ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.167.02 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. В.А. СТЕКЛОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК.

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 02.10.2025 № 6

О присуждении **Александрову Артему Александровичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «**Эффекты конденсации степеней свободы в сложных системах»** на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика, принята к защите «26» июня 2025 г., протокол № 5 диссертационным советом 24.1.167.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Математического института им. В.А. Стеклова Российской академии наук (119991, г. Москва, ул. Губкина, д. 8; приказ № 1114/НК от 23.05.2023).

Александров Артем Александрович, 1997 года рождения, окончил в 2021 г. магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по специальности 03.04.01 «Прикладные математика и физика», а в 2025 г. там же аспирантуру по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», в настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника в Институте проблем передачи информации им. А.А Харкевича РАН. Диссертация выполнена на кафедре теоретической физики им. Л.Д. Ландау Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – Горский Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории квантовой

физики и информации Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН.

Официальные оппоненты:

- Рубцов Алексей Николаевич, доктор физико-математических наук, научный руководитель группы «Коррелированные квантовые системы» ООО «МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЦЕНТР КВАНТОВОЙ ОПТИКИ И КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ» (специальность – 01.04.09)
- Смирнов Лев Александрович, кандидат физико-математических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Искусственного интеллекта и обработки больших массивов данных» Института информационных технологий, математики и механики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (специальность – 01.04.03)

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий» (г. Москва) в своем положительном заключении, утвержденном ректором Института доктором технических наук, академиком РАН, профессором А.П. Кулешовым, указала, что диссертационное исследование является законченной научно-квалификационной работой, его результаты вносят фундаментальный вклад в развитие теории о динамике сложных систем, в частности в изучение синхронизации. Ведущая организация отметила применение развитого математического аппарата, использованного для решения сформулированных задач.

По материалам диссертации автором опубликовано 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК (в том числе, 4 - в журналах первого квартиля):

1. Alexandrov A., Arkhipov P., Gorsky A. Synchronization on star-like graphs and emerging $\mathbb{Z}_p$ -symmetries at strong coupling // Journal of Complex Networks. – 2022. – Т. 10. – №. 3. – С. cnac015.

2. Alexandrov A. Synchronization on star graph with noise // Chaos, Solitons & Fractals. – 2023. – Т. 167. – С. 113056.

3. Alexandrov A., Gorsky A. Information geometry and synchronization phase transition in the Kuramoto model // Physical Review E. – 2023. – Т. 107. – №. 4. – С. 044211.

4. Alexandrov A., Gorsky A. On out-of-equilibrium phenomena in pseudogap phase of complex SYK+ U model // Physics Letters B. – 2023. – Т. 847. – С. 138318.

5. Alexandrov A., Gorsky A. Penrose method for Kuramoto model with inertia and noise // Chaos, Solitons & Fractals. – 2024. – Т. 183. – С. 114938.

По совместным статьям есть заявление соавторов о разделении вклада в публикации. Других отзывов на диссертацию и автореферат не поступало.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что они являются компетентными, высококвалифицированными специалистами в области физико-математических наук, а также наличием публикаций по тематике, близкой к теме диссертации. Оппонент Смирнов Л.А. является специалистом в области нелинейной физики и синхронизации. Оппонент Рубцов А.Н. является специалистом в физике взаимодействующих квантовых систем, в частности, в аспектах коллективного поведения сложных квантовых систем и квантовых корреляций в них. Среди сотрудников ведущей организации имеется ряд ведущих специалистов по нелинейной и статистической физике.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- внесен вклад в изучение низкоразмерной динамики в модели Курамото, основанный на применении идей информационной геометрии, изучены частные случаи модели, заданной на графе-звезде и его обобщениях, проанализировано влияние шума на синхронизацию на графе-звезде;
- продемонстрирована общность построения термодинамических пределов для обобщений модели Курамото с инерцией и шумом с помощью пределов плотных графов (графонов), а также показана применимость метода Пенроуза для таких обобщений;
- описаны квантово-механические системы, в которых модель Курамото возникает как эффективная теория, для одной из таких систем (SYK+U модель) показана связь синхронизации и возникновения конденсата фаз.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

1) показано, что расхождение Кульбака-Лейблера и метрика Фишера для модели Курамото на полном графе могут быть использованы для анализа выхода в синхронизованный режим, в частности показано, что особенности в метрике Фишера соответствуют критической точке для модели с шумом;

2) для модели Курамото на графе-звезде с шумом, а также обобщений графа-звезды изучено влияние шума на гистерезис (для графа-звезды), а также показано наличие гистерезиса для графов типа «длинная звезда» и существование высокосимметричных несинхронизованных состояний в режиме сильной связи;

3) изучена роль фазовой динамики для SYK-модели с дополнительным Хаббардовским притяжением; показано, что синхронизация фаз соответствует формированию конденсата мягких мод;

4) для обобщения модели Курамото с шумом и инерцией с помощью графонов и метода Пенроуза проанализирована стабильность несинхронизованного состояния, найдена критическая константа связи, а также исследованы аналитически и численно различные режимы синхронизации: образование кластеров и возникновение химероподобных состояний.

В диссертации эффективно использованы современные математические методы, основанные на идеях теории графов (пределы плотных графов в виде графонов), статистической механики (построение термодинамических пределов и анализ их свойств), информационной геометрии (функции расхождения, градиентные потоки), а также методах теории динамических систем (анализ устойчивости решений и изучение бифуркаций). Полученные аналитические результаты наглядно проиллюстрированы с помощью численных симуляций.

Диссертация имеет теоретический характер. Результаты диссертации представляют интерес для изучения коллективного поведения в сложных системах и статистической механики в целом. Помимо этого, результаты могут иметь практическую значимость в контексте создания нейроморфных архитектур. Развитые в диссертации методы позволяют взглянуть на низкоразмерную динамику в модели Курамото с точки зрения информационной геометрии, а также иллюстрируют значимость графонов для построения термодинамических пределов динамических систем, заданных на больших графах. Также много внимания в диссертации уделено синхронизации в контексте квантовых систем, в частности, показано как фазовая динамика возникает в поляритонных конденсатах, обобщении SYK-модели, обсуждается связь синхронизации с конденсацией.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается строгими формулировками утверждений, детальностью вычислений и приведенными строгими доказательствами. Результаты работы являются новыми и согласуются с результатами, полученными другими авторами. Результаты исследований докладывались автором на многочисленных семинарах и конференциях. Все работы выполнены при непосредственном участии диссертанта, и его вклад в эти работы, в том числе в положения, выносимые на защиту, является определяющим.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие замечания:

1) Для модели на графе типа «звезда» уравнения движения в терминах разностей фаз близки к модели активных ротаторов, поэтому целесообразно было бы провести прямое сравнение этих двух моделей.

2) При изучении потери устойчивости асинхронного состояния в модели с инерцией и шумом считается, что это состояние можно описать δ-функцией по скорости, откуда вытекают ограничения на формулы, полученные в диссертационной работе. Представляется важным дать оценки этих ограничений.

3) Значительное внимание уделяется коллективной динамике в ансамблях на графах, включая случайные графы. Однако до конца не ясно, какие из полученных результатов относятся именно к этому случаю. Если эта линия намечена как перспективная, было бы полезно конкретизировать возможные задачи.

4) В главе 6 анализ проводится в рамках среднего поля, что физически устраняет квантовый характер исходных систем и «размывает» их изначальную квантовую природу. Стоило бы обсудить, как квантовые эффекты способны повлиять на коллективные свойства, какие методы могли бы позволить развить теоретические представления в данном направлении, какой математический аппарат уместен для этого.

5) Не вполне ясно, как из формулы (2.18) и предыдущих следует, что рассматриваемая неустойчивость сопровождается появлением бифуркации.

6) Вывод низкоэнергетического гамильтониана SYK+U модели дан излишне сжато и в представленном виде представляется каскадом не вполне обоснованных приближений, в частности, предполагается отсутствие межузельных корреляций.

7) В диссертации приводится несколько примеров физических систем, в которых может иметь место синхронизация мод, однако ничего не говорится о, по-

видимому, самом известном – синхронизации мод в лазерных резонаторах. Соискатель Александров А.А. согласился с замечаниями и аргументированно ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 7 докторов наук по специальности 1.3.3, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за **16**, против **нет**.

Председатель диссертационного совета
24.1.167.02
доктор физико-математических наук

Славнов Никита Андреевич

Ученый секретарь диссертационного совета
24.1.167.02
кандидат физико-математических наук

Теретёнков Александр Евгеньевич

02 октября 2025 года