu.ru

Научная специальность, по которой защищена докторская диссертация: 05.11.03 – «Приборы навигации». Ученое звание профессора по кафедре прикладной математики и теории навигационных приборов.

Я, Могилевич Лев Ильич, даю свое согласие на включение своих персональных данных, содержащихся в настоящем отзыве, в документы, связанные с защитой диссертации Калягина Максима Юрьевича, и их дальнейшую обработку.

Л.И. Могилевич

Подпись профессора, доктора технических наук Могилевича Льва Ильича удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета СГТУ имени Гагарина Ю.А. — А.В. Потапова

«20» 05 2026 г.

С отзывом ознакомлен
01.06.26 М.Ю. Калягин