

Отзыв

официального оппонента о диссертации
Ляжкова Сергея Дмитриевича
на тему «**Влияние граничных условий и нелинейных эффектов на перенос и перераспределение энергии в дискретных средах**»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твёрдого тела

Актуальность темы. Диссертационная работа Ляжкова С.Д. посвящена аналитическому описанию нестационарных волновых процессов переноса и перераспределения энергии в дискретных средах с учётом влияния граничных условий и нелинейных эффектов. Данная проблема приобретает особую важность в связи с развитием технологий производства бездефектных материалов и метаматериалов, а также с необходимостью решения задач эффективного отвода тепловой энергии в микроэлектронике. Особое значение имеют процессы, происходящие вблизи границ (свободных либо подверженных силовому или кинематическому воздействию), и при описании данных процессов классические континуальные модели механики сплошных сред демонстрируют наибольшие расхождения. В частности, при низких температурах в диэлектриках и при быстрых неравновесных воздействиях наблюдаются существенные отклонения от классического закона теплопроводности Фурье, а также возникновение неравновесных состояний, требующих введения нескольких температур. Таким образом, развитие методов, явно учитывающих влияние граничных условий и нелинейных эффектов на перенос и перераспределение энергии в дискретных средах, представляет собой одну из актуальных задач современной механики деформируемого твёрдого тела.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка использованной литературы. Объём диссертации составляет 209 страниц машинописного текста (в том числе 54 рисунка). Список литературы содержит 311 источников.

Во введении обоснована актуальность работы, раскрыты научная новизна и практическая значимость работы, а также основные положения, выносимые на защиту. Определены основные направления исследования, и приведены литературные источники, на которых базировалась работа автора. Сформулирована цель диссертационной работы — развитие подходов к

аналитическому описанию термомеханических процессов в кристаллических твёрдых телах с использованием дискретного моделирования. В рамках этой чрезвычайно широкой темы автор выделяет три ключевые задачи, соответствующие главам работы.

Первая глава посвящена переносу энергии в полубесконечной линейной цепочке со свободной границей. Развита методика, позволяющая в линейном приближении описать упругое деформирование кристаллических твёрдых тел с учётом свободного конца. Получено точное дискретное решение для кинетической энергии при заданном начальном её распределении, а также при стохастическом подводе энергии. Выведены континуальные приближения (симметричное, континуальное и дискретно-континуальное) с использованием метода стационарной фазы. Показано, что при импульсном воздействии поле кинетической энергии вблизи границы затухает быстрее, чем в бесконечной цепочке, а при подводе энергии – перестаёт расти вблизи границы при отсутствии вязкого трения.

Во второй главе рассматривается подвод энергии в полубесконечную цепочку при силовом и кинематическом нагружении на границе. Получены точные и приближённые решения для линейной и слабонелинейной цепочек. Выведены формулы для полной энергии, закачиваемой в цепочку на больших временах, в том числе при нагружении на частотах в полосе непропускания. Важно отметить развитие подхода к получению приближённого нестационарного решения задачи динамики дискретных сред, находящихся под внешним периодическим воздействием.

Третья глава посвящена влиянию нелинейности на перераспределение энергии между степенями свободы в упругих твёрдых телах. В качестве объектов исследования рассмотрены цепочка масса-в-массе и гранецентрированная кубическая (ГЦК) решётка. Показано различие кинетических энергий при любой степени нелинейности, и получена аппроксимационная формула для масштаба времени выравнивания энергий в ГЦК решётке.

В заключении сформулированы основные выводы работы и перспективы дальнейшего исследования.

Оформление диссертации. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям (ГОСТ Р 7.0.11-2011). Структура диссертации выстроена логично и последовательно.

Работа написана грамотным научным языком. Содержание **автореферата** полностью соответствует тексту диссертации.

Все основные результаты диссертационной работы полно и подробно опубликованы в ведущих российских и международных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ. По теме работы опубликовано 5 статей, входящих в базы цитирования WoS/Scopus, РИНЦ или издания, рекомендованные ВАК России. По результатам работы получена апробация на престижных конференциях и семинарах. Результаты докладывались соискателем на нескольких десятках международных и всероссийских научных конференций по научной специальности диссертации. Выполнение работы было поддержано грантами РФФИ и РФФИ.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация полностью соответствует паспорту научной специальности 1.1.8 — Механика деформируемого твёрдого тела, а именно:

6. Микромеханика, наномеханика, механика дискретных сред.

8. Динамика деформируемого твёрдого тела. Теория волновых процессов в средах различной структуры.

11. Математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях.

Основные положения диссертационного исследования достаточно полно опубликованы в открытой печати и апробированы на многих семинарах и конференциях.

По диссертационной работе имеются **замечания**:

1. В пп. 1.1.4 и 1.2.3 переход от дискретного решения к континуальному проводится через осреднение с условиями $\Delta N \gg 1$ и $a\Delta N/A \rightarrow 0$. Однако количественные оценки погрешности аппроксимации для профилей начальной энергии с разрывами первой производной (например, ступенчатое возмущение) не приведены.

2. Термин «полоса непропускания» вводится операционально (п. 2.1.3 на с. 91), без предварительного формального определения на уровне постановки задачи. Используется один и тот же термин для двух несколько различающихся физических механизмов, не акцентируя внимание на этом различии и не проводя смысловой границы, что нарушает методологическую

последовательность изложения. Указанное замечание носит терминологический и методологический характер и не затрагивает корректность математических выкладок и результатов.

3. В п. 1.1.5 описано аномально быстрое затухание кинетической энергии у свободной границы ($\sim t^{-3}$), которое интерпретируется как крайне интересное и описанное относительно недавно явление антилокализации отражённой волны. Автор ограничивается достаточно скупым указанием на обнаружение антилокализации без пояснений механизма формирования явления в данном случае и анализа решения (например, с явным выделением вклада мод, чьи узловые поверхности смещены к границе, что позволило бы обосновать подавление компонент и строго обосновать эффект антилокализации).

4. В разделе 1.2 стохастическое воздействие задаётся некоррелированным белым шумом, но при этом не обсуждается рассмотрение модели цветного шума (например, Уленбека–Орнштейна) для моделирования таких термических воздействий как лазерные импульсы или контактный нагрев.

5. Согласно результатам, проиллюстрированным рис. 2.11 и 2.17, пренебрежение взаимодействиями высших порядков приводит к систематическому смещению предсказанной критической частоты Ω_{cr} . Целесообразным видится численное или полуаналитическое определение области достоверности параметра нелинейности $\beta F_0^2/c^3 < \delta_{cr}$, за пределами которой квазилинейная модель теряет предсказательную силу, либо ввести эмпирический поправочный множитель.

6. В диссертации используется усреднение по $10^4 - 10^5$ реализациям и симплектические методы интегрирования, при этом систематический численный анализ сходимости по шагу интегрирования, размеру системы и числу реализаций не приведен. Несмотря на хорошее визуальное совпадение с дискретным решением, отсутствие оценок дисперсии вычисляемых величин затрудняет количественную оценку надёжности численных результатов, особенно в окрестности особенностей.

Имеется небольшое количество мелких опечаток и погрешностей в оформлении, но в целом работа выполнена аккуратно и наглядно. Указанные замечания не затрагивают основных результатов и не снижают моего общего очень высокого мнения о диссертационной работе.

Заключение. Диссертация Ляжкова Сергея Дмитриевича на тему «Влияние граничных условий и нелинейных эффектов на перенос и

перераспределение энергии в дискретных средах» выполнена на высоком научном уровне, представляет собой самостоятельную, законченную научно-квалификационную работу, отвечает требованиям ВАК «Положения о присуждении учёных степеней» п.9, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор С.Д. Ляжков заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 — Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент

Голуб Михаил Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор
(специальность 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела)

заведующий кафедрой теории функций
факультета математики и компьютерных наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет»
Адрес: 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149, ФГБОУ ВО «КубГУ»
Тел.: +7 (861) 219-95-01*281
e-mail: m_golub@inbox.ru

09 апреля 2026 г.

Я, Голуб Михаил Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

