

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.162.02, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,
подведомственного Минобрнауки России, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 18.06.2024 № 5

О присуждении **Богомягкову Антону Викторовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени **доктора физико-математических наук**.

Диссертация «**Одночастичные эффекты, ограничивающие параметры современных источников синхротронного излучения и электрон-позитронных коллайдеров**» по специальности **1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника** принята к защите 14.03.2024 (протокол заседания № 2) диссертационным советом 24.1.162.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственного Минобрнауки России, 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, д. 11, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012.

Соискатель Богомягков Антон Викторович, «21» сентября 1977 года рождения, работает ведущим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственном Минобрнауки России.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «**Определение энергии в системе центра масс в прецизионных экспериментах на ВЭПП-4М**» защитил в 2007 году в диссертационном совете, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Секторе 1-31 и Секторе 1-33 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственного Минобрнауки России.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН Левичев Евгений Борисович, директор Центра коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук», по совместительству – заведующий объединенной лабораторией 1-3 Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Иванов Сергей Владиславович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, академик РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», директор;
2. Костромин Сергей Александрович – доктор физико-математических наук, Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина, помощник директора по реализации крупных инфраструктурных проектов;
3. Овсянников Дмитрий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Кафедра теории систем управления электрофизической аппаратурой, профессор, заведующий кафедрой

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Полозовым Сергеем Марковичем, доктором физико-математических наук, доцентом, заведующим кафедрой электрофизических установок, Ращиковым Владимиром Ивановичем, кандидатом технических наук, старшим научным сотрудником, доцентом кафедры электрофизических установок, Дюбковым Вячеславом Сергеевичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом кафедры электрофизических установок, и Кудряшовым Николаем Алексеевичем, доктором физико-математических наук, профессором, председателем Совета по аттестации и подготовке научно-педагогических кадров, указала, что диссертация А.В. Богомягкова представляет собой законченную научную работу, направленную на достижение новых научных и практических результатов в актуальной области ускорительной техники, проведенную с целью решения важных научных задач, направленных на развитие методов исследования динамики лептонных пучков в циклических ускорителях, оптимизацию магнитных структур накопителей в широком диапазоне энергий пучка от 1 до 90 ГэВ. В диссертации изложены новые научно обоснованные научно-технические решения, позволяющие создавать источники синхротронного излучения с эмиттансом лучше $100 \text{ пм}\cdot\text{рад}$ и лептонные коллайдеры с экстремальной светимостью до $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ в диапазоне энергии 2,5–3,5 ГэВ, что является важным научным достижением. Результаты, полученные в диссертации, могут быть рекомендованы для использования в ИЯФ СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ, РФЯЦ ВНИИЭФ и других организациях, разрабатывающих ускорители заряженных частиц, в том числе и в зарубежных ускорительных центрах. В целом по актуальности, новизне, научной и практической значимости диссертация А.В. Богомягкова «Одночастичные эффекты, ограничивающие параметры современных источников синхротронного

излучения и электрон-позитронных коллайдеров» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Богомяков Антон Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника за развитие методов исследования динамики пучков в циклических ускорителях и методов оптимизации магнитных структур накопителей в широком диапазоне энергий пучка.

Соискатель имеет 194 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 23 работы, из них в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные наукометрические базы данных цитирования Web of Science и Scopus, опубликовано 12 работ. Работы посвящены достижению рекордной точности измерения энергии в накопителях электронов и позитронов, проектированию коллайдеров с беспрецедентной светимостью и/или сверхвысокой энергией, разработке источников синхротронного излучения со сверхмалым (близким к дифракционному пределу) эмиттансом. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Bogomyagkov, A. Touschek lifetime and luminosity optimization for Russian Super Charm Tau factory / A. Bogomyagkov, E. Levichev, S. Sinyatkin. – Текст : электронный // Journal of Instrumentation. – 2024. – Vol. 19, nr 2. – P. P02018. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/02/P02018>. – Дата публикации: 06.02.2024.
2. Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk / G. Baranov, A. Bogomyagkov, I. Morozov [et al.]. – Текст : электронный // Physical Review Accelerators and Beams. – 2021. – Vol. 24, nr 12. – P. 120704. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704>. – Дата публикации: 28.12.2021.
3. Dynamic aperture limitation in e^+e^- colliders due to synchrotron radiation in quadrupoles / A. Bogomyagkov, S. Sinyatkin, S. Glukhov, E. Levichev. – Текст : электронный // Physical Review Accelerators and Beams. – 2019. – Vol. 22, nr 2. – P. 021001. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.021001>. – Дата публикации: 04.02.2019.
4. Dynamic Aperture of the NICA Collider Optimized with a Genetic Algorithm / A. V. Bogomyagkov, S. A. Glukhov, K. Iu. Kariukina [et al.]. – Текст : электронный // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2019. – Vol. 16, nr 1. – P. 21–29. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477119010060>. – Дата публикации: 23.04.2019.
5. Beam optics and dynamics in electron storage rings with ultralow emittance / G. N. Baranov, A. V. Bogomyagkov, K. Yu. Karyukina [et al.]. – Текст : электронный // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2016. – Vol. 13, nr 7. – P. 884–889. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477116070086>. – Дата публикации: 06.12.2016.
6. Bogomyagkov, A. Final focus designs for crab waist colliders / A. Bogomyagkov, E. Levichev, P. Piminov. – Текст : электронный // Physical Review Accelerators and Beams. – 2016. – Vol. 19, nr 12. – P. 121005. – URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.121005>. – Дата публикации: 28.12.2016.

7. Projects for ultra-high-energy circular colliders at CERN / A. V. Bogomyagkov, I. A. Koop, E. B. Levichev [et al.]. – Текст : электронный // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. – 2016. – Vol. 13, nr 7. – P. 870–875. – URL: <https://doi.org/10.1134/S154747711607013X>. – Дата публикации: 06.12.2016.
8. Bogomyagkov, A. V. Reduction of the beam emittance in the charged-particle storage rings with the help of periodic magnetic wigglers / A. V. Bogomyagkov, K. Yu. Karyukina, E. B. Levichev. – Текст : электронный // *Technical Physics*. – 2016. – Vol. 61, nr 1. – P. 119–124. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063784216010060>. – Дата публикации: 02.02.2016.
9. Final analysis of KEDR data on J/ψ and $\psi(2S)$ masses / V. V. Anashin, V. M. Aulchenko, E. M. Baldin [et al.]. – Текст : электронный // *Physics Letters B*. – 2015. – Vol. 749. – P. 50–56. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.07.057>. – Дата публикации: 28.07.2015.
10. Use of the methods of accelerator physics in precision measurements of particle masses at the VEPP-4 complex with the KEDR detector / O. V. Anchugov, V. E. Blinov, A. V. Bogomyagkov [et al.]. – Текст : электронный // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2010. – Vol. 53, nr 1. – P. 15–28. – URL: <https://doi.org/10.1134/S0020441210010021>. – Дата публикации: 04.03.2010.
11. Experiments on the physics of charged particle beams at the VEPP-4M electron-positron collider / O. V. Anchugov, V. E. Blinov, A. V. Bogomyagkov [et al.]. – Текст : электронный // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. – 2009. – Vol. 109, nr 4. – P. 590–601. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1063776109100057>. – Дата публикации: 18.11.2009.
12. Review of beam energy measurements at VEPP-4M collider: KEDR/VEPP-4M / V. E. Blinov, A. V. Bogomyagkov, N. Yu. Muchnoi [et al.]. – Текст : электронный // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2009. – Vol. 598, nr 1. – P. 23–30. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.08.078>. – Дата публикации: 23.08.2008.

Авторский вклад соискателя ученой степени в работы по теме диссертации является определяющим и заключается в следующем:

в статье 1 – в расчете и анализе источников нелинейного возмущения, выборе параметров, проектировании и оптимизации оптической структуры Супер s - t фабрики с новым расположением крабовых секступолей, расчете динамической и энергетической апертур, времени жизни пучка по эффекту Тушека;

в статье 2 – в аналитическом и численном расчете базовой ячейки ТМЕ, аналитическом и численном сравнении ячеек m ТМЕ и ТМЕ, базовой ячейки и использованной в структуре источника СИ ЦКП «СКИФ», в расчете локальной энергетической апертуры и яркости источника СИ ЦКП «СКИФ», в аналитическом расчете источника СИ с энергией пучка 6 ГэВ;

в статье 3 – в проведении численного моделирования и аналитическом анализе нелинейного движения частиц, в аналитическом решении шестимерных уравнений движения, построении теории ограничения динамической апертуры синхротронным излучением в финальных линзах, в сравнении результатов аналитических и численных расчетов;

в статье 4 – в аналитическом анализе и расчете нелинейного влияния краевых полей квадрупольных линз;

в статье 5 – в аналитическом расчете и компьютерном моделировании при сравнении ячеек TME и SM-TME, построении численной модели источника СИ на этих ячейках;

в статье 6 – в аналитическом анализе нелинейных свойств промежутка встречи коллайдеров DAΦNE, SuperKEKB, SuperB, Супер с-τ, FCC-ee, в построении нескольких численных моделей промежутка финального фокуса для коллайдера с крабовой перетяжкой, в аналитическом расчете преобразования координат до третьего порядка и численном сравнении расчетов для существующих и будущих коллайдеров с крабовой перетяжкой;

в статье 7 – в разработке оптической структуры промежутка встречи коллайдера FCC-ee с организацией столкновения пучков по схеме крабовой перетяжки;

в статье 8 – в аналитическом расчете влияния виглеров на равновесные параметры пучков, в аналитическом расчете свойств ячейки FODO;

в статьях 9, 10, 11, 12 – в аналитическом и численном анализе ошибок и неточностей определения энергии в системе центра масс в экспериментах по измерению масс J/ψ -мезона, $\psi(2s)$ мезона и массы τ лептона на коллайдере ВЭПП-4М.

В диссертации соискателя ученой степени Богомягкова А.В. отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. От официального оппонента Иванова Сергея Владиславовича, доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника, академика РАН, директора Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». В отзыве представлен обзор диссертационной работы, подчеркиваются актуальность темы исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. В отзыве имеются замечания, которые, как отмечено, относятся к оформлению, а не к сути работы и не умаляют положительные стороны диссертации. В заключительной части отзыва отмечено, что в результате проведенной работы были изучены актуальные вопросы нелинейной поперечной динамики, существенные для нового поколения кольцевых электронных накопителей (ЦКП СКИФ, Супер с-τ фабрика и FCC-ee), и изучены вопросы калибровки энергии столкновений на FCC-ee и в действующей установке ВЭПП-4М. Предложены и обоснованы современные магнитооптические решения. Разработки магнитной оптики для ЦКП СКИФ переданы в производство.
2. От официального оппонента Костромина Сергея Александровича, доктора физико-математических наук, помощника директора по реализации крупных инфраструктурных проектов Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Международной межправительственной организации Объединенного института ядерных исследований. В отзыве описано содержание диссертации, актуальность и научная новизна работы, практическая значимость полученных результатов, а также обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Отзыв содержит замечания,

не носящие принципиального характера и не снижающие общую положительную оценку работы. В заключении отмечено, что диссертация А.В. Богомякова является законченным трудом по физике и технике ускорителей и коллайдеров заряженных частиц, а по сути подробным, глубоким исследованием теории нелинейной динамики частицы в электромагнитном поле таких установок. Главным результатом работы является предложение и обоснование магнитно-оптических структур и ключевых параметров СИ ЦКП «СКИФ» и e^+e^- коллайдера «Супер с-т фабрика».

3. От официального оппонента Овсянникова Дмитрия Александровича, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой теории систем управления электрофизической аппаратурой Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет». В отзыве описывается содержание диссертации, подчеркиваются актуальность работы, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а также обоснованность и достоверность результатов исследования. В отзыве имеются замечания, которые, как отмечено, не влияют на общий вывод о диссертации и не умаляют положительные стороны диссертации. В заключении указано, что диссертационная работа А.В. Богомякова полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.
4. На автореферат поступил отзыв, подписанный Прууэлом Эдуардом Рейновичем, доктором физико-математических наук, заместителем директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук. В отзыве отмечается актуальность и новизна проведенных диссертационных исследований. Замечание, указанное в отзыве, не является определяющим в оценке автореферата и не меняет хорошего впечатления от представленной работы. Подчеркивается высокий профессиональный уровень работ соискателя и практическая значимость полученных результатов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается известностью их достижений в области физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники, их компетентностью, наличием публикаций по теме защищаемой диссертации и способностью определить научную и практическую значимость диссертационного исследования, а также дать рекомендации по использованию полученных результатов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложены методики расчета динамической апертуры без использования приближения уединенного резонанса для секступольного возмущения, динамической апертуры и нелинейных параметров для $-I$ пары секступолей с учетом их реалистичной толщины;

построена теория хроматизма оптических функций до третьего порядка;

разработана магнито-оптическая структура источника синхротронного излучения 4-го поколения ЦКП «СКИФ» со сверхмалым (близким к дифракционному пределу) горизонтальным эмиттансом $\epsilon_x=72$ пм;

предложена оптическая структура и параметры Супер s - t фабрики, позволяющие получить светимость до $L=10^{35}$ см⁻²с⁻¹ на энергиях пучка 2,5–3,5 ГэВ;

предложены параметры коллайдера FCC-ee со светимостью, увеличенной в 1,5–10 раз в разных экспериментальных режимах работы;

показано, что систематическая ошибка определения энергии в системе центра масс для экспериментов по изучению Υ мезона на ВЭПП-4М (на энергии пучка $E=4,75$ ГэВ) и для экспериментов на FCC-ee (на энергии пучка $E=45$ ГэВ и $E=80$ ГэВ) может быть уменьшена до 50 кэВ (на энергии пучка $E=4,75$ ГэВ), до 100 кэВ (на энергии пучка $E=45,6$ ГэВ) и до 500 кэВ (на энергии пучка $E=80$ ГэВ).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изучены эффекты нелинейной динамики без приближения изолированного резонанса;

изучены эффекты нелинейного хроматизма до третьего порядка;

изучен эффект ограничения динамической апертуры синхротронным излучением в финальных линзах установок на сверхвысокие энергии.

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

создана магнито-оптическая структура источника СИ 4-го поколения ЦКП «СКИФ» со сверхмалым (близким к дифракционному пределу) горизонтальным эмиттансом;

создана магнито-оптическая структура и рассчитаны параметры Супер s - t фабрики с беспрецедентной светимостью;

предложены новые параметры для коллайдера FCC-ee с большей светимостью;

определены пределы динамической апертуры в коллайдерах на сверхвысокие энергии из-за излучения в финальных линзах.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

установлено удовлетворительное согласие компьютерного моделирования с теоретическими расчетами;

использованы современные методы расчета и моделирования;

использованы сравнения данных международных установок и результатов моделирования и аналитического расчета.

Личный вклад соискателя состоит:

в непосредственном участии в создании магнито-оптических структур источника синхротронного излучения ЦКП «СКИФ», коллайдеров Супер s - t фабрика и FCC-ee;

в личном участии в обработке и интерпретации полученных результатов, компьютерном моделировании и сравнении с аналитическими расчетами;

в представлении результатов исследований на ведущих научных конференциях; в подготовке основных публикаций по теме диссертации.

В ходе защиты диссертации д.ф.-м.н. Мезенцев Н.А. задал вопрос о влиянии октуполя на динамическую апертуру по сравнению с секступолем; затем д.ф.-м.н., профессор, академик РАН Диканский Н.С. спросил о нелинейных характеристиках и об определяемой ими предельной динамической апертуре на ВЭПП-4М. Далее в процессе защиты д.ф.-м.н., профессор Аржанников А.В. попросил объяснить принцип выбора начальных условий для определения динамической апертуры. Заключительный вопрос задал д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Шатунов Ю.М., попросив уточнить предельную точность измерения массы Y мезона на ВЭПП-4М.

Соискатель Богомяков А.В. согласился с замечаниями и ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, приводя собственную аргументацию.

Диссертация Богомякова А.В. «Одночастичные эффекты, ограничивающие параметры современных источников синхротронного излучения и электрон-позитронных коллайдеров» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденном постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842.

На заседании 18.06.2024 диссертационный совет принял решение:

за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как новые научно обоснованные технологические решения для создания новых источников синхротронного излучения четвертого поколения и электрон-позитронных коллайдеров, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие ускорительной техники страны, присудить **Богомякову А.В.** ученую степень **доктора физико-математических наук**.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 19, против 0.

И.о. председателя диссертационного

совета 24.1.162.02,

д.ф.-м.н., профессор,

чл.-корр. РАН




/ Винокуров Николай Александрович /

Ученый секретарь диссертационного

совета 24.1.162.02,

д.ф.-м.н., профессор РАН



/ Лотов Константин Владимирович /

18.06.2024