

## Отзыв

официального оппонента Кулевого Тимура Вячеславовича на диссертацию Колокольчикова Сергея Дмитриевича «Исследование динамики поляризованного пучка в ускорительном комплексе NICA-Nuclotron в приложении к изучению электрического дипольного момента лёгких ядер», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация Колокольчикова С.Д. посвящена исследованию динамики тяжёлых ионов и поляризованных лёгких частиц в ускорительных и накопительных установках, в частности в комплексе NICA в ОИЯИ. Работа отличается комплексным подходом: автором рассмотрены как вопросы, связанные с обеспечением высокой светимости в тяжёлоионных столкновениях, так и проблемы, возникающие при ускорении поляризованных протонов и дейтронов для экспериментов по спиновой физике и поиску электрического дипольного момента.

Актуальность работы определяется современными задачами физики высоких энергий и ядерной физики. Повышение светимости в коллайдерных экспериментах лежит в основе достижения фундаментальных результатов, связанных с исследованием кварк-глюонной плазмы и спиновой структуры нуклонов. Исследование поляризованного пучка с высоким временем спиновой когерентности может открыть перспективы измерения электрического дипольного момента, потенциальным источником CP-нарушения.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 130 страницы, включая 64 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 98 наименований. Текст работы изложен понятным языком, а основные результаты многократно представлены автором на различных всероссийских и международных конференциях, опубликованы в рецензируемых журналах.

**Во введении** приведен подробный обзор современного состояния области исследований, направленных на изучение поляризованных пучков. Также в нём указывается цель диссертационной работы, описываются задачи, стоящие перед диссертантом. Обсуждается научная новизна, обосновывается практическая значимость и актуальность проводимого исследования.

**В первой главе** представлен анализ процессов внутripучкового рассеяния в тяжёлых пучках и рассмотрено влияние критической энергии на устойчивость продольного движения лёгких ядер. Показано, что для тяжёлых ионов ключевым фактором является наличие охлаждения пучка для компенсации эффекта внутripучкового рассеяния, тогда как для лёгких частиц необходимы специальные меры по преодолению критической энергии.

**Во второй главе** проведено исследование процедуры скачка критической энергии с учётом высших порядков разброса по импульсам и моделей продольных импедансов. Результаты численного моделирования сопоставлены с экспериментальными данными синхротрона У-70, что позволило подтвердить применимость предложенных методов.

**В третьей главе** предложены варианты модернизации структуры коллайдера NICA путём создания резонансной структуры с поднятой критической энергией. Рассмотрены схемы модуляции градиентов квадрупольных линз и введения секступольных элементов для обеспечения достаточного значения динамической апертуры.

**В четвёртой главе** исследованы возможности реализации экспериментов по поиску электрического дипольного момента лёгких ядер с применением концепции квази-замороженного спина. Рассмотрены конструкции bypass-каналов и использование элементов с совмещёнными магнитным и электрическим полями, что открывает новые перспективы для развития комплекса NICA.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

К содержанию работы можно сделать следующие замечания и рекомендации:

1. Реализация дуальной структуры требует введения схемы отдельного питания квадруполей. В диссертации недостаточно подробно рассмотрена эксплуатационная логика переключения режимов: неясно, предусмотрено ли разделение сеансов работы в различных модах тяжелоионной и поляризованной.
2. Полезно добавить в работу оценки по влиянию предлагаемой реализации резонансной или комбинированной магнитооптической структуры в коллайдере NICA на светимость пучка.
3. Использование прямых электродов в фильтрах Вина, предложенных для реализации режима квази-замороженного спина, действительно позволяет достигать высоких напряженностей электрического поля ( $E \sim 10$  МВ/м) без пробоя, в отличие от искривленных дефлекторов. Однако в работе отсутствуют конкретные оценки предельных значений  $E_{max}$ , закладываемых в проект с учетом современных технологий вакуумной изоляции.
4. Предложенные в Главе 4 варианты модернизации синхротрона Nuclotron (8- и 16-периодные структуры) предполагают существенное изменение расстановки магнитных элементов и введение прямых участков для фильтров Вина. Не затронут вопрос совместимости новой оптики с существующими системами инжекции из бустера и экстракции на мишени VM@N. Требуется уточнение возможна ли адаптация систем ввода-вывода пучка.
5. Было бы полезно дать оценки влияния «не идеальности» оптики синхротрона на время декогеренции и соответственно на возможность измерения ЭДМ протонов и дейтронов

Однако данные замечания не являются критичными, не снижают значимости и ценности полученных результатов.

Считаю диссертационную работу Колокольчикова С.Д. отличным и полным научным трудом, ценным с научной и методической точек зрения. Хочу отметить, что текст диссертации написан доступным грамотным языком. Автор продемонстрировал отличное знание научной терминологии и основных концепций области исследований.

Полученные автором результаты имеют существенное значение как для фундаментальной физики, так и для прикладных задач. Основные результаты диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Проведённая автором методическая и экспериментальная работа способствует проведению экспериментов нового уровня точности на ускорителях-накопителях, позволяет исследовать физику за рамками Стандартной модели, способствует проектированию новых накопительных колец. Отсюда следует новизна и актуальность работы.

Представленные в диссертации научные результаты являются новыми, обоснованными и достоверными. Достоверность обеспечивается использованием корректных аналитических и численных методов описания динамики пучков, включая разложение коэффициента расширения орбиты по высшим порядкам, модели продольных импедансов, а также специализированные пакеты моделирования (MAD-X, BMAD, BLong, COSY Infinity). Полученные автором результаты сопоставлены с экспериментальными данными синхротрона У-70 и показали согласие с теоретическими расчётами и численным моделированием. Основные научные выводы были апробированы на совещаниях и в рабочих группах, докладывались на международных и всероссийских конференциях, а также опубликованы в рецензируемых журналах, что подтверждает достоверность и надёжность выполненной работы.

С учётом вышеизложенного считаю, что диссертация Колокольчикова Сергея Дмитриевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент,

Кулевой Тимур Вячеславович,

доктор технических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника»,

Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, заместитель руководителя Комплекса по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам.

117218, г. Москва, ул. Большая Черемушкинская, д. 25.

Тел.: +7(910)402-24-83, e-mail: [kulevoy@itep.ru](mailto:kulevoy@itep.ru)

\_\_\_\_\_ Т.В. Кулевой

«27» апреля 2026 г.

Подпись Кулевого Тимура Вячеславовича удостоверяю:

Заместитель директора –

Главный ученый секретарь Центра \_\_\_\_\_

О.А. Алексеева

Список основных публикаций по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Kulevoi T.V. et al. NICA Beamlines and Stations for Applied Research. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 20, 767–771 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1547477123040271>
2. Kulevoi T. et al. Construction of Stations for Applied Research at the NICA Accelerator Complex. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 19, 528–531 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1547477122050375>
3. Kulevoi T.V. et al. Modeling Beam Dynamics in a High-Energy Beam Transport Channel. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 21, 369–374 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1547477124700286>
4. Kulevoi, T.V. et al. Magnetic Elements of a Low-Energy Channel for a Heavy Ion Accelerator. *Instrum Exp Tech* 67 (Suppl 1), S114–S117 (2024). <https://doi.org/10.1134/S0020441224701203>
5. Kulevoy, T.V. High Duty-Factor High-Intensity Proton LINAC for Compact Accelerator-Driven Neutron Source. *Phys. Part. Nuclei* 56, 768–771 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1063779624702265>