



Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

Ульянова ул., 46, Нижний Новгород, 603951

Тел. (831) 436-62-02

Факс (831) 416-06-16

E-mail: dir@ipfran.ru

www.ipfran.ru

ОКПО 04683326, ОГРН 1025203020193,
ИНН/ КПП 5260003387/526001001

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального
государственного бюджетного
научного учреждения
«Федеральный
исследовательский центр
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова – Грехова
Российской академии наук»,
академик РАН, доктор физико-
математических наук



Денисов Г.Г.

«23» марта 2026 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
на диссертационную работу Ляжкова Сергея Дмитриевича
«Влияние граничных условий и нелинейных эффектов на
перенос и перераспределение энергии в дискретных средах»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.8 — Механика деформируемого твёрдого тела**

1. Актуальность темы диссертации

Современные достижения в области получения сверхчистых монокристаллических материалов и метаматериалов с уникальными термомеханическими характеристиками обуславливают повышенный интерес к углубленному изучению динамических процессов, происходящих в данных материалах. Особенно важным является исследование нестационарных волновых явлений в монокристаллах, поскольку оно играет ключевую роль в решении задачи, связанной с эффективным отводом тепловой энергии в микро- и наноэлектронных устройствах. Описание этих процессов осуществляется с помощью как дискретных, так и континуальных моделей механики деформируемого твёрдого тела. В то же

время дискретные модели дают возможность получить дополнительную информацию о явлениях, для которых при макроскопическом описании с помощью классической механики сплошных сред требуется обоснованный выбор соответствующих уравнений, что зачастую бывает весьма сложной задачей. Особый интерес представляют процессы, происходящие вблизи границ, поскольку в экспериментах по переносу тепловой энергии обычно осуществляются измерения или прикладываются внешние воздействия именно на границах (или вблизи их). Кроме того, при моделировании термомеханических процессов вне условий теплового равновесия зачастую приходится вводить несколько температур, соответствующих различным степеням свободы.

В связи с вышеизложенным темой диссертационной работы Ляжкова С.Д., посвящённой исследованию переноса и перераспределения энергии в дискретных средах с учётом влияния граничных условий и нелинейных эффектов, следует считать актуальной с точки зрения как фундаментальных, так и прикладных аспектов.

2. Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 209 страницах, содержит 54 рисунка. Библиография включает 311 наименований.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, достоверность, вклад автора, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе решается задача о влиянии свободной границы на перенос энергии в твёрдых телах. В качестве модели деформируемого твёрдого тела используется полубесконечная линейная цепочка, состоящая из одинаковых частиц, соединённых линейными пружинками и имеющая один свободный конец. Рассматриваются случаи заданного начального распределения кинетической энергии и стохастического подвода энергии. Получены аналитические решения в континуальном приближении, показывающие, что любое начальное распределение энергии затухает вблизи границы на больших временах быстрее, чем в бесконечной цепочке.

Во второй главе решается задача о подводе энергии в полубесконечную цепочку Ферми-Паста-Улама-Цингу при периодическом нагружении на границе. Рассматриваются силовое и кинематическое граничные условия. Получены приближённые выражения для полной энергии, закачиваемой в слабонелинейную цепочку на больших временах, в том числе при нагружении на частоте в полосе непропускания линейной

цепочки.

В третьей главе рассматривается перенос и перераспределение кинетических энергий, соответствующих различным степеням свободы, в цепочке «масса-в-массе» и гранецентрированной кубической решётке. Показано, что в нелинейной цепочке «масса-в-массе» кинетические энергии, соответствующие цепочке и прикрепленным осцилляторам, могут различаться в процессе затухания. Для гранецентрированной кубической решётки получена формула, аппроксимирующая зависимость масштаба времени выравнивания кинетических энергий от начальной энергии.

В заключении сформулированы основные результаты исследования и обсуждаются перспективы дальнейшего исследования.

Приведённые выводы обоснованы полученными в диссертации аналитическими и численными результатами. Все выводы подтверждены расчётами, апробированы и опубликованы.

3. Научная новизна проведённых исследований и полученных результатов

Научная новизна работы определяется полученными результатами.

Среди результатов, полученных при выполнении работы, новыми являются следующие:

— Получено аналитическое решение, описывающее перенос энергии упругими волнами в полубесконечной линейной цепочке со свободной границей при стохастическом воздействии в континуальном приближении. Показано, что при воздействии в виде белого шума математическое ожидание кинетической энергии частиц вблизи границы изменяется во времени иначе, чем частиц вдали от границы;

— Впервые получены приближённые формулы для полной энергии, закачиваемой в слабонелинейную полубесконечную цепочку при силовом и кинематическом граничных условиях на больших временах, в том числе при нагружении на частоте в полосе непропускания линейной цепочки;

— Получена формула, аппроксимирующая зависимость масштаба времени выравнивания кинетических энергий, соответствующих различным пространственным направлениям, от начальной энергии в нелинейной гранецентрированной кубической решётке.

4. Оценка теоретической и практической значимости результатов

Работа имеет теоретический характер.

Теоретическая значимость диссертации связана с возможностью использования результатов для построения определяющих соотношений для многокомпонентных моделей механики сплошных сред, описывающих поведение кристаллических твёрдых тел в неравновесных условиях, в

частности, при лазерном воздействии, а также открывают возможности для корректной постановки задач термоупругости в идеальных кристаллических структурах, свободных от дефектов и примесей.

Практическая значимость диссертационной работы связана с возможностью использования аналитических результатов для построения моделей, описывающих нестационарные эксперименты по переносу тепловой энергии на микро- и наноуровне с целью корректной интерпретации экспериментальных данных по тепловым свойствам бездефектных материалов, а также для создания устройств управления тепловой энергией на микро- и наноуровне (тепловые диоды и тепловые транзисторы). Результаты диссертации могут найти применение в Институте химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН, Институте физики микроструктур РАН – филиале Федерального исследовательского центра Института прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова РАН. Кроме того, они могут быть применены при совершенствовании моделей динамики технических систем, таких как бурильные колонны, валопроводы и подвижные составы, а также при моделировании динамики стержневых конструкций путём установления соответствующих аналогий с дискретными моделями.

5. Обоснованность и достоверность результатов диссертации

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов обеспечена строгой математической постановкой задач, применением математически обоснованных методов решения, сравнением аналитических результатов с результатами численного моделирования, а также сопоставлением некоторых из полученных результатов с ранее опубликованными в литературе.

6. Публикации и соответствие автореферата диссертационной работе

Диссертация соответствует специальности 1.1.8 — Механика деформируемого твёрдого тела по следующим пунктам:

- пункт 1 «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых»;
- пункт 6 «Микромеханика, наномеханика, механика дискретных сред»;
- пункт 8 «Динамика деформируемого твёрдого тела. Теория волновых процессов в средах различной структуры»;
- пункт 11 «Математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях».

Основное содержание диссертационной работы, её главные результаты в полной мере отражены в 5 статьях, опубликованных в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, причем все эти издания индексируются в Scopus и Web of Science. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

7. Замечания по тексту диссертации и автореферату

1) На стр. 10 диссертации в пункте «Теоретическая и практическая значимость диссертации» сказано: «Представленные в ней результаты могут быть использованы для ... теоретического описания нестационарного эксперимента на основе метода transient thermal grating (TTG). Результаты также могут способствовать развитию теории переноса тепловой энергии на наноуровне...». Здесь, во-первых, было бы уместно дать перевод на русский метода TTG. Во-вторых, раз уж речь зашла о переносе тепловой энергии, целесообразно в диссертации подробно объяснить, как можно аналитически связать тепловую энергию с колебаниями частиц рассматриваемых решеток. Например, известно, что для идеального газа связь средней кинетической энергии одной частицы $\langle E_k \rangle$ и абсолютной температуры T задаётся формулой: $\langle E_k \rangle = 1.5kT$, где k — постоянная Больцмана ($k \approx 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К). А какое соотношение справедливо для рассматриваемых в диссертации сред?

2) Механическая модель дискретной среды, представленная на рисунке 1.1. содержит только упругие и инерционные элементы и не содержит демпфирующих элементов. Откуда же в эквивалентной ей математической модели появляются слагаемые, описывающие вязкое трение? Это остается загадкой.

3) Подпись к рисунку 1.3 на стр. 33 диссертации: «Зависимость функции $\text{sinc}(\Delta\theta\Delta N)$ ». Так говорить – это перебор, поскольку функция уже сама по себе является зависимостью одной величины от другой.

4) В подписи к рисунку 2.13 «Зависимости скорости закачки энергии в полубесконечную цепочку при кинематическом нагружении» не сказано, от какой величины зависят эти скорости.

5) П. 3.2.1 диссертации: «Каждая частица взаимодействует с 12 ближайшими соседями». К сожалению, отсутствует рисунок, иллюстрирующий, взаимодействия между какими именно частицами учитываются автором диссертации.

6) В диссертации рассмотрены одномерные и трехмерная решетки частиц. Было бы логично и интересно исследовать и двумерную решетку, моделирующую тонкие пленки из наночастиц.

8. Заключение

Приведённые замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Важным итогом работы представляется выявление и физическое объяснение ряда новых эффектов, связанных с влиянием граничных условий и нелинейности на перенос и перераспределение энергии в дискретных средах. Можно также отметить высокое качество постановки задач, строгость аналитических решений и ориентированность работы на практические приложения.

В целом диссертационная работа Ляжкова Сергея Дмитриевича «Влияние граничных условий и нелинейных эффектов на перенос и перераспределение энергии в дискретных средах» представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне, и соответствует квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертационным работам; соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 года (в редакции от 18.03.2023 года), а её автор, Ляжков Сергей Дмитриевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 — Механика деформируемого твёрдого тела.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании научного семинара Института проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН) – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук» 23 марта 2026 г. (Протокол № 1-дисс).

Директор Института проблем машиностроения РАН
(ИПМ РАН) – филиала ФГБНУ
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова–Грехова
Российской академии наук»,
доктор физико-математических наук
(специальность: 1.1.8 – Механика деформируемого тела),
профессор



Ерофеев Владимир Иванович

23.03.2026г.

Заместитель директора ИПМ РАН по научной работе, ведущий научный сотрудник лаборатории волновой динамики и экспериментальной механики,

доктор физико-математических наук

(специальность: 1.1.8 – Механика деформируемого тела),

доцент



Павлов Игорь Сергеевич

23.03.2026

Контактные данные организации: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН),

603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46,

+7 (831)436-62-02,

dir@ipfran.ru

<http://ipfran.ru/>