

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. Первого проректора федерального
государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский
государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)»

Н.С. Лазарева



» *maia*

2026 г.

ОТЗЫВ ведущей организации

на диссертацию Калягина Максима Юрьевича «Динамическое поведение пористых материалов под действием высокоинтенсивных нагрузок различной физической природы», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Диссертационная работа Калягина М. Ю. посвящена актуальной научно-технической задаче, которая заключается в исследовании динамического поведения пористых материалов при воздействии высокоинтенсивных нагрузок различной физической природы. Рассматриваемая проблематика имеет существенное значение для расчетного обоснования элементов авиационных и аэрокосмических конструкций, в которых используются легкие пористые и композиционные материалы.

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что пористые материалы широко применяются в качестве конструкционных, тепло-, звуко- и виброизолирующих материалов, а также в качестве заполнителей многослойных конструкций. При этом их поведение при динамическом и высокоинтенсивном нагружении не всегда может быть адекватно описано в рамках классической теории упругости, поскольку микроструктура, пористость, масштабные эффекты и перераспределение дефектов оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние, диссипацию энергии и динамический отклик материала.

Следует отметить, что диссертация сочетает теоретическое построение обобщенных моделей пористых сред, разработку вариационных моделей стержневых элементов, экспериментальное исследование образцов с различной плотностью, численное моделирование и инженерный анализ задач

ОТДЕЛ КОМПЕТЕНЦИЙ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«29» 05 2026 г.

различной плотностью, численное моделирование и инженерный анализ задач ударного взаимодействия. Такое сочетание аналитических, численных и экспериментальных методов повышает научную и практическую ценность полученных результатов.

Значимость полученных результатов для развития соответствующей отрасли науки.

Полученные Калягиным М. Ю. результаты имеют существенное значение для развития теоретической механики, динамики машин и механики деформируемого твердого тела, прежде всего в части построения и применения неклассических моделей пористых, дефектных и градиентных сред. В диссертации рассматривается класс материалов, для которых классическая теория упругости не всегда обеспечивает достаточную полноту описания, поскольку микроструктура, пористость, масштабные эффекты и перераспределение дефектов существенно влияют на напряженно-деформированное состояние и динамический отклик материала. Введение в рассмотрение свободных неинтегрируемых дилатаций, градиентных эффектов и связанных с ними дополнительных материальных параметров расширяет возможности математического моделирования пористых сред при статическом, динамическом и высокоинтенсивном нагружении.

Научная значимость работы определяется тем, что автором развиты модели пористых сред, учитывающие как дефектность материала, так и градиентные дилатационные эффекты. В диссертации предложена обобщенная вариационная постановка для градиентной пористой среды, показана связь рассматриваемой модели с классической теорией упругости, моделью среды с алгебраической пористостью, градиентной средой Тупина и градиентной дефектной средой Миндлина. Тем самым работа способствует систематизации и развитию неклассических континуальных моделей материалов с микроструктурой.

Важным результатом является построение вариационных моделей пористых стержней, позволяющих учитывать взаимодействие упругих деформаций и эволюции пористости, а также влияние масштабных параметров на поведение тонкостенных конструктивных элементов. Полученные автором разрешающие уравнения, граничные условия и частные случаи моделей могут быть использованы при дальнейшем развитии теории стержней, пластин и оболочек из пористых и композиционных материалов.

Значимость диссертации для развития отрасли науки также состоит в сочетании теоретического моделирования с экспериментальными исследованиями и численным моделированием. Автором использованы аналитические и численные методы, классическая и градиентная теория

упругости, теория дифференциальных уравнений, конечно-элементное моделирование в Ansys Workbench, а также экспериментальные методы исследования статического и динамического поведения пористых образцов. Такое сочетание методов повышает достоверность результатов и создает основу для дальнейшего развития расчетно-экспериментальных подходов к исследованию пористых материалов.

Отдельного внимания заслуживает то, что в работе исследованы динамические и диссипативные свойства пористых материалов, а также показана возможность проектирования композитов с повышенными демпфирующими свойствами. Это имеет значение для развития методов расчета материалов и конструкций, работающих в условиях вибрационного, ударного и высокоинтенсивного динамического воздействия.

Таким образом, результаты диссертационной работы вносят вклад в развитие научного направления, связанного с динамикой и прочностью материалов с микроструктурой, моделированием пористых и дефектных сред, а также расчетом конструктивных элементов, работающих в условиях сложного динамического нагружения.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

Учитывая прикладной характер диссертационной работы, полученные автором результаты могут быть рекомендованы к использованию в научно-исследовательских, проектных и образовательных организациях, занимающихся расчетом, испытаниями и проектированием конструкций из пористых, композиционных и ячеистых материалов, а именно:

- при расчетном обосновании элементов авиационных и аэрокосмических конструкций, содержащих пористые, пенополимерные, композиционные и ячеистые материалы, в том числе в качестве заполнителей трехслойных панелей, демпфирующих элементов и облегченных конструктивных компонентов;

- при разработке инженерных методик оценки динамических характеристик пористых материалов, включая определение собственных частот, амплитудно-частотных характеристик, демпфирующих свойств и реакции материала на виброударное воздействие;

- при проектировании материалов и конструкций с повышенными демпфирующими свойствами, предназначенных для эксплуатации в условиях вибрационного, ударного и импульсного нагружения. Это особенно актуально для элементов летательных аппаратов, транспортных систем, защитных панелей, виброизолирующих и энергопоглощающих конструкций;

- при построении численно-аналитических и конечно-элементных

моделей пористых конструктивных элементов, в том числе в программных комплексах инженерного анализа типа Ansys Workbench, с учетом результатов экспериментальной валидации, представленной в диссертационной работе;

— при разработке расчетных моделей тонкостенных стержневых элементов из пористых материалов, поскольку предложенные вариационные постановки позволяют учитывать не только классические деформации, но и влияние пористости, дефектности и градиентных масштабных эффектов;

— при предварительной инженерной оценке процессов высокоскоростного ударного взаимодействия пористых тел с преградами, включая задачи оценки контактного давления, характера деформирования преграды, локализации зоны вязкопластического течения и анализа нормального или косого удара;

— в учебном процессе и научно-исследовательской работе при подготовке специалистов в области теоретической механики, динамики машин, механики деформируемого твердого тела, механики композиционных материалов и численного моделирования, в частности при изучении неклассических моделей сплошных сред и задач динамики пористых материалов.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в разработке метода проведения динамических испытаний и численно-аналитического расчета динамических свойств пористых материалов; важность результатов автор связывает с возможностью более точной оценки динамических характеристик пористых материалов, используемых в авиационной и аэрокосмической промышленности.

Научная новизна работы определяется полученными результатами:

— вариационная модель обобщенных градиентных пористых сред со свободной и стесненной дилатацией;

— результаты исследований механических и динамических свойств пористых материалов при статическом и динамическом нагружении;

— предложенные приближенные оценки эффективных свойств пористых структур на основе соотношений механики композитов по объемному содержанию пустот в матрице;

— модели деформирования пористых тонких структур (стержней и пластин) с двумя параметрами масштаба (пористость-дефектность и градиентность);

— методика и результаты конечно-элементного моделирования высокоскоростного удара пористого тела о преграду.

Апробация результатов работы была проведена на российских и международных конференциях:

— Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию БелИИЖТа - БелГУТа, Гомель, 16–17 ноября 2023 года;

— Международный симпозиум им. А.Г. Горшкова «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», Кремёнки, 15–19 мая 2023 года;

— XIII международная научно-практическая конференция, посвященная Году качества, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, 21–22 ноября 2024 года;

— Международный симпозиум им. А.Г. Горшкова «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», Кремёнки, 19–23 мая 2025 года;

Публикации по теме диссертации в рецензируемых изданиях:

По теме диссертационной работы опубликовано 11 публикаций в научных изданиях, из них 3 научные работы опубликованы в издании, рекомендуемом Перечнем ВАК при Минобрнауки РФ и 3 работы в издании, индексируемом базой данных Scopus. Остальные 5 являются тезисами докладов на конференциях, в том числе международных.

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Калягин, М. Ю. Моделирование приборных отсеков летательных аппаратов пористо-смесевыми ударниками / М. Ю. Калягин // Труды МАИ. – 2018. – № 98. – С. 8. – EDN YVGDUH.

2. Калягин, М. Ю. Исследование влияния пористости на физико-механические характеристики полиимидного пенопласта / М. Ю. Калягин, Л. Н. Рабинский, С. А. Шумская // Труды МАИ. – 2024. – № 138. – EDN DHHIVK.

3. Егорова, М. С. Теория стержней (пластин), построенная для неклассических моделей пористой среды механики деформируемого тела / М. С. Егорова, М. Ю. Калягин, Л. Н. Рабинский // Труды МАИ. – 2025. – № 142. – EDN HUNGID.

Публикации в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus:

1. Babaytsev, A. V. Defect Development in Multilayer Composites under Static Loads / A. V. Babaytsev, M. Yu. Kalyagin, L. N. Rabinskiy // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44, No. 1. – P. 112-115. – DOI 10.3103/S1068798X24010064. – EDN EFLZME.

2. Rabinskiy, L. N. Numerical Estimates of the Physicomechanical Properties of Porous Composites / L. N. Rabinskiy, S. A. Shumskaya, M. Yu. Kalyagin // Russian Engineering Research. – 2025. – Vol. 45, No. 1. – P. 133-135.

– DOI 10.3103/S1068798X24703404. – EDN WHTRLJ.

3. Babaytsev, A. V. Dynamic Behavior of Materials with Different Porosity / A. V. Babaytsev, M. Yu. Kalyagin, L. N. Rabinskiy // Russian Engineering Research. – 2025. – Vol. 45, No. 4. – P. 539-541. – DOI 10.3103/S1068798X2570039X. – EDN IKEYJW.

Прочие публикации, входящие в РИНЦ:

1. Калягин, М. Ю. Исследование роста поврежденности в композиционных материалах / М. Ю. Калягин, Л. Н. Рабинский // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию БелИИЖТа - БелГУТа, Гомель, 16–17 ноября 2023 года. – Гомель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет транспорта", 2023. – С. 92-93. – EDN NMIDEL.

2. Калягин, М. Ю. Исследование особенностей разрушения композитных панелей с учётом структурной неоднородности и поврежденности / М. Ю. Калягин, Л. Н. Рабинский // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXIX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова, Кремёнки, 15–19 мая 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "ТРП", 2023. – С. 24-25. – EDN JVZGNS.

3. Калягин, М. Ю. Исследование влияния пористости на физико-механические характеристики полиимидного пенопласта / М. Ю. Калягин, Л. Н. Рабинский, С. А. Шумская // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XIII международной научно-практической конференции, посвященной Году качества. В 2-х частях, Гомель, 21–22 ноября 2024 года. – Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2024. – С. 152-153. – EDN NAKINH.

4. Егорова, М. С. Исследование влияния пористости на физико-механические характеристики / М. С. Егорова, М. Ю. Калягин, Л. Н. Рабинский // Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XIII международной научно-практической конференции, посвященной Году качества. В 2-х частях, Гомель, 21–22 ноября 2024 года. – Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2024. – С. 139-140. – EDN НТКОЕВ.

5. Егорова, М. С. Анализ вариационных моделей градиентных и дилатационных моделей с полями дефектами (порами) / М. С. Егорова, М. Ю. Калягин, Л. Н. Рабинский // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXXI Международного симпозиума имени А.Г. Горшкова, Кремёнки, 19–23 мая 2025 года. – Москва:

Структура диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 123 страницы основного текста, 27 рисунков, 5 таблиц, списка литературы из 100 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, связанная с необходимостью учета микроструктуры, пористости, дефектности и масштабных эффектов при описании поведения материалов, работающих в условиях статического, динамического и высокоинтенсивного нагружения. Автор сформулированы цель, объект и предмет исследования, указаны применяемые методы, научная новизна, практическая значимость, достоверность полученных результатов, а также сведения об апробации и публикациях по теме диссертации. Особо следует отметить, что уже во введении работа позиционируется не только как теоретическое исследование пористых сред, но и как прикладное исследование, ориентированное на задачи авиационной и аэрокосмической техники.

В первой главе рассматриваются теоретические основы описания пористых материалов как специального случая деформируемых сред со свободными, неинтегрируемыми деформациями. Автор последовательно излагает обобщенную теорию сред с полями дефектов, вводит кинематическую модель, определяющие соотношения, модель среды с полями свободных дилатаций, а также модель упругой обобщенной градиентной среды с пористостью. Существенным является то, что в главе показана связь предлагаемой модели с известными теориями: классической теорией упругости, моделью среды с алгебраической пористостью, градиентной теорией Миндлина и другими частными случаями. Тем самым первая глава формирует теоретическую базу всей диссертационной работы и задает математический аппарат, используемый в последующих разделах.

Во второй главе представлены экспериментальные исследования пористых образцов. Рассмотрены статические испытания образцов акрида различной плотности, проведено исследование их микроструктуры с использованием растровой электронной микроскопии и оптической микроскопии, а также выполнены испытания на трехточечный изгиб. Автор проведена валидация результатов на основе конечно-элементного моделирования в среде Ansys Workbench. Кроме того, в главе рассмотрены динамические испытания образцов при гармоническом воздействии с постепенно возрастающей частотой и при виброударном нагружении. Данная глава важна тем, что обеспечивает экспериментальное основание для дальнейшего построения и проверки расчетных моделей, а также

демонстрирует влияние пористости на механические и динамические свойства исследуемых материалов.

В третьей главе разработана вариационная модель пористых стержней. Автор формулирует кинематическую модель на основе гипотез Бернулли, вводит перемещения и параметр пористости, записывает работу внешних сил и потенциальную энергию деформации. Далее рассматриваются статические постановки задач растяжения и чистого изгиба, а также динамическая постановка с учетом кинетической энергии. Отдельно анализируются частные случаи: среда с алгебраической пористостью и градиентная среда по Миндлину. Достоинством главы является то, что автор не ограничивается формальной записью уравнений, а показывает структуру разрешающих уравнений, характер граничных условий и роль масштабных параметров. Это позволяет использовать полученные модели для анализа стержневых элементов из пористых материалов с учетом микроструктурных эффектов.

В четвертой главе исследуются физико-механические свойства пористых материалов. Рассматриваются оценки модулей упругости пористых материалов на основе материала с теми же эквивалентными свойствами, анализируются диссипативные свойства пористых сред, а также строятся вариационные модели стержней из пористого материала с учетом динамических и статических экспериментальных данных. Существенное внимание уделено сопоставлению классического и неклассического описания поведения пористых материалов. В главе показано, что учет связи между деформацией и изменением пористости может приводить к существенному отклонению от классического решения, что связано с возникновением дополнительных микроструктурных напряжений, локальными градиентами плотности и диссипативными процессами в поровом каркасе.

В пятой главе рассмотрено решение задачи о высокоскоростном ударе пористого тела о преграду. Автор предлагает подход к описанию процесса ударного взаимодействия головной части летательного аппарата с преградой, включая переход от реальной конструкции головной части к эквивалентному пористо-смесевому ударнику. В главе представлена математическая модель ударника, модель взаимодействия преграды и тела, основанная на теории деформации Генки–Ильюшина, схема численного решения уравнений взаимодействия методом сеток, анализ контактного взаимодействия при нормальном и косом ударе, а также численное моделирование процесса проникания в Ansys. Эта глава придает работе выраженную инженерную направленность и демонстрирует возможность применения разработанных подходов к задачам динамики и прочности элементов летательных аппаратов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Они отражают как теоретические результаты, связанные с развитием моделей пористых и градиентных сред, так и экспериментально-расчетные результаты, направленные на определение физико-механических и динамических характеристик пористых материалов. Представленные выводы логически следуют из содержания глав и подтверждают завершенность выполненного исследования.

Диссертация и автореферат написаны понятным научным языком с корректным использованием научной и технической терминологии. Содержание диссертации подробно и в полном объеме раскрывает постановку, методы, алгоритмы, процедуры и результаты решения поставленных задач. Автореферат отражает основное содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата соответствует существующим требованиям.

Текст автореферата соответствует тексту диссертации и достаточно полно отражает основное содержание диссертационной работы.

Имеется ряд замечаний, которые, однако, не относятся к основной содержательной части работы и не снижают её общего уровня:

1. В работе следовало бы более четко обозначить границы применимости предложенных моделей пористых и градиентных сред. В диссертации рассматриваются модели, учитывающие свободные неинтегрируемые дилатации, дефектность и градиентные масштабные эффекты, что является достоинством работы. Вместе с тем целесообразно было бы более подробно указать диапазоны пористости, характерные размеры пор, уровни деформаций и режимы нагружения, при которых предложенные модели могут применяться без существенной потери точности. Особенно это важно с учетом того, что рассматриваемая теория предполагает обратимые изменения пористости и линейное описание микродилатационных эффектов.

2. Недостаточно подробно раскрыта процедура идентификации неклассических материальных параметров модели. В работе введены классические, неклассические, градиентные и инерционные параметры пористой среды. В частности, динамическая постановка содержит значительное число физических постоянных, включая параметры, отвечающие за свойства непрерывной матрицы, пористой среды и их взаимодействие. Однако в диссертации было бы полезно более детально описать алгоритм их независимого экспериментального определения, а также обсудить вопросы единственности идентификации и чувствительности расчетных результатов к изменению этих параметров.

3. Экспериментальная база могла бы быть расширена за счет большего числа типов образцов и уровней пористости. В работе проведены статические и динамические испытания образцов двух плотностей — 80 кг/м^3 и 100 кг/м^3 , при этом для каждой партии использовались три однотипных образца. Полученные результаты представляют интерес и позволяют выявить влияние пористости на модуль упругости, прочность и динамический отклик материала. Вместе с тем для более надежного обоснования общих выводов желательно было бы рассмотреть более широкий диапазон плотностей, размеров пор и геометрических параметров образцов, а также привести более развернутую статистическую обработку экспериментальных данных.

4. При анализе динамических испытаний желательно было бы подробнее исследовать влияние условий закрепления образцов. Автор справедливо отмечает, что жесткость опор и характер закрепления существенно влияют на колебательные характеристики образцов. Однако в работе этот фактор мог бы быть рассмотрен более подробно: например, через отдельную расчетную модель упругого закрепления, оценку чувствительности собственных частот к жесткости заделки или сопоставление различных схем закрепления. Это особенно важно для пористых материалов, у которых динамический отклик может существенно зависеть от локальных контактных условий и способа фиксации образца.

5. Связь прикладной задачи высокоскоростного удара с разработанными ранее моделями пористой градиентной среды могла бы быть раскрыта более последовательно. Пятая глава имеет выраженную инженерную направленность и посвящена задаче высокоскоростного удара пористого тела о преграду. Вместе с тем было бы полезно более явно показать, какие именно параметры и выводы, полученные в теоретических и экспериментальных главах, используются при построении модели ударного взаимодействия. Кроме того, практическую значимость результатов усилило бы более подробное сопоставление расчетов с независимыми экспериментальными данными или известными инженерными методиками для задач нормального и косого удара.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, поскольку не затрагивают основные научные положения, выносимые на защиту, и не ставят под сомнение достоверность полученных автором результатов.

Заключение по диссертации.

Диссертация Калягина Максима Юрьевича на тему «Динамическое поведение пористых материалов под действием высокоинтенсивных нагрузок различной физической природы» является законченной научно-

квалификационной работой и соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, согласно пунктам 9-14 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями). Основное содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин в пунктах 13, 14, 15. Автор диссертации, Калягин Максим Юрьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана 21 мая 2026 г., протокол № 4.

Заслуженный деятель науки
РФ, заведующий кафедрой
«Компьютерные системы
автоматизации производства»
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
д.т.н. (01.02.06 - «Динамика
прочность машин, приборов и
аппаратуры»), профессор



подпись

ЗАВЕРЯЮ
ВЕД. СПЕЦИАЛИСТ ПО
ПЕРСОНАЛУ ОТДЕЛА
КАДРОВОГО АДМИНИСТР
УКЦИА
РУДНЕВА ИВ

Гаврюшин Сергей
Сергеевич

Контактные данные организации: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». 105005, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Басманный, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1
Телефон: +7 (499) 263 63 91
E-mail: bauman@bmstu.ru
Официальный сайт: <https://bmstu.ru>

С отзывом ознакомлен 01.06.26

М.Ю. Калягин