

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01
(Д 002.110.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 22.12.2021г. № 33

О присуждении Пугачёвой Дарье Валерьевне, гражданке Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Лазерно-плазменное ускорение поляризованных заряженных частиц» по специальности 1.3.9 – физика плазмы принята к защите 21.10.2021г., (протокол заседания № 24) диссертационным советом Д 002.110.02 (24.1.193.01), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г. (ред. 1046/нк от 15.10.2021г.)

Соискатель Пугачёва Дарья Валерьевна 1991 года рождения, в 2015 году окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории №1.3. – теории лазерной плазмы Отдел №1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2021 году окончила очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)»

Диссертация выполнена в лаборатории №1.3. – теории лазерной плазмы Отдел №1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией №1.3. – теории лазерной плазмы Отдела №1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук
Андреев Николай Евгеньевич

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий отделом сверхбыстрых процессов Федерального исследовательского центра «Института прикладной физики Российской академии наук» Костюков Игорь Юрьевич;

- кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора лазерно-плазменной физики высоких энергий Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук» Бочкарев Сергей Геннадьевич

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва) в своем положительном заключении, составленном профессором кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова Савельевым-Трофимовым А.Б. (утвержденном 19.11.2021г.

проректором-начальником Управления научной политики МГУ им. М.В.Ломоносова Федяниным А.А.) указала, что научная значимость работы определяется в первую очередь новизной полученных результатов. Проведены важные и актуальные исследования динамики спиновой поляризации электрона при различных режимах лазерно-плазменного ускорения. Получены интересные результаты для различных способов сохранения качества сгустка заряженных частиц при многостадийном лазерно-плазменном ускорении.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, российских и международных проектах, нацеленных на получение высококачественных ультрарелятивистских электронных и позитронных сгустков заданной спин-поляризации, ускоренных с помощью лазерно-плазменных методов, в частности, в проектах XCELS, FACET и EuPRAXIA.

Соискатель имеет 9 опубликованных работ по теме диссертации в реферируемых журналах, 8 из которых из списка ВАК:

1. *Пугачёва Д. В., Андреев Н. Е.* Динамика прецессии спина релятивистского электрона при лазерно-плазменном ускорении //Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – №. 1. – С. 88-93.
2. *Pugacheva D. V., Andreev N. E., Cros B.* Laser wakefield acceleration of polarized electron beams //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2016. – Т. 774. – №. 1. – С. 012107.
3. *Пугачёва Д. В., Андреев Н. Е.* Влияние синхротронного излучения на динамику прецессии спина электрона в процессе лазерно-плазменного ускорения //Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48. – №. 4. – С. 291-294.
4. *Пугачёва Д. В., Андреев Н. Е.* О лазерно-плазменном ускорении поляризованных электронов до энергий в несколько ТэВ //Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – №. 9. – С. 826-832.
5. *Walker P. A., Pugacheva D. V., Andreev N. E. et al.* Horizon 2020 EuPRAXIA

design study //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 874. – №. 1. – С. 012029.

6. *Weikum M. K., Pugacheva D. V., Andreev N. E. et al.* EuPRAXIA—a compact, cost-efficient particle and radiation source //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – Т. 2160. – №. 1. – С. 040012.

7. *Weikum M. K., Pugacheva D. V., Andreev N. E. et al.* Status of the Horizon 2020 EuPRAXIA conceptual design study //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1350. – №. 1. – С. 012059.

8. *Assmann R. W., Pugacheva D. V., Andreev N. E. et al.* EuPRAXIA conceptual design report //The European Physical Journal Special Topics. – 2020. – Т. 229. – №. 24. – С. 3675-4284.

9. *Пугачёва Д. В., Андреев Н. Е.* Динамика характеристик электронных и позитронных пучков в лазерно-плазменном ускорителе //Вестник Объединенного института высоких температур. – 2020. – Т. 5. – №. 2. – С. 13-17

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования "Сколковский институт науки и технологий"** (доцент Центра по технологиям искусственного интеллекта PhD С.Г.Рыкованов) – отзыв положительный, с замечаниями:

- недостатком работы является узкий диапазон параметров, используемых при моделировании динамики кильватерного поля лазерного импульса. Отсутствуют оценки допустимого отклонения от используемых параметров лазерного импульса и плазмы, позволяющие понять, в каком случае справедливы полученные в работе результаты и выводы.
- на рис. 5 не хватает сравнения со случаем ввода и вывода пучка в ускорительную секцию с резкой границей плазмы.
- отсутствует явное определение эмиттанса сгустка.

2. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук»** (главный научный сотрудник лаборатории 5-12 д.ф.-м.н., профессор РАН Лотов К.В.) – отзыв положительный, без замечаний.

3. **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный исследовательский университет «МИФИ»** (д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической ядерной физики Института лазерных и плазменных технологий Попруженко С.В.) – отзыв положительный, без замечаний.

4. **Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»** (старший научный сотрудник подразделения №171 — лаборатории компьютерного материаловедения Центра фундаментальных и прикладных исследований, к.ф.-м.н. Дьячков С.А.) - отзыв положительный, с замечаниями:

- отсутствие сведений об используемых методах и схемах численного решения.
- для некоторых численных расчетов, описывающих динамику деполяризации, не хватает сопоставления с аналитическими результатами.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н. Костюков И.Ю. является ведущим ученым в области физики плазмы и лазерной физики, автор более 180 научных работ с результатами исследований сильно нелинейного режима взаимодействия лазерного излучения с плазмой, процесса самоинжекции и последующего ускорения электронов в самоорганизующихся лазерно-плазменных структурах, модели генерации электронами бетатронного излучения при лазерно-плазменном ускорении и анализа квантовых

процессов, возникающих при взаимодействии сверхсильных электромагнитных полей с веществом:

1. *Serebryakov D. A., Kostyukov I. Y.* Piecewise acceleration of electrons across a periodic solid-state structure irradiated by intense laser pulse //Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020. – Т. 62. – №. 10. – С. 104002.
2. *Pukhov A., Golovanov A., Kostyukov I.* Efficient Narrow-Band Terahertz Radiation from Electrostatic Wakefields in Nonuniform Plasmas //Physical review letters. – 2021. – Т. 127. – №. 17. – С. 175001.
3. *Samsonov A. S., Nerush E. N., Kostyukov I. Y., Filipovic M., Baumann C., Pukhov A.* Beamstrahlung-enhanced disruption in beam–beam interaction //New Journal of Physics. – 2021. – Т. 23. – №. 10. – С. 103040.

- к.ф.-м.н. Бочкарев Сергей Геннадьевич является высококвалифицированным специалистом по ускорению заряженных частиц, а именно электронов и ионов, при воздействии лазерных импульсов на плазму, автор работ по исследованию явлений неклассического переноса в столкновительной плазме:

1. *Naseri N., Bockkarev S. G., Ruan P., Bychenkov V. Yu., Khudik V., Shvets G.* Growth and propagation of self-generated magnetic dipole vortices in collisionless shocks produced by interpenetrating plasmas //Physics of Plasmas. – 2018. – Т. 25. – №. 1. – С. 012118.
2. *Ковалев В. Ф., Бочкарев С. Г., Быченков В. Ю.* Радиальное ускорение ионов при адиабатическом разлете многокомпонентной цилиндрической плазмы //Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 11. – С. 1023-1030.
3. *Вайс О. Е., Бочкарев С. Г., Тер-Аветисян С., Быченков В. Ю.* Об угловом распределении напрямую ускоренных электронов под действием мощного остророфокусированного лазерного импульса //Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 1. – С. 38-41.

- Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» является одним из крупнейших

российских научных центров. Лаборатория релятивистской лазерной плазмы кафедры общей физики и волновых процессов специализируется на проведении исследований взаимодействия мощных потоков энергии с веществом, в том числе взаимодействия излучения релятивистской интенсивности с плазмой. В лаборатории проводятся как численные, так и экспериментальные исследования по ускорению электронов и ионов в плотной плазме с использованием фемтосекундной лазерной системы с тераваттной пиковой мощностью:

1. Tsymbalov I., Gorlova D., Ivanov K., et al. Efficient electron injection by hybrid parametric instability and forward direct laser acceleration in subcritical plasma //Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2020. – Т. 63. – №. 2. – С. 022001.
2. Ivanov K. A., Gavrilin I. M., Volkov R. V., Gavrilov S. A., Savel'Ev A. B. Thicket high Z wavelength-scale structured target: advantages and limitations for laser-driven hard x-ray source and phase contrast imaging //Laser Physics Letters. – 2021. – Т. 18. – №. 7. – С. 075401.
3. Иванов К. А., Мордвинцев И. М., Каргина Ю. В., и др. Генерация рентгеновского излучения и ускорение заряженных частиц при воздействии мощного фемтосекундного лазерного импульса на массив микро-и наностолбиков //Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – №. 6. – С. 536-543.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– предложена модель, позволяющая самосогласовано рассчитывать динамику ускорения и спиновой поляризации электрона в кильватерном поле, генерируемом в плазменном канале мощным фемтосекундным лазерным импульсом;

– обнаружен эффект укорочения ускорительной фазы кильватерного поля и максимального прироста энергии для позитронов по сравнению с электронами для характерных параметров умеренно нелинейного режима лазерно-плазменного ускорения;

– проанализирован основной механизм роста слайсового эмиттанса сгустка электронов для характерных параметров умеренно нелинейного режима ускорения, показано, что основной вклад в рост эмиттанса вносит влияние нелинейной зависимости фокусирующей силы от радиуса, определены ограничения на амплитуду колебаний среднеквадратичного радиуса сгустка для минимизации влияния этого фактора;

– получен способ минимизации деполяризации электронного сгустка при вводе в ускорительную стадию и выводе из неё;

– обнаружен эффект уменьшения деполяризации электрона в процессе сильно нелинейного режима лазерно-плазменного ускорения до нескольких ТэВ при учете силы радиационного трения и отсутствие этого эффекта при умеренно нелинейном режиме ускорения;

– показано отсутствие влияния эффекта Соколова — Тернова на процесс деполяризации электрона при лазерно-плазменном ускорении до энергии в несколько ТэВ как для сильно нелинейного, так и для умеренно нелинейного режимов, несмотря на то что характерное время радиационной поляризации для электрона в кильватерных полях оказывается на несколько порядков меньше времени ускорения частицы.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– получена аналитическая формула, позволяющая описывать прецессию спина релятивистского электрона при малых энергиях;

– показаны отличия в наборе энергии, деполяризации и росте эмиттанса для электронных и позитронных сгустков при линейном и умеренно нелинейном режимах лазерно-плазменного ускорения;

– определен основной механизм роста эмиттанса электронного сгустка при умеренно нелинейном режиме лазерно-плазменного ускорения и предложены ограничения на начальные параметры сгустка, позволяющие минимизировать рост эмиттанса;

– определена динамика поляризации сгустка электронов при вводе пучка в ускорительную стадию и выводе из неё;

– показано влияние силы радиационного трения и эффекта радиационной поляризации на эволюцию характеристик поляризованных частиц в модельных полях, характерных для умеренно нелинейного и сильно нелинейного режимов лазерно-плазменного ускорения.

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

– результаты исследования условий согласования параметров электронных сгустков с полями лазерно-плазменного ускорителя и способов ввода частиц в ускорительную стадию и вывода из нее могут быть использованы при реализации различных международных проектов (таких как EuPRAXIA), нацеленных на получение высокоэнергетических пучков заряженных частиц высокого качества;

– результаты исследования процесса ускорения поляризованных электронов и позитронов в лазерно-плазменном ускорителе могут быть использованы при планировании экспериментов по физике высоких энергий на коллайдерах нового типа.

– оценки влияния синхротронного излучения на динамику лазерно-плазменного ускорения поляризованного электрона в различных режимах могут быть использованы при выборе оптимального режима ускорения на будущих установках, где планируется получать частицы с энергией в ТэВ-диапазоне.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, российских и международных проектах, в которых проводятся исследования по генерации с помощью лазерно-плазменных ускорителей ультрарелятивистских электронных и позитронных поляризованных сгустков высокого качества, в частности, в Объединенном институте высоких температур РАН, Институте прикладной физики РАН, Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Физическом институте имени П. Н. Лебедева РАН, Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, в российском

проекте XCELS, международных проектах FACET и EuPRAXIA.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что достоверность сделанных выводов и научных положений подтверждается хорошим согласием аналитических и численных результатов. Полученные результаты не противоречат существующим исследованиям и представлениям.

Личный вклад соискателя состоит в разработке блоков гибридного кода, сочетающего в себе отдельные модули с гидродинамическим подходом для описания взаимодействия лазерного импульса с плазмой и сеточными методами для описания динамики характеристик частиц. Автором были сформулированы аналитические модели, проведены вычислительные эксперименты и сделан анализ полученных результатов.

Апробация результатов исследования проводилась на 18 российских и международных конференциях. Основные публикации по выполненной работе подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. Соискатель Пугачева Дарья Валерьевна согласилась с рядом технических замечаний и ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы, приведя собственную аргументацию и обоснования.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 22.12.2021г. диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, новые научно обоснованные технические, технологические, решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, присудить Пугачевой Дарье Валерьевне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них очно: 10 докторов наук (6 - по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 4 по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника), дистанционно: 10 докторов наук (5- по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 - по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника), участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 20, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

И.О. Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., профессор

Храпак А.Г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н.



Васильев М.М.

22.12.2021г.