

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д720.001.03 НА БАЗЕ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ МЕЖПРАВИТЕЛЬСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 12.02.2018 № 544

О присуждении Салееву Артему Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Новые аспекты спиновой динамики для прецизионных экспериментов по поиску электрического дипольного момента заряженных частиц на накопительных кольцах» по специальности 01.04.16 физика атомного ядра и элементарных частиц принята к защите 10.10.2017 (протокол заседания № 540) диссертационным советом Д 720.001.03, созданным на базе Международной межправительственной организации Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6, приказ о создании диссертационного совета от 11.04.2012 №105/нк.

Соискатель Салеев Артем Владимирович, 1987 года рождения, в 2011 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. В 2015 году освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре Самарского Университета в период с 01.11.2011 г. по 31.10.2015 г. Удостоверение № 51 о сдаче кандидатских экзаменов по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц» выдано в Самарском университете.

Работает инженером в Научно-образовательном центре «Физика неравновесных открытых систем» Самарского Университета.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Самарском национальном исследовательском университете имени академика С.П. Королева.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Николаев Николай Николаевич, главный научный сотрудник в Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Воронин Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе в Федеральном государственном

бюджетном учреждении Петербургском институте ядерной физики имени Б.П. Константинова, НИЦ «Курчатовский институт»,

Николаев Иван Борисович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории 3-2 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук  
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Протвино в своем положительном отзыве, подписанным доктором физико-математических наук Абрамовым Виктором Владимировичем, ведущим научным сотрудником в Отделении экспериментальной физики Института физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт», указала, что соискатель имеет 7 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 7 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 4 работы:

1. Spin tune mapping as a novel tool to probe the spin dynamics in storage rings / A. Saleev [et al.] // Phys. Rev. Accel. Beams. — 2017. — July. — Vol. 20, issue 7. — P. 072801.
2. Non-exponential decoherence of radio-frequency resonance rotation of spin in storage rings / A. Saleev [et al.] // JETP Letters. — 2017. — Aug. — Vol. 106, issue 4. — Pp. 213–216. — [Pis'ma v ZhETF. — 2017. — Vol. 106. — Pp. 199—200.]
3. Rathmann F., Saleev A., Nikolaev N. N. Search for electric dipole moments of light ions in storage rings // Phys. Part. Nucl. — 2014. — Vol. 45. — Pp. 229–233.
4. Phase locking the spin precession in a storage ring / N. Hempelmann, ..., A. Saleev, [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2017. — July. — Vol. 119, issue 1. — P. 014801.

Первые две работы из данного списка наиболее значимые. Работа (1) отмечена редакцией журнала «Physical Review Accelerators and Beams» как рекомендованная к ознакомлению. Все публикации по теме исследования выполнены при определяющем вкладе соискателя. Общий объем публикаций составляет 63 печатные страницы. Материалы диссертации полностью изложены в работах, опубликованных соискателем в рецензируемых научных изданиях, соответствующих требованиям ВАК Минобрнауки Российской Федерации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы.

В отзыве Воронина В.В. отмечено, что автору диссертации удалось внести заметный вклад в развитие методов описания эволюции спина частицы при хранении в накопительном кольце, углубить понимание этих процессов. Результаты, полученные в работе, в полном объеме демонстрируют всю сложность и многоплановость задач и проблем, стоящих перед экспериментаторами на пути к конечной цели. Основные выводы диссертации не подвергаются сомнению. При этом, высказан ряд замечаний:

- Во введении недостаточно полностью проведен обзор различных методов поиска ЭДМ, их проблем и полученных результатов.
- Недостаточно рисунков, поясняющих поведение спина.
- Не приведено примера такой процедуры измерений, при которой бы происходило выделение эффекта от ЭДМ на фоне систематических эффектов.
- Не ясно, сохранится ли эффект от ЭДМ при использовании процедуры стабилизации фазы прецессии спина относительно фазы радиочастотного поля.
- Работа по анализу систематики в эксперименте по поиску ЭДМ выглядит хаотичной и фрагментированной. Отсутствует общий системный подход к анализу систематики, такая работа находится в начале пути.
- Не приведена возможная систематическая точность эксперимента по поиску ЭДМ в накопительном кольце.
- Одним из недостатков манеры подачи материала является сложность и витиеватость некоторых формулировок.

В отзыве Николаева И.Б. отмечено, что подробность изложения математических расчетов позволяет следовать за мыслью автора с самых основ – уравнения БМТ эволюции спина в электромагнитных полях, а достаточно хорошее покрытие текста цитированиями дает возможность подробнее познакомиться с результатами работы и лежащими в их основе предпосылками. К недостаткам диссертации отнесено:

- В тексте отсутствует описание основных характеристик накопителя COSY, на котором получены основные экспериментальные результаты.
- Недостаточно информации о детекторе поляризации частиц, в частности, иллюстрации системы измерения поляризации.
- Результаты второй главы нуждаются в более детальном исследовании, так как не учтены стохастические процессы, являющиеся истинными причинами декогеренции: флуктуации напряжения ВЧ резонатора, флуктуации магнитных и электрических полей накопителя, флуктуации когерентных и некогерентных потерь за счёт синхротронного излучения, а так же взаимодействия с остаточным газом в вакуумной камере.
- Выражение для поведения спинора поляризации огибающей при большом числе оборотов было получено методом усреднения Боголюбова-Крылова с отбрасыванием ряда нелинейных членов, что приводит к потере

информации об относительных фазах частиц и, следовательно, к декогеренции в такой математической модели.

- Еще одним существенным источником декогеренции, который не рассмотрен в диссертации, является бетатронные колебания при наличии квадратичной нелинейности поля.
- Возможно, на рисунках А.1, А.2 приложения, представлены когерентные «биения» амплитуды вертикальной поляризации или имеется ошибка в расчётах. Нельзя сделать вывод о поведении амплитуды осцилляций за достаточно большой промежуток времени.

В качестве критического отзыва на основную работу (1) опубликована статья S.R. Mane «A critical analysis of the technique of spin tune mapping in storage rings» Nucl. Instr. Meth., A 875 (2017) 141-145, вышедшая в печать после представления текста диссертации. В ней отмечаются расхождения в расчетах господина Мане и критикуемой работы. Подвергается сомнению факт определения направления оси стабильного спина с точностью 2.8 мкрад. Кроме того, автор указывает на более ранние эксперименты по измерению направления оси стабильного спина на IUCF Cooler Ring в 1989 году.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность исследования.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработан новый экспериментальный метод измерения стабильной оси прецессии спина в накопительном кольце COSY при помощи статических соленоидов.

Разработан метод контроля относительной фазы, между сигналом радиочастотного поля ротатора спина и углом прецессии спина в накопительном кольце.

Предложен оригинальный подход к определению вклада систематических ошибок за счет неточности позиционирования соленоидов в методе измерения стабильной оси прецессии спина на основе разделения эффектов вращения спина в соленоиде и в кольце.

Получен степенной закон затухания амплитуды осцилляций вертикальной поляризации пучка за счет декогерентности во время спинового резонанса.

Доказана необходимость учитывать бегущую фазу осцилляций при затухании амплитуды осцилляций, что позволит снизить систематическую неопределенность в измерении сигнала ЭДМ.

Метод фиксирования относительной фазы спина и радиочастотного поля позволяет соблюдать условие точного спинового резонанса, что необходимо для накопления сигнала ЭДМ. Он будет задействован при поиске ЭДМ дейтрона с радиочастотным фильтром Вина и, в перспективе, при поиске ЭДМ в электростатическом кольце.

По результатам численного моделирования результатов эксперимента по определению стабильной оси прецессии, выявлена необходимость более детального описания динамики спина в соленоидах и получены оценки влияния сдвигов орбиты на изменение динамики спина в кольце

Ожидается, что метод определения стабильной оси прецессии спина будет иметь широкое применение при калибровке различных устройств, задействованных для поиска ЭДМ в магнитных и гибридных магнитно-электрических накопительных кольцах.

введены новые понятия: рельеф частоты прецессии спина, искусственная неидеальность.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Получены законы изменения поляризации пучка при радиочастотном спиновом резонансе, которые необходимо учитывать при поисках ЭДМ в накопительном кольце COSY с использованием радиочастотного фильтра Вина – затухание осцилляций и зависимость скорости роста вертикальной поляризации от относительной фазы спина и радиочастотного поля.

Разработан новый метод измерения направления стабильно оси спина в кольце для определения наличия фона к сигналу ЭДМ и получены систематические ограничения точности метода при неточности позиционирования статических соленоидов.

Применительно к проблематике оценки вклада систематических ошибок в методе определения оси стабильного спина в диссертации результативно использован комплекс моделирования спиновой и орбитальной динамики частиц в накопительном кольце «COSY Infinity», а для анализа сдвигов спиновой частоты использована экспериментальная методика измерения фазы прецессии спина. Аналитические методы исследования спиновой динамики частиц основаны на известном в литературе спиновом формализме. Для получения численных зависимостей изменения поляризации при радиочастотном спиновом резонансе использовалось временно-упорядоченное перемножение спиновых матриц.

Предложена гипотеза о перенормировке углов поворота спина для соленоидов в проведенном эксперименте по определению стабильной оси прецессии спина.

Изучены линейные зависимости изменения направления оси стабильного спина и фазы прецессии спина в кольце при возбуждении замкнутой орбиты пучка соленоидами при их неточном позиционировании.

Выдвинуты предположения о причинах перенормировки углов поворота спина в соленоидах, связанных со сдвигом замкнутой орбиты пучка и проведено численное моделирование.

Проведена модернизация предложенной ранее Н.Н. Николаевым теории подавления декогерентности осцилляций вертикальной поляризации при определенных энергиях пучка и гармониках радиочастотного поля ротатора спина.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Разработан и внедрен до уровня практических рекомендаций метод измерения стабильной оси прецессии спина в кольце COSY, который позволяет определить направление оси с угловой точностью 2.8 мкрад.

Разработаны теоретические основы метода стабилизации относительной фазы прецессии спина и радиочастотного поля спинового ротатора, который позволяет удерживать относительную фазу с точностью 0.21 рад и сохранять условие точного спинового резонанса в течение 90 секунд.

Определен статистический предел точности метода поиска ЭДМ в кольце COSY на основе определения направления стабильной оси прецессии спина с помощью искусственных неидеальностей на уровне  $10^{-20}$  е.см.

Создана система практических рекомендаций для использования метода определения стабильной оси прецессии спина в будущем. Выявлена необходимость в использовании специализированных соленоидов и статических фильтров Вина, которые должны иметь точное позиционирование относительно пучка для исключения возникновения сдвигов замкнутой орбиты при работе соленоида.

Предложен способ определения систематических эффектов на основе измерения сдвигов спиновой частоты при помощи корректирующих магнитов кольца.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для эксперимента по измерению стабильной оси прецессии спина показана воспроизводимость измерений спиновой частоты при одинаковых токах в соленоидах, в том числе при повторе измерений через сутки. Результаты

измерений спиновой частоты основаны на признанной в научном сообществе методике, разработанной коллаборацией JEDI в 2012-2014 годах, которой посвящена публикация в ведущем научном журнале Phys. Rev. Lett. 2015, Vol. 115, P. 094801.

Зависимости скорости роста вертикальной поляризации при различной относительной фазе РЧ поля и фазы спина, согласуются с экспериментальными данными, полученными коллаборацией JEDI в 2017 году в первых экспериментах по стабилизации фазы.

Использованы современные методики сбора и обработки исходной информации, произведена выборка экспериментальных данных на основе параметров кольца COSY.

Личный вклад соискателя состоит в:

Участии во всех этапах эксперимента по определению направления стабильной оси прецессии спина, анализе исходных данных фазы прецессии спина для определения сдвигов частоты, обработке и интерпретации экспериментальных данных, подготовке публикаций. Автор лично участвовал в апробации результатов исследования по измерению направления оси стабильного спина на COSY на международных конференциях, симпозиумах, собраниях Немецкого физического сообщества, собраниях коллаборации JEDI. Закон неэкспоненциального затухания осцилляций вертикальной поляризации получен при участии соискателя. Временная зависимость наблюдаемой одночастичной поляризации от относительной фазы спина и радиочастотного поля при работе РЧ фильтра Вина получена лично автором. Автор лично провел численное моделирование динамики замкнутой орбиты пучка и проанализировал зависимости в полученной спиновой динамике при работе статических соленоидов, провел сравнение с имеющимися экспериментальными данными, сделал выводы о требованиях к будущим экспериментам по определению оси стабильного спина. Автор предложил способ определения систематического фона к сигналу ЭДМ в будущих экспериментах корректирующими магнитами.

Диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 № 842 с изменениями от 21 апреля 2016 (приказ № 335), а её автор, Салеев Артем Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц».

На заседании 12.02.2018 диссертационный совет принял решение присудить Салееву Артему Владимировичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов наук (по специальности рассматриваемой диссертации), участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 17, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель  
диссертационного совета

Русакович Николай Артемьевич

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Карамышева Галина Анатольевна

12 февраля 2018 г.