

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

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 14.12.2022 № 25

О присуждении **Горну Александру Андреевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «**Особенности кильватерного ускорения с протонным драйвером в радиально ограниченной плазме**» по специальности **1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника** принята к защите 30.09.2022 (протокол заседания № 19) диссертационным советом 24.1.162.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (далее – ИЯФ СО РАН), подведомственного Минобрнауки России, 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, д. 11, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012.

Соискатель Горн Александр Андреевич, «12» сентября 1994 года рождения, работает младшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственного Минобрнауки России.

В 2018 году соискатель окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет», а в 2022 году – аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет».

Диссертация выполнена в секторе 5-12 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, подведомственного Минобрнауки России.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор РАН, Лотов Константин Владимирович, главный научный сотрудник сектора 5-12 ИЯФ СО РАН.

Официальные оппоненты:

1. Бочкарев Сергей Геннадьевич – кандидат физико-математических наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук г. Москва, старший научный сотрудник;

2. Стародубцев Михаил Викторович – доктор физико-математических наук Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород, заместитель директора по научной работе

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Андреевым Николаем Евгеньевичем, доктором физико-математических наук, заведующим лабораторией Лазерной плазмы, указал, что результаты, приведенные в диссертации Горна Александра Андреевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, существенно повлияли на схему эксперимента AWAKE (The Advanced WAKEfield Experiment), изменив схему инжекции ускоряемых частиц в плазму. Кроме того, учет эффектов, связанных с конечностью радиуса плазмы, позволил добиться количественного согласия результатов моделирования и измерений в эксперименте. Диссертация Горна Александра Андреевича «Особенности кильватерного ускорения с протонным драйвером в радиально ограниченной плазме» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным в п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Горн Александр Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Соискатель имеет 20 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 16 работ в рецензируемых научных изданиях. Работы посвящены исследованию кильватерного ускорения с драйвером в виде длинного пучка заряженных частиц. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Response of narrow cylindrical plasmas to dense charged particle beams / **A. A. Gorn** [и др.] // *Physics of Plasmas*. — Текст: электронный, 2018. — Т. 25, № 063108. — DOI: 10.1063/1.5039803. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.5039803>. — Дата публикации: 06.06.2018.
2. **Gorn A. A.**, Lotov K. V. Generation of plasma electron halo by a charged particle beam in a low density plasma // *Physics of Plasmas*. — Текст: электронный, 2022. — Т. 29, № 2. — С. 023104. — DOI: 10.1063/5.0080675. — URL: <https://doi.org/10.1063/5.0080675>. — Дата публикации: 22.02.2022.
3. Acceleration of electrons in the plasma wakefield of a proton bunch / E. Adli [и др.] // *Nature*. — Текст: электронный, 2018. — Сент. — Т. 561. — С. 363. — DOI: 10.1038/s41586-018-0485-4. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0485-4>. — Дата публикации: 20.09.2018.
4. Analysis of proton bunch parameters in the AWAKE experiment / V. Hafych [и др.] // *Journal of Instrumentation*. — Текст: электронный, 2021. — Т. 16, № 11.

- P11031. — DOI: 10.1088/1748-0221/16/11/p11031. — URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/11/p11031>. — Дата публикации: 24.11.2021.
5. Proton beam defocusing in AWAKE: comparison of simulations and measurements / **A. A. Gorn** [и др.] // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. — Текст: электронный, 2020. — Т. 62. — С. 25023. — DOI: 10.1088/1361-6587/abc298. — URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/abc298>. — Дата публикации: 06.11.2020.
 6. Experimental study of extended timescale dynamics of a plasma wakefield driven by a self-modulated proton bunch / J. Chappell [и др.] // *Physical Review Accelerators and Beams*. — Текст: электронный, 2021. — Т. 24. — С. 011301. — DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.011301. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.011301>. — Дата публикации: 05.01.2021.
 7. Simulation and experimental study of proton bunch self-modulation in plasma with linear density gradients / P. I. Morales Guzmán [и др.] // *Physical Review Accelerators and Beams*. — Текст: электронный, 2021. — Т. 24. — С. 101301. — DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.101301. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.101301>. — Дата публикации: 01.10.2021.
 8. AWAKE, The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment at CERN / E. Gschwendtner [и др.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. — Текст: электронный, 2016. — Т. 829. — С. 76—82. — DOI: 10.1016/j.nima.2016.02.026. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.02.026>. — Дата публикации: 22.02.2016.
 9. Path to AWAKE: Evolution of the concept / A. Caldwell [и др.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. — Текст: электронный, 2016. — Т. 829. — С. 3—16. — DOI: 10.1016/j.nima.2015.12.050. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.12.050>. — Дата публикации: 02.01.2016.
 10. AWAKE readiness for the study of the seeded self-modulation of a 400 GeV proton bunch / P. Muggli [и др.] // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. — Текст: электронный, 2018. — Т. 60. — С. 014046. — DOI: 10.1088/1361-6587/aa941c. — URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa941c>. — Дата публикации: 29.11.2017.
 11. Experimental Observation of Proton Bunch Modulation in a Plasma at Varying Plasma Densities / E. Adli [и др.] // *Physical Review Letters*. — Текст: электронный, 2019. — Т. 122. — С. 054802. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.054802. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.054802>. — Дата публикации: 08.02.2019.
 12. Experimental Observation of Plasma Wakefield Growth Driven by the Seeded Self-Modulation of a Proton Bunch / M. Turner [и др.] // *Physical Review Letters*. — Текст: электронный, 2019. — Т. 122. — С. 054801. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.054801. — URL: —

- <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.054801>. — Дата публикации: 08.02.2019.
13. Proton-driven plasma wakefield acceleration in AWAKE / E. Gschwendtner [и др.] // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. — Текст: электронный, 2019. — Т. 377, № 20180418. — DOI: 10.1098/rsta.2018.0418. — URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0418>. — Дата публикации: 25.04.2019.
14. Proton Bunch Self-Modulation in Plasma with Density Gradient / F. Braunmuller [и др.] // *Physical Review Letters*. — Текст: электронный, 2020. — Т. 125. — С. 264801. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.264801. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.264801>. — Дата публикации: 28.12.2020.
15. Transition between Instability and Seeded Self-Modulation of a Relativistic Particle Bunch in Plasma / F. Batsch [и др.] // *Physical Review Letters*. — Текст: электронный, 2021. — Т. 126. — С. 164802. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.164802. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.164802>. — Дата публикации: 20.04.2021.
16. Experimental study of wakefields driven by a self-modulating proton bunch in plasma / (AWAKE Collaboration) [и др.] // *Physical Review Accelerators and Beams*. — Текст: электронный, 2020. — Т. 23, № 8. — DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.23.081302. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.081302>. — Дата публикации: 04.08.2020.

Вклад соискателя ученой степени в статьи по теме диссертации, где соискатель – первый автор (3 документа), является определяющим. Остальные публикации (13 документов) написаны в соавторстве с коллаборацией AWAKE. Вклад соискателя в эти работы складывается из теоретической проработки инжекции ускоряемого электронного пучка в плазму, сбора и анализа данных по измерению параметров протонного пучка в пустой плазменной секции и после самомодуляции, а также поиску согласия между результатами численного моделирования различными PIC кодами и экспериментальными измерениями. В диссертации соискателя ученой степени Горна А.А. отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных им работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. От официального оппонента Бочкарева Сергея Геннадьевича, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук. В отзыве приводится краткий обзор содержания диссертации, подчеркивается научная и практическая значимость полученных результатов для дальнейшего развития новейших методов ускорения заряженных частиц. В отзыве имеются замечания по

диссертационной работе, носящие рекомендательный характер и не снижающие общей положительной оценки работы. В заключении отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную и перспективную тему, 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 кандидата наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

2. От официального оппонента Стародубцева Михаила Викторовича, доктора физико-математических наук, заместителя директора по научной работе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук». В отзыве кратко описано содержание диссертации, подчеркиваются актуальность и научная новизна работы по исследованию особенностей ускорения заряженных частиц в радиально-ограниченной плазме с помощью длинных ультрарелятивистских пучков заряженных частиц. В отзыве имеется ряд замечаний, которые, как отмечено, не влияют на высокую оценку диссертационной работы. В заключении указано, что диссертационная работа Горна А.А. «Особенности кильватерного ускорения с протонным драйвером в радиально ограниченной плазме» 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 кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.
3. На автореферат поступил отзыв, подписанный Автаевой Светланой Владимировной, доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук. Составителем отзыва отмечается, что результаты работы могут быть использованы как в текущих экспериментах по кильватерному ускорению, таких как AWAKE, так и при проектировании будущих. В отзыве указано, что результаты исследований опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК, и обсуждались в докладах на ряде научных конференций и семинаров. Отзыв содержит ряд замечаний, не носящих принципиального характера и не снижающих высокой научной ценности диссертации и общей положительной оценки. В заключении отмечается, что представленная диссертация соответствует всем требованиям ВАК, диссертант, Горн Александр Андреевич, заслуживает присвоения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

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 **изучена** реакция радиально ограниченной плазмы на ультрарелятивистский пучок заряженных частиц. **Найдена** причина образования электронного плазменного гало при низкой плотности плазмы. **Разработана** полуаналитическая модель, способная предсказывать момент появления вылетающих за границу плазменного столба электронов. **Показано**, что осевая инжекция электронного пучка в условиях эксперимента AWAKE вслед за протонным драйвером неизбежно приводит к его разрушению вблизи входа в плазменную ячейку, в связи с чем аргументирован выбор схемы инжекции электронного пучка в плазму под некоторым углом.

Теоретическая и практическая значимость исследования обоснована тем, что впервые **проведено сравнение** результатов численного моделирования эксперимента AWAKE с помощью квазистатического осесимметричного кода LCODE с данными измерений характеристик протонного пучка после плазменной секции. **Показано** количественное согласие моделирования с экспериментом с точностью до 5%.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что полученные в диссертации результаты согласуются с экспериментальными наблюдениями и научными работами других авторов по данной тематике.

Личный вклад соискателя состоит в его непосредственном участии в постановке задачи, разработке аналитической теории, описывающей реакцию радиально-ограниченной плазмы, в выполнении всех этапов численного моделирования, сбора и анализа данных эксперимента AWAKE и проведении их сравнения с результатами моделирования.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: д.ф.-м.н., академик РАН Кулипанов Г.Н. спросил, чем ограничивается время ускорения электронов в кильватерном ускорителе с протонным драйвером, определяет ли энергетический разброс электронов долю захваченных в кильватерную волну частиц, как велика область волны, захватывающая электроны; д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Левичев Е.Б. задал вопрос, каким образом компенсируется поперечный импульс электронов при инжекции их в волну под углом; д.ф.-м.н., академик РАН Бондарь А.Е. попросил уточнить, происходит ли само модуляция протонного драйвера в отсутствие затравочного импульса; д.ф.-м.н., профессор, академик РАН Мешков О. И. спросил, можно ли несколько плазменных секций размещать последовательно; д.ф.-м.н., профессор РАН Мучной Н. Ю. попросил разъяснить выбор газа, наполняющего плазменную секцию в эксперименте, обратил внимание на слайд 22, на котором не ясно, чем отличаются нижние и верхние кривые на графиках, а также указал на чрезмерную сложность формулировки положений; д.ф.-м.н., профессор Котельников И. А. уточнил насколько далеко кильватерные ускорители находятся от конкретных применений

