

## **РЕЦЕНЗИЯ**

на выпускную квалификационную работу магистра

### **НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДИСКРЕТНЫХ И КОНТИНУАЛЬНЫХ СРЕДАХ**

выполненную студенткой гр. 5040103/20101

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Труновой Иоанной Николаевной

#### **Актуальность работы**

В выпускной квалификационной работе «Нестационарные волновые процессы в дискретных и континуальных средах» И.Н. Труновой рассматриваются две задачи о волновом распространении энергии. Первая задача состоит в исследовании закономерностей баллистической термоупругости в нелинейных цепочках и развивает результаты, ранее полученные В.А. Кузькиным для синусоидального начального температурного поля. Вторая задача посвящена описанию эволюции волнового пакета при движении в многомерной простой скалярной решетке на основе методов энергетической динамики, предложенных А.М. Кривцовым. Актуальность работы связана с появлением в последнее время реальных особо чистых наноматериалов, распространение тепловой энергии в которых не подчиняется закону Фурье, а имеет волновой характер. Такие материалы могут использоваться для отвода тепла, например, в микроэлектронике.

#### **Характеристика работы**

Работа И.Н. Труновой имеет теоретический характер и состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы и приложений. Во введениях к главам подчеркивается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы, обсуждаются теоретическая и практическая значимость, приводятся аргументы в пользу достоверности результатов работы.

Результаты работы изложены в двух главах. Первая из них посвящена баллистической термоупругости нелинейных цепочек. Развивается аналитическое описание макроскопического теплового расширения в случае теплового удара для одномерной системы, в которой реализуется баллистический режим теплопроводности. Получено общее решение, позволяющее найти поля перемещений и деформаций, возникающих

вследствие теплового расширения, для произвольного начального профиля кинетической температуры. Рассматривается несколько примеров начальных температурных возмущений.

Вторая задача посвящена описанию движения локализованного возмущения в многомерной среде на основе методов энергетической динамики. Такой подход позволяет получить представление о поведении локализованной волны без точного решения уравнения движения среды (волнового уравнения). Для этого вводятся и анализируются глобальные энергетические характеристики, которые дают возможность описать перемещение и эволюцию возмущения в целом, не прибегая к точному решению уравнения динамики среды. Предлагается способ для описания изменения его формы и размеров во времени. Задача решается для непрерывной и для дискретной среды.

Все аналитические выводы, полученные в главах работы, подтверждаются результатами численного моделирования. В заключении сформулированы основные результаты магистерской диссертации.

Выполненная работа полностью соответствует заданию на выполнение выпускной квалификационной работы. Материал изложен понятно и достаточно подробно, выводы являются обоснованными. Полученные результаты дают качественное понимание закономерностей рассмотренных волновых процессов.

### **Замечания и вопросы по работе**

1. При моделировании распространения тепловых колебаний в системах со слабой нелинейностью в работе используется мгновенная ударная начальная термализация цепи (1.3) при которой атомы цепи в начальный момент времени все остаются в положении равновесия. Как изменятся результаты моделирования, если использовать более реалистичскую “равномерную” начальную термализацию, при которой в равной степени термализуются скорости и смещения частиц? Этого можно добиться, если для начальной термализации использовать термостат Ланжевена (см. напр. [1]). Сохранится ли тогда эффект “баллистического резонанса” (параграф 1.5.1, рис. 1.8), или он является артефактом используемого способа начальной ударной термализации?
2. Моделирование в работе проводится в рамках классической механики, при которой все фононы одинаково термализованны независимо от их частоты. С другой стороны все экспериментально наблюдаемые аномальные распространения тепла происходят при очень низких температурах, когда для фононов необходимо учитывать статистику Бозе-Эйнштейна (частичную

термализацию высокочастотных фононов). Например, без учета этой статистики невозможно объяснить экспериментально наблюдаемый второй звук в графене [2]. Как измениться теория баллистической термоупругости если при моделировании использовать начальную термализацию, учитывающую для фононов статистику Бозе-Эйнштейна (т.е. если учесть квантовый эффект вымораживания высокочастотных колебаний)?

[1] O. V. Gendelman and A. V. Savin. Nonstationary heat conduction in one-dimensional chains with conserved momentum. Phys. Rev. E **81**, 020103 (2010).

[2] A. V. Savin and Y. S. Kivshar. Modeling of second sound in carbon nanostructures. Phys. Rev. B **105**, 205414 (2022).

### Заключение

Выпускная квалификационная работа Труновой Иоанны Николаевны по теме «Нестационарные волновые процессы в дискретных и континуальных средах» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам, и заслуживает оценки отлично.

Рецензент

В.н.с. ФИЦ ХФ РАН, д.ф.-м.н.

А.В. Савин

30.05.2024

Собственно поручению подписать  
сотрудника Савина А.В.  
удостоверяю

