

ОТЗЫВ

официального оппонента Мочалова Василия Вадимовича
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.

Диссертационная работа Колокольчикова С.Д. выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) и посвящена исследованию поведения тяжёлых ионов и поляризованных пучков лёгких заряженных частиц в ускорительных и накопительных установках с целью расширения физической программы исследований в комплексе NICA Nuclotron.

Важным направлением исследований на ускорительном комплексе NICA является проведение спиновых исследований, для чего требуется создание поляризованных пучков. Однако, сами поляризованные пучки даже без экспериментальных установок, могут стать инструментом для исследования важных физических свойств. Наиболее перспективным направлением таких исследований, в которых ускоритель является одновременно прибором для измерения физических процессов, является изучение ЭДМ протона и дейтрона. Для измерения величины ЭДМ на уровне 10^{-29} е·см необходимо удерживать пучок на орбите с сохранением поляризации в течение времени порядка ~ 1000 с, с последующим анализом рассеяния на мишени поляриметра. Влияние магнитного дипольного момента (МДМ) при этом должно быть подавлено до величины, меньшей сигнала ЭДМ.

Целью данной диссертации является изучение особенностей поведения тяжёлых ионов и поляризованных пучков лёгких заряженных частиц в структуре ускорителя NICA, а также исследования необходимых характеристик ускорителя для исследования электрического дипольного момента с использованием квази-замороженной концепции сохранения спина. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать дуальную магнитооптическую структуру коллайдера, чтобы ускоритель позволял работать как с тяжёлыми ионами, так и с лёгкими частицами без изменения оборудования кольца;
2. Исследовать регулировку критической энергии для поляризованного пучка в структуре с модуляцией дисперсионной функции;
3. Исследовать методом численного моделирования динамику пучка лёгких частиц с учётом высших порядков коэффициента уплотнения орбиты в структуре с резонаторами гармонического и барьерного типов;
4. Исследовать поведение динамической апертуры при компенсации хроматичности в процессе скачка критической энергии;
5. Определить особенности поведения поляризации пучка при пересечении критической энергии;
6. Исследовать особенности поведения пучка в режиме квази-замороженного спина с целью создания установки для изучения ЭДМ протона и дейтрона.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, и заключения.

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** рассматриваются процессы внутривещного рассеяния и роль критической энергии, которая влияет на динамику ускорения, прежде всего, протонов, что необходимо для ускорения поляризованных пучков. На основании этих положений, предложена дуальная структура, с минимально модулированными Твисс-функциями для тяжелоионного пучка и резонансная структура с повышенной критической энергией для лёгких ядер.

Во **второй главе** основное внимание уделено исследованию особенностей прохождения пучком критической энергии и анализу факторов, ограничивающих стабильность его движения. Показано, что вблизи критической энергии значительное ограничение на параметры сгустка накладывает продольная микроволновая неустойчивость, приводящая к снижению светимости коллайдера. Для подтверждения правильности моделирования для будущего ускорителя NICA исследованы особенности процедуры скачка критической энергии в действующем синхротроне У-70.

В **третьей главе** рассматривается вариация критической энергии в резонансной структуре. Для регулярной магнитооптической структуры коллайдера NICA проанализированы варианты модернизации, позволяющие повысить критическую энергию. Рассмотрен вопрос подавления натуральной хроматичности, а также нелинейных эффектов в таких структурах. Представлены схемы расстановки секступолей в рассмотренных оптиках.

В **четвертой главе** рассматривается возможность изучения электрического дипольного момента протона и дейтрона. Рассмотрены проекты обводных каналов в структуре коллайдера NICA, предназначенных для организации экспериментов с поляризованными пучками и выделения сигнала ЭДМ. Исследована концепция квази-замороженного спина для накопительных колец, позволяющая модернизировать кольца без изменения их базового назначения и расширить экспериментальные возможности.

Заключение содержит сжатое изложение ключевых результатов диссертации.

Актуальность и новизна приведенных в диссертации результатов не вызывает сомнений. Колокольчиковым С.Д. был проведён детальный анализ процессов внутривещного рассеяния и влияния критической энергии на динамику тяжёлых ионов и поляризованных лёгких ядер. Были получены новые результаты по методам управления критической энергией, включая разработку резонансных структур, процедуру скачка критической энергии и её численное моделирование с учётом импедансов. Продемонстрировано, что предложенные решения позволяют повысить стабильность движения пучков, обеспечить требуемую светимость и создать условия для экспериментов по поиску ЭДМ. Проведенные исследования предлагается использовать в будущих исследованиях на ускорительном комплексе NICA. Результаты исследований важны прежде всего для практического использования на подготавливаемом ускорителе и предлагают расширить физическую программу исследований. Предложение использовать в том числе Nuclotron может существенно повысить использование его времени, чтобы он служил не только в качестве инжектора. С учетом того, что подобные исследования не предполагается

проводить в других научных центрах, данные работы (при их реализации) позволят получить важные физические результаты.

Основным результатом исследования является подготовка предложения по созданию структуры, которая может одновременно быть использована для изучения ЭДМ как дейтронов, так и протонов. При этом решаются и другие задачи, необходимые для реализации основной цели исследования, в частности:

Проведённый анализ динамики пучка вблизи критической энергии позволил определить её влияние на устойчивость движения поляризованных протонных пучков и установить оптимальные параметры процедуры её преодоления, что необходимо для достижения необходимых требований к пучкам.

Разработанная структура (использован термин дуальная) позволит обеспечить эффективную работу как с пучками тяжёлых ионов, так и с лёгкими частицами, что делает возможным использование различных пучков в одном ускорительном комплексе: экспериментов по изучению кварк-глюонной плазмы и исследований поляризованных пучков в симметричных и асимметричных коллайдерных режимах.

Для поляризованных частиц адаптирован метод квази-замороженного спина для коллайдера NICA. Разработана магнитооптическая схема обводных каналов с фильтрами Вина, обеспечивающая реализацию экспериментов по измерению электрического дипольного момента дейтрона без существенной модификации базовой структуры ускорителя.

Основные результаты диссертации являются, несомненно, важными для проведения экспериментальных исследований, прежде всего в ОИЯИ. Новизна и важность полученных результатов не вызывают сомнений. Результаты, полученные автором, являются существенным вкладом в развитие программы экспериментов с поляризованными пучками на ускорителях. Предложенные решения могут быть использованы не только на NICA, но и на Nuclotron с сохранением функций бустера для поляризованных пучков, что создаёт возможность проведения независимых экспериментов по поиску ЭДМ в рамках программы спиновой физики комплекса NICA–Nuclotron и подтверждает новизну, ценность и значимость работы, выполненной Колокольчиковым Сергеем Дмитриевичем. Важно, чтобы предложенные решения не остались просто предложениями, а нашли применение в исследованиях на ускорительном комплексе NICA.

Достоверность проведенных исследований частично подтверждена экспериментальными исследованиями, в частности, результаты по динамике вблизи критической энергии, полученные на У-70, согласуются с общепринятыми принципами динамики. Достоверность и обоснованность результатов диссертации обеспечивается использованием корректных аналитических и численных методов описания орбитального и спинового движения в кольцевых ускорителях, таких как динамика продольного и поперечного движения, анализ спиновых характеристик накопителя, уравнение Т-БМТ. Численные расчёты были произведены в программных средах MAD-X, OPTIM, BMAD, BLD, COSY Infinity, которые были многократно апробированы в ходе решения задач из области исследований и тестировались на экспериментальных данных.

В то же время имеется несколько замечаний и вопросов к автору диссертационной работы:

1. Основное замечание относится к тексту автореферата – плохо описаны основные результаты исследования, по существу, только сформулированы. Нужно было в автореферате сократить Введение и подробнее изложить материал, особенно по Главе 4.

2. Второе замечание относится к физической части – в тексте диссертации упоминается исследование аксионоподобных частиц, однако, каким образом это делается и как связано с диссертацией непонятно. Считаю, что в данном подходе ссылка на исследования аксионов не совсем уместно.
3. Во второй главе диссертации показано, что качественно расчеты и исследования, проведенные на синхротроне У70 совпадают, однако, нет количественных оценок, непонятно из текста, с какой точностью совпадают расчеты и экспериментальные результаты.
4. В Главе 2 при моделировании продольной микроволновой неустойчивости использовались упрощенные модели импеданса (индуктивный импеданс $Z/n=\text{const}$). Учитывая, что реальный импеданс кольца NICA имеет сложную частотную зависимость, было бы полезно обсудить, как учет точной модели импеданса может количественно изменить порог неустойчивости при скачке критической энергии, даже если качественная картина останется прежней.
5. Предложенный в Главе 3 метод повышения критической энергии посредством создания резонансной магнитооптической структуры основан на сильной суперпериодической модуляции градиентов квадрупольей. Такая организация оптики, при всей своей эффективности для управления критической энергией, неизбежно приводит к росту натуральных хроматических функций и усилению зависимости бетатронных частот от разброса импульса частиц. В диссертации приведены схемы компенсации линейной хроматичности секступолями, однако, недостаточно подробно проанализировано влияние остаточной нелинейной хроматичности и высших порядков хроматических аберраций, характерных для резонансных структур, на динамику реального пучка с конечным энергетическим спектром.
6. В Главе 4 предложена концепция использования фильтров Вина и обводных каналов для поиска ЭДМ, обеспечивающая длительное время спиновой когерентности. Однако в диссертации недостаточно детально проработана методика выделения истинного сигнала ЭДМ на фоне систематических эффектов. Отсутствует количественная оценка вклада этих систематических ошибок в измеряемую поляризацию и план мероприятий по их минимизации в эксперименте.
7. Иногда неудачная стилистика, например: «Из-за соотношения заряда к массе максимальная энергия протонного пучка достигает 12.4 ГэВ.» - данное утверждение скорее бы соответствовало ограничениям на энергию ионов, так как там доля заряженных частиц может меняться.

Отмеченные недостатки не влияют на положительное впечатление от работы и на общую оценку диссертации Колокольчикова Сергея Дмитриевича, которая является законченным, логически согласованным и полным исследованием и характеризуется высоким научным уровнем. Каждая глава завершается промежуточными выводами, способствуя логичности и последовательности изложения. Общий объем диссертации составляет 130 страниц, включая 64 рисунка и 9 таблиц. В диссертации подробно рассмотрены все вопросы, которые могут повлиять на качество исследований. В тексте диссертации даже больше выполненных (по объему) работ, что требуется для кандидатской диссертации. Отмечу также хорошее оформление диссертации и ясный язык изложения

Основные результаты по теме диссертации своевременно опубликованы в 15-ти публикациях, из них 11 опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемы базами Scopus и Web of Science. Все положения, выносимые на защиту, и основные результаты являются новыми и значимыми для области исследований. В опубликованных автором в рецензируемых научных изданиях статьях полно отражены основные результаты работы. Результаты представлены более чем на 10 международных конференциях.

Защищаемые положения и выводы являются полностью обоснованными, их достоверность не вызывает сомнения.

Автореферат диссертации оформлен в соответствии с требованиями ВАК, в целом отражает содержание диссертации и содержит необходимые формулировки цели и задач исследований, выносимых на защиту.

С учетом изложенного считаю, что диссертационная работа Колокольчикова Сергея Дмитриевича «Исследование динамики поляризованного пучка в ускорительном комплексе NICA-Nuclotron в приложении к изучению электрического дипольного момента лёгких ядер», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Колокольчиков Сергей Дмитриевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент,
Мочалов Василий Вадимович,
доктор физико-математических наук по специальности 01.04.23 – Физика высоких энергий.
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логанова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1,
тел. +7(916)1476485, адрес электронной почты: mochalov@ihep.ru,
Отделение экспериментальной физики, лаборатория поляризационных экспериментов,
ведущий научный сотрудник.

«18» мая 2026 г.

_____ В.В. Мочалов

Подпись В.В. Мочалова удостоверяю
Ученый секретарь
НИЦ “Курчатовский институт” — ИФВЭ, к.ф.-м.н.

_____ Н.Н. Прокопенко

Мочалов Василий Вадимович

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

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

1. R. Abdul Khalek, ... V.Mochalov, ... et al, Science Requirements and Detector Concepts for the Electron-Ion Collider : EIC Yellow Report, Published in: Nucl.Phys.A 1026 (2022) 122447
2. PANDA Collaboration (G. Barucca, ... V. Mochalov, ... et al), PANDA Phase One, Published in: Eur.Phys.J.A 57 (2021) 6, 184
- 3 PANDA Collaboration (F. Davi, ... V. Mochalov, ... et al), Technical design report for the endcap disc DIRC, Published in: J.Phys.G 49 (2022) 12, 120501
4. В.В. Абрамов, ... В.В. Мочалов, ... и др., Концептуальный проект эксперимента СПАСЧАРМ, , ЭЧАЯ, 2023, том 54, выпуск 1, стр. 6 [Physics of Particles and Nuclei, 2023, V. 54, N 1, p.69]
5. А.В. Рязанцев, ... В.В. Мочалов и др., СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ГОДОСКОП ЭКСПЕРИМЕНТА СПАСЧАРМ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ У-70, ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2023, № 4, с. 48–54, DOI: 10.31857/S0032816223030096 [A.V. Ryazantsev et al, A Scintillating Fiber Hodoscope for the SPASCHARM Experiment at the U-70 Accelerator Complex, Instruments and Experimental Techniques, 2023, Vol. 66, No. 4, pp. 563–569]
6. В.Н. Алферов, ... В.В. Мочалов и др., Система измерения поля в широкоапертурных магнитах физических установок на ускорительном комплексе У-70, опубликована в журнале «Приборы и Техника эксперимента», 2024, № 5, 97-111 [Instruments and Experimental Techniques, 2024, Vol. 67, No. 5, pp. 977–988]
7. В.В. Абрамов, ... В.В. Мочалов и др., Экспериментальная установка СПАСЧАРМ для исследования спиновых эффектов в адронных взаимодействиях на ускорительном комплексе У-70», «Приборы и Техника эксперимента», 2024, № 6, 4-21 [Instruments and Experimental Techniques, 2024, v. 67, issue 6, 1065-1079]
8. А.П. Мещанин, ... В.В. Мочалов и др., Двухкоординатный сцинтилляционный годоскоп на базе ФЭУ-85 эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70, «Приборы и Техника эксперимента», 2025, № 1, с. 16–20, Instrum.Exp.Tech. 68 (2025) 1, 14-18 [Instruments and Experimental Techniques, 68 (2025) 1, 14-18]
9. С.Ф. Решетников, А.Г. Афонин, Е.В. Барнов, А.Я. Левин, В.В. Мочалов, М.Н. Уханов, Ю.А. Чесноков, УНИФИЦИРОВАННАЯ СТАНЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРОВ НА УСКОРИТЕЛЕ У-70, ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ 2025, том 16, № 6, с. 873–880