

**Рецензия на выпускную квалификационную работу студента кафедры проблем теоретической физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», направление подготовки 03.03.01, прикладные математика и физика,
Коковина Артёма Дмитриевича**

«ЗАТУХАНИЕ ИЗГИБНЫХ ФОНОНОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДВУМЕРНЫХ МЕМБРАНАХ»

Выпускная квалификационная работа, представленная Коковиным А. Д., посвящена изучению затухания изгибных фононов в двумерных материалах, т.е. системах, имеющих поперечную упругую степень свободы. Такие системы активно изучаются после открытия графена, причем постоянно появляются новые двумерные материалы, а экспериментальный и теоретический интерес к данной тематике непрерывно растет. Это определяет актуальность данного исследования.

С точки зрения теории упругости двумерный материал представляет собой кристаллическую мембрану. В работе основное внимание уделено так называемому универсальному режиму, в котором упругие параметры степенным образом меняются с увеличением размера мембраны (или уменьшением волнового вектора). Этот режим особенно сложен для теоретического описания, поскольку ключевую роль во всех физических явлениях играет ангармоническое взаимодействие между изгибными фононами и фононами, отвечающими за колебания в плоскости. Поэтому соответствующий теоретический анализ предполагает уверенное владение методами теории поля. Задача о затухании фононов в универсальном режиме мембраны является чрезвычайно важной для экспериментального изучения колебаний в двумерных материалах и ранее не решалась. Вышесказанное определяет сложность и новизну работы.

Название работы соответствует ее структуре и фактическому содержанию. В первых двух разделах представлен очень краткий обзор литературы по теме работы и описаны основные известные подходы к теоретическому описанию аномальной упругости в мембране в статическом случае. В третьем разделе автор обобщает развитые ранее методы на динамический случай. Получены выражения для поляризационного оператора и мнимой части собственной энергии. Все вычисления проведены с учетом статической экранировки, которая играет ключевую роль в универсальном режиме. Получен довольно общий результат — предсказано универсальное степенное поведение мнимой поправки к спектру изгибных фононов. С помощью полученных результатов, автор в четвертом разделе выводит выражение для временного коррелятора флуктуаций поперечных смещений. Основные результаты этого раздела — предсказание субдиффузионного степенного поведения временного коррелятора и вывод выражения для соответствующего показателя степени. В последнем пятом разделе сформулированы основные результаты работы. В качестве наиболее интересного результата следует отметить предсказание весьма высокого темпа распада изгибных фононов. Более конкретно, показано, что в универсальной режиме темп затухания изгибных фононных мод порядка самой частоты моды. В диссертации также имеется несколько приложений, в которых более подробно разобраны нетривиальные технические моменты вычислений. Из вышперечисленного следует важность и оригинальность полученных теоретических результатов. Следует также отметить, что большинство предсказаний вполне допускают экспериментальную проверку.

В целом, работа написана на самом высоком уровне, а Коковина А. Д., продемонстрировал способность решать сложные теоретические задачи и получать результаты мирового уровня. Выводы автора аргументированы и хорошо обоснованы на уровне строгих расчетов.

В качестве небольшого замечания, следует отметить, что все вычисления проведены для случая бесконечной мембраны, тогда как реальные мембраны имеют конечный размер и, как следствие, спектр фононных колебаний является дискретным. Это может сильно повлиять на затухание фононных мод, расчету которого посвящена работа. Это замечание, однако, скорее является пожеланием для дальнейшего исследования. Также следует отметить не слишком обширный список литературы к данной работе, хотя данная тематика имеет долгую историю. Наконец, имеются недостатки в структуре работы. Например, название первого раздела «Постановка задачи», не отвечает реальному содержанию раздела. Тем не менее, данные мелкие замечания не влияют на общий чрезвычайно высокий уровень работы.

Подводя итог, бакалаврская диссертация Коковина Артёма Дмитриевича соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам студентов Образовательной программы «Прикладные математика и физика» МФТИ, и рекомендуется к защите на Государственной аттестационной комиссии с оценкой 10 («отлично»).

13.06.2023 г.

гнс, ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

дфмн

Качоровский В.Ю.