# ОТЗЫВ

официального оппонента Хомченко Антона Васильевича
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.

Диссертационная работа Калягина Максима Юрьевича посвящена исследованию поведения пористых материалов и включает теоретическое моделирование, экспериментальные исследования, численно-аналитические расчеты и конечно-элементное моделирование процессов ударного взаимодействия. Такая постановка задачи является актуальной как с научной, так и с прикладной точки зрения.

**Актуальность.**

В современных конструкциях авиационной и аэрокосмической техники, транспортных систем, защитных элементов и изделий специального назначения широко применяются материалы со сложной внутренней структурой. К ним относятся пористые, ячеистые, композиционные и метаматериалы, свойства которых определяются не только характеристиками исходной матрицы, но и геометрией, распределением и эволюцией внутренних дефектов и пор.

При действии динамических и ударных нагрузок такие материалы могут проявлять свойства, принципиально отличающиеся от поведения сплошных однородных тел. Они способны перераспределять энергию удара, изменять локальную жесткость, демонстрировать повышенные демпфирующие свойства, а также проявлять масштабные эффекты. Поэтому разработка расчетных моделей, позволяющих учитывать пористость, дефектность, градиентные эффекты и динамическое поведение таких материалов, представляет собой актуальную задачу механики и инженерного проектирования.

Работа Калягина М. Ю. направлена на решение именно этой задачи. Ее актуальность усиливается тем, что автор рассматривает не только теоретические аспекты построения обобщенной модели пористой среды, но и прикладные задачи динамического нагружения, включая высокоскоростной удар пористого тела о преграду.

**Научная новизна** заключается в развитии моделей пористых сред с учетом свободных дилатаций, дефектности и градиентных эффектов, а также в построении расчетных моделей тонкостенных пористых элементов и пористо-смесевых ударников. К наиболее существенным новым результатам диссертации можно отнести:

– разработку вариационной модели обобщенной градиентной пористой среды;

– построение моделей стержней и пластин из пористых материалов с учетом параметров пористости-дефектности и градиентности;

– получение приближенных оценок эффективных свойств пористых материалов;

– исследование динамических и диссипативных свойств пористых материалов на основе экспериментальных данных;

– разработку расчетной модели ударного взаимодействия пористо-смесевого ударника с преградой;



Отдел корреспонденции
и контроля исполнения
документов МАИ
«28» 05 2026г.

– применение конечно-элементного моделирования для анализа процесса проникания и оценки минимальной скорости пробития.

Данные результаты расширяют существующие методы расчета пористых материалов и позволяют учитывать особенности их поведения при высокоинтенсивном нагружении.

**Практическая значимость** диссертационной работы определяется возможностью использования полученных результатов при проектировании и расчете элементов авиационных и аэрокосмических конструкций, в которых применяются пористые, ячеистые или композиционные материалы. Предложенные подходы могут быть применены при оценке динамических характеристик материалов, выборе параметров пористости, анализе демпфирующих свойств, а также при моделировании ударного взаимодействия неоднородных тел с преградами.

Особое практическое значение имеет рассмотренная соискателем модель пористо-смесевого ударника, позволяющая заменить сложную неоднородную конструкцию расчетной моделью с эффективными характеристиками. Такой подход может быть полезен на этапах предварительного инженерного анализа, когда требуется получить оценки параметров ударного взаимодействия без построения чрезмерно детализированной модели объекта.

**Обоснованность научных положений и выводов.**

Диссертация имеет логичную структуру и состоит из пяти глав, каждая из которых решает самостоятельную часть общей задачи.

**Структура диссертации** состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников (100 наименований). Общий объем работы составляет 123 страницы.

**Во введении** представлены цели и задачи исследования, обоснованы актуальность темы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены аргументы в пользу их достоверности. Также дана характеристика структуры и объема диссертации, перечислены публикации автора по теме работы и приведен перечень научных конференций, на которых докладывались и обсуждались основные результаты исследования.

**В первой главе** автор рассматривает теорию пористых материалов как специальный случай деформируемых сред со свободными неинтегрируемыми деформациями. Введены основные кинематические соотношения, определяющие уравнения, а также рассмотрена модель упругой обобщенной градиентной среды с пористостью. Данная глава формирует теоретическую основу последующих построений.

**Во второй главе** представлены экспериментальные исследования пористых образцов. Рассмотрены статические и динамические испытания, методы определения характеристик материала, а также вопросы валидации результатов. Наличие экспериментальной части является важным достоинством диссертации, поскольку позволяет связать построенные модели с реальными характеристиками пористого материала.

**Третья глава** посвящена вариационной модели пористых стержней. Автор последовательно формулирует кинематическую модель, выражения для работы внешних сил и потенциальной энергии, рассматривает статические задачи растяжения и изгиба, а

также динамическую постановку. Эта часть работы представляет интерес для расчета тонкостенных элементов из пористых материалов.

**В четвертой главе** исследуются физико-механические свойства пористых материалов. Автор рассматривает оценки модулей упругости, диссипативные свойства пористых сред, а также вариационные модели стержней с учетом статических и динамических экспериментальных данных. Выводы данной главы имеют прикладное значение, поскольку позволяют использовать результаты исследования для расчетной оценки свойств конкретных материалов.

**В пятой главе** рассматривается задача высокоскоростного удара пористого тела о преграду. Автор предлагает подход к приведению реальной неоднородной конструкции к модели пористо-смесевого ударника, рассматривает нормальный и косой удар, дает схему численного решения и выполняет конечно-элементное моделирование процесса проникания в Ansys. Эта часть диссертации является наиболее прикладной и ориентирована на инженерное использование полученных результатов.

**В заключении** приведено последовательное изложение основных научных результатов, полученных в ходе проведенного исследования, с акцентом на их теоретическую и прикладную значимость.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается применением известных и апробированных методов механики деформируемого твердого тела, градиентной теории упругости, теории колебаний, вариационных методов, численных методов и конечно-элементного анализа. Автор использует современные программные комплексы для моделирования и проводит экспериментальные исследования с применением специализированного оборудования.

Следует отметить, что в работе выполнено сопоставление результатов расчетов и моделирования, а также проведена проверка отдельных результатов на экспериментальных данных. В частности, для задач статического и динамического поведения пористых образцов показано согласование расчетных и экспериментальных результатов. Для задачи ударного взаимодействия рассмотрено сопоставление расчетной модели с результатами конечно-элементного моделирования.

Это позволяет считать основные выводы диссертации достоверными в пределах принятых допущений и рассмотренных диапазонов параметров.

**Оценка автореферата и публикаций.**

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные положения автореферата соответствуют содержанию диссертационной работы.

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, включая 3 статьи в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ (категория К1), а также 3 статьи в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах данных (МСЦ) и приравненных к категории К1. Основные результаты исследования прошли апробацию на ряде международных симпозиумов и научно-практических конференций.

**Замечания по диссертации и автореферату.**

1. В работе желательно подробнее описать процедуру выбора параметров конечно-элементной модели при моделировании высокоскоростного удара, включая влияние размера сетки, типа элементов и параметров контактного взаимодействия на результат.

2. При анализе минимальной скорости пробития целесообразно привести более подробное исследование чувствительности результатов к параметрам материала преграды и ударника, особенно к параметрам модели пластического поведения.

3. Рассмотрение косого удара является важным достоинством работы, однако диапазоны углов, скоростей и геометрических параметров, при которых предложенная модель дает надежные результаты, могли бы быть обозначены более явно.

4. В экспериментальной части работы следовало бы подробнее раскрыть влияние условий закрепления образцов на измеряемые динамические характеристики, поскольку для пористых материалов этот фактор может существенно влиять на форму колебаний и значения собственных частот.

5. В работе используется значительное число расчетных параметров, связанных с пористостью, градиентностью и дефектностью. Для инженерного применения было бы полезно дополнительно представить пошаговую методику их определения по результатам стандартных испытаний.

Содержание автореферата полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

**Заключение.**

Диссертация Калягина Максима Юрьевича «Динамическое поведение пористых материалов под действием высокоинтенсивных нагрузок различной физической природы» является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей новые научные результаты в области моделирования и исследования динамического поведения пористых материалов и конструкций. Работа соответствует паспорту специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин, обладает научной новизной, достоверностью и практической значимостью. Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает ее основные результаты.

Представленная диссертационная работа **соответствует** критериям и требованиям, установленным в пунктах 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями), а ее автор Калягин Максим Юрьевич, **заслуживает** присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

**Официальный оппонент:**

Кандидат технических наук,

Начальник отдела нагрузок и аэроупругости

управления прочности ООО «АУРУС-АЭРО» А. В. Хомченко

22.05.26

Научная специальность, по которой защищена диссертация:

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Подпись Хомченко Антона Васильевича удостоверяю:

Генеральный директор

ООО «АУРУС-АЭРО» А. В. Степин

Полное наименование организации:

Общество с ограниченной ответственностью «АУРУС-АЭРО».

Юридический адрес: Индустриальный пр-д, зд. 15, стр. 1, тер. портовая особая экономическая зона, Мирновское с.п., Чердаклинский м.р-н, Ульяновская обл., Российская Федерация, 433405.

Адрес места работы: 125315, г. Москва, Ленинградский просп., 72, корп. 3.

Телефон: нет. E-mail: office@aurus-aero.ru

С отзывом ознакомлен 01.06.26 М.О Казан