

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Наумова Евгения Константиновича «Делокализованные нелинейные колебательные моды и дискретные бризеры в квадратных решетках», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Актуальность. Изучение нелинейных эффектов в модельных и кристаллических решетках, которые существенно сказываются на их свойствах, активно проводится на протяжении последних десятилетий. Одним из важных феноменов, открытых Долговым в 1986 году, является существование в нелинейных решетках дискретных бризеров (ДБ), представляющих собой локализованные на небольшой группе частиц (атомов) колебания большой амплитуды с основной частотой, лежащей вне фононного спектра решетки. ДБ важны в физике конденсированного состояния, поскольку они способны осуществлять транспорт энергии в концентрированной форме, вносить вклад в рассеяние фононов, в теплоемкость и тепловое расширение решетки. Многие важные свойства ДБ были установлены из анализа одномерных нелинейных цепочек, однако с повышением размерности решетки возникают новые интересные особенности ДБ, важные для изучения. Межатомные взаимодействия в металлах и ионных кристаллах могут простираются на несколько координационных сфер, что делает важным учет дальнего действия. Таким образом, задача поиска новых типов ДБ в квадратной решетке с учетом дальнедействующих взаимодействий, решаемая в представленной диссертации, является актуальной и важной.

Структура и содержание работы. Диссертация Наумова Е.К. объемом 101 стр. включает введение, четыре главы, три из которых содержат оригинальные результаты, заключение и список литературы из 167 наименований.

Во введении описана изучаемая проблема, обоснована актуальность данного исследования, проанализирована степень разработанности и указаны нерешенные задачи, сформулирована цель исследования и задачи, решение которых привело к достижению поставленной цели, выдвинуто четыре пункта научной новизны полученных результатов, представлены теоретическая и практическая значимость работы, сформулировано пять положений, выносимых на защиту, обоснована достоверность результатов, даны сведения об апробации работы, личном вкладе автора, о числе и

Бюджетный ИПСМ
№ 43
от 05.09.2025г

качестве опубликованных соискателем статей, о поддержке работы грантами Российского научного фонда, о структуре и объеме диссертации.

Первая глава посвящена обзору работ по нелинейной динамике решетки, даны основные определения изучаемых объектов – ДБ и делокализованных нелинейных колебательных мод (ДНКМ). Указано на тесную связь между ДБ и ДНКМ; говорится о важности учета дальнего действия между частицами решетки, поскольку они реализуются в кристаллах с металлической и ионной связью. Описан эффект супратрансмиссии, состоящий в возбуждении ДБ в нелинейной решетке при внешнем периодическом воздействии достаточно большой амплитуды на частоте вне фононного спектра. Описаны однокомпонентные ДНКМ квадратной решетки, полученные Рябовым и Чечиным, свойства которых изучаются в диссертации. Дана математическая формулировка модели квадратной решетки с учетом взаимодействий в первых четырех координационных сферах, которые описываются классическим нелинейным потенциалом β -Ферми-Паста-Улама-Цингу (β -ФПУЦ).

Во второй главе исследуются свойства ДНКМ квадратной решетки. Выписаны гамильтониан и уравнения движения с учетом взаимодействия частиц до четвертой координационной сферы. Уравнения движения линеаризуются и выводится дисперсионное соотношение для линейных волн, из которого находится выражение для максимальной частоты фононного спектра. Далее получены аналитические выражения для частот фононов в высокосимметричных точках на границе первой зоны Бриллюэна. Анализ этих выражений позволил выявить те ДНКМ, частоты которых лежат выше фононного спектра при определенных соотношениях жесткостей связей между частицами. Далее, в приближении кубической нелинейности, для этих ДНКМ находятся амплитудно-частотные характеристики и сравниваются с точными, полученными численно. Основным результатом второй главы является вывод условий, накладываемых на жесткости связей между частицами, при которых те или иные ДНКМ имеют частоту выше фононного спектра. Такие ДНКМ являются основой для поиска ДБ в четвертой главе.

Третья глава посвящена изучению супратрансмиссии, то есть передаче энергии решетке от частиц, совершающих вынужденные колебания на частоте выше фононного спектра или вблизи его границы. Рассмотрено два вида внешнего воздействия, в первом вынужденные колебания совершает пара соседних частиц, а во втором – ряд частиц. Для первого случая, как функция амплитуды внешнего воздействия, найдена граница частоты внешнего воздействия, выше которой энергия перестает поступать в решетку. Показано, что при воздействии на частотах несколько ниже данной

границы пара частиц, совершающих вынужденные колебания, испускает ДБ квазипериодически, а при более низких частотах выше фононного спектра – хаотически. Для второго случая установлено, что ДБ могут генерироваться на частотах внешнего воздействия внутри фононного спектра, близко к его верхнему краю.

В четвертой главе автор описывает различные семейства ДБ в квадратной решетке с дальнодействием. ДБ получены путем наложения функций локализации на ДНКМ, имеющие частоты выше фононного спектра. Варьируя положение центра локализации представлены ДБ Сиверса-Такено и Пейджа. Показано существование одномерного ДБ осциллирующего около минимума потенциала Пайерлса-Набарро, либо движущегося, периодически преодолевая данный потенциал.

В рамках работы получен целый ряд **новых и актуальных результатов** о ДНКМ и ДБ в квадратных решетках с дальнодействием. Среди них выделим следующие:

- описаны свойства ДНКМ (амплитудно-частотные характеристики, волновые векторы, тип нелинейности), частоты которых, при определенных значениях жесткостей связей, могут лежать выше фононного спектра;
- доказано, что учет дальнодействия приводит к существованию новых типов ДБ, которые невозможны в квадратной решетке со взаимодействиями лишь в первых двух координационных сферах;
- на основании численного моделирования установлено, что ДБ могут возбуждаться в квадратной решетке при периодическом внешнем воздействии на частоте внутри фононного спектра, близко к его верхнему краю.

Достоверность результатов исследования и обоснованность научных положений и выводов обеспечена грамотной постановкой цели и задач, системным характером проведения исследования, применением современных теоретических методов физики конденсированного состояния, использованием известных аналитических методов анализа линейных и нелинейных уравнений движения частиц, проверкой аналитических результатов с помощью численного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость результатов не вызывает сомнений, она состоит в установлении новых нелинейных эффектов, связанных с учетом дальнодействия в квадратной решетке. Полученные в работе результаты могут быть использованы для анализа других решеток с дальнодействующими взаимодействиями, что важно для физики кристаллов с ионной или металлической связью.

Оформление диссертации. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Структура диссертации выстроена логично и последовательно. Работа написана грамотным научным языком. Содержание **автореферата** полностью соответствует тексту диссертации.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация полностью соответствует паспорту научной специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Все основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих международных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ и проиндексированных в международных базах Web of Science и Scopus. По теме работы опубликовано 6 статей, в том числе 3 статьи в журналах первого квартиля.

По диссертационной работе можно сформулировать следующие вопросы и **замечания**:

1. Изучаемая модель квадратной решетки описывается в конце первой обзорной главы. Считаю, что более уместно было бы привести описание модели в начале второй главы, где излагаются оригинальные результаты автора.
2. В работе рассмотрен лишь случай взаимодействий между частицами с жестким типом нелинейности. Чем обусловлен такой выбор?
3. Согласно формулам (2.26), (2.30) частота ДНКМ зависит от амплитуды даже при равенстве нулю нелинейных коэффициентов β . Можно ли объяснить данную зависимость наличием в системе геометрической нелинейности? Анализировался ли вклад геометрической нелинейности в возникновение ДБ?
4. На рисунках 3.5 (в) и 3.6 (в) в результатах моделирования отсутствует симметрия, которая имеет место в уравнениях, начальных и граничных условиях. В чем причина такой асимметрии? Исследовалось ли влияние на асимметрию величины шага по времени?
5. С чем связана высокочастотная составляющая в ДБ, изображенных на рисунках 4.6, 4.7? Почему амплитуда БД на рис. 4.7 убывает со временем?

Сделанные замечания имеют характер пожеланий, не снижают **общее положительное впечатление от работы** и не ставят под сомнение ее актуальность, новизну и научную значимость.

Заключение. Диссертационная работа Наумова Е.К. является завершенным научным исследованием, выполненным на актуальную тему,

вносящим заметный вклад в изучение нелинейной динамики решетки, с учетом новизны и практической значимости полученных результатов. Все основные результаты и выводы диссертационной работы отражены в автореферате. Имеется достаточное количество публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus. Выносимые на защиту положения, новизна и выводы тщательно проработаны и обоснованы. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям (пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013г. № 842), а ее автор, Наумов Евгений Константинович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник
лаборатории Дискретные модели механики,
доктор физико-математических наук
по специальности
01.02.04 – Механика деформируе
твёрдого тела

Кузькин Виталий Андреевич
1 сентября 2025 г.



Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)

Адрес: 199178, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., д. 61.

Телефон: +7 (812) 321-47-78, сайт: <https://ipme.ru>, e-mail: ipmash@ipme.ru

E-mail оппонента: kuzkinva@gmail.com



доверяю.

ИПМаш РАН

А. Томазанов
04.09.2025