

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук,
Андреева Николая Евгеньевича

о диссертации Ракитиной Марии Александровны

«Роль преплазмы мишени в задачах аномального поглощения излучения и
лазерного ускорения частиц»,

представленной на соискание ученой степени кандидата
физикоматематических наук по специальности 1.3.19 - Лазерная физика

Диссертационная работа Ракитиной Марии Александровны посвящена исследованию физики плазменной короны применительно к лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) и генерации ускоренных частиц. В рамках задач ЛТС (схема прямого облучения) крайне важно учитывать кинетические явления, возникающие в плазменной короне. Правильный учет влияния ионно-звуковой неустойчивости обратного тока на формирование плазменной короны и поглощение энергии необходим для корректного моделирования зажигания мишени. В задачах лазерного ускорения частиц понимание закономерностей формирования преплазмы и разлета вещества необходимо для управления параметрами ускоренных частиц. Таким образом, диссертация безусловно является **актуальной**. Комплексный подход, объединяющий гидродинамическое и кинетическое моделирование, открывает возможности для оптимизации взаимодействия коротких импульсов с твердотельными фольгами.

Диссертационная работа состоит из введения, включающего обзор литературы, двух оригинальных глав и заключения. Полный объем работы составляет 106 страниц с 42 рисунками. Список литературы содержит 119 наименований.

Во **введении** представлен анализ текущего состояния научных разработок по теме диссертации, раскрыта ее актуальность, научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость. Отражены сведения об апробации работы. Сформулированы цель и задачи исследования, а также основные положения, которые выносятся на защиту.

В **первой главе** проведено теоретическое исследование ионно-звуковой неустойчивости обратного тока в плазме ЛТС. Автором получено аналитическое выражение для порогового градиента температуры, при котором возникает неустойчивость. Интеграция формулы в гидродинамический код FRONT позволила оценить вклад аномального поглощения, связанного с развитием ионно-звуковой неустойчивости. Также в данной главе проводится исследование развития ионно-звуковой

неустойчивости для плазмы с двумя сортами ионов. В рамках данной задачи была продемонстрирована ограниченность приближенных выражений затухания на ионах, а также упрощенных моделей среднего и эффективного ионов. Численное решение позволило получить корректные условия развития ионно-звуковой неустойчивости, а также продемонстрировать возможность возникновения неустойчивости даже в изотермической плазме.

Во второй главе решается задача управления параметрами преплазмы для оптимизации ускорения электронов и протонов. С использованием многомерного гидродинамического кода FRONT в цилиндрической геометрии детально исследован разлет твердотельных мишеней (Al, Si, Fe, W) под действием наносекундного предимпульса. Установлено, что продольные масштабы преплазмы слабо зависят от материала и толщины мишени, что указывает на ограниченные возможности управления преплазмой. Важным результатом является демонстрация ключевой роли трехмерных эффектов и более точного уравнения состояния для корректного описания динамики мишени.

На основе полученных гидродинамических профилей автором проведена серия трехмерных кинетических (PIC) расчетов ускорения частиц. Показано, что эффективность ускорения электронов и протонов зависит не только от градиента плотности преплазмы, но и от положения точки фокусировки основного импульса. Наиболее эффективное ускорение достигается при выполнении условий релятивистского самозахвата лазерного импульса на растущем профиле плотности. Полученные теоретические результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными, приведенными в работе.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть непосредственно использованы при планировании экспериментов на современных и перспективных лазерных установках (включая проекты РФЯЦ-ВНИИТФ, ИЦФМ и XCELS). Предложенные подходы к оптимизации параметров мишени и фокусировки позволяют повысить эффективность генерации высокоэнергетичных электронов, протонов и вторичного гамма-излучения.

Новизна заключается в том, что в диссертации впервые предложен уточненный критерий возникновения ионно-звуковой неустойчивости в плазме с одним сортом ионов, что позволило корректно учесть аномальное поглощение в гидродинамических расчетах нагрева мишени в условиях лазерного термоядерного синтеза. Кроме того, установлено, что управление точкой фокусировки лазерного импульса на профиль преплазмы позволяют

увеличить максимальную энергию протонов при выполнении условий релятивистского самозахвата лазерного импульса.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных теоретических моделей и численных кодов, а также хорошим совпадением результатов моделирования ускорения протонов с данными эксперимента.

Тем не менее, по диссертационной работе имеются замечания:

1. При численном моделировании нагрева мишени лазерным излучением с учетом аномального поглощения при развитии ионно-звуковой неустойчивости предполагается, что при превышении порога неустойчивости сразу возникает аномальное поглощение в режиме насыщения неустойчивости. Такая приближенная модель предполагает определенное соотношение между временем развития неустойчивости и шагом по времени гидродинамического расчета. Условие применимости такой модели и влияние временного шага расчета на полученные результаты не обсуждены достаточно полно.
2. В диссертации не описаны использованное уравнение состояния и модель ионизации вещества мишени с полнотой, необходимой для определения корректности полученных конкретных результатов.
3. Интересный и важный результат по влиянию трехмерности разлета мишени на характеристики плазмы, образованной под действием наносекундного предимпульса, следовало на основе полученных результатов моделирования дополнить оценками размера пятна фокусировки и длительности импульса, при которых трехмерные эффекты становятся определяющими.

Диссертация Ракитиной Марии Александровны является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей решение важных задач в области лазерной физики, связанных с влиянием преплазмы на поглощение лазерного излучения и ускорение заряженных частиц. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, и неоднократно докладывались на международных и российских конференциях. Текст диссертации оформлен в соответствии с требованиями ВАК, а автореферат корректно отражает основное содержание и результаты диссертационного исследования.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Ракитина Мария Александровна, заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией Теории лазерной плазмы
Объединенного института высоких температур РАН,

Андреев Николай Евгеньевич.

27.04.2026

125412, Россия, г. Москва,
ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, ОИВТ РАН
Тел. +7(916) 521-67-32, эл. почта: andreev@ras.ru

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора, заведующего лабораторией
Теории лазерной плазмы Андреева Н.Е. заверяю:

Ученый секретарь

Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Объединенного института
высоких температур Российской академии наук
доктор физ.-мат. наук

А.Д. Киверин

Список основных публикаций официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Андреева Н.Е. по тематике диссертации Ракитиной М.А. «Роль преплазмы мишени в задачах аномального поглощения излучения и лазерного ускорения частиц» за последние 5 лет:

1. M. Salvadori, G. Di Giorgio, M. Cipriani, M. Scisciò, C. Verona, P. L. Andreoli, G. Cristofari, R. De Angelis, M. Pillon, N. E. Andreev, P. Antici, N. G. Borisenko, D. Giulietti, M. Migliorati, O. Rosmej, S. Zähler and F. Consoli. Time-of-flight methodologies with large-area diamond detectors for ion characterization in laser-driven experiments //High Power Laser Science and Engineering. – 2022. – Т. 10. – С. e6.
2. Shen X. F., Pukhov A., Rosmej O. N., Andreev N. E.. Cross-filament stochastic acceleration of electrons in kilojoule picosecond laser interactions with near-critical-density plasmas //Physical Review Applied. – 2022. – Т. 18. – №. 6. – С. 064091.
3. Кузнецов С. В., Умаров И. Р., Андреев Н. Е. Лазерно-плазменный инжектор ультракороткого сгустка электронов //Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53. – №. 3. – С. 194-199.
4. Андреев Н. Е., Умаров И. Р., Попов В. С. Яркие источники ультрарелятивистских частиц и гамма-квантов для междисциплинарных исследований //Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53. – №. 3. – С. 236-241.
5. Вейсман М. Е., Умаров, И. Р., Пугачёва, Д. В., Андреев, Н. Е. Многокаскадное лазерно-плазменное ускорение ультракоротких сгустков электронов и позитронов //Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53. – №. 2. – С. 182-188.
6. Pukhov A., Andreev N. E., Golovanov A. A., Artemenko I. I., Kostyukov I. Y. . Laser-Plasma Wake Velocity Control by Multi-Mode Beatwave Excitation in a Channel //Plasma. – 2023. – Т. 6. – №. 1. – С. 29-35.
7. Andreev N. E., Umarov I. R., Popov V. S. Intense laser sources of gamma radiation and neutrons based on high-current beams of super-ponderomotive electrons //Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – Т. 17. – №. 4. – С. 848-854.
8. P. Tavana, N. Bukharskii, M. Gyrdymov, U. Spillmann, S. Zähler, J. Cikhardt, N. G. Borisenko, Ph. Korneev, J. Jacoby, C. Spielmann, N. E. Andreev, M. M. Günther, O. N. Rosmej. Ultra-high efficiency bremsstrahlung production in the interaction of direct laser-accelerated electrons with high-Z material //Frontiers in Physics. – 2023. – Т. 11. – С. 1178967.
9. J. Cikhardt, M. Gyrdymov, S. Zähler, P. Tavana, M. M. Günther; N. Bukharskii, N. Borisenko, J. Jacoby, X. F. Shen, A. Pukhov, N. E. Andreev, O. N. Rosmej. Characterization of bright betatron radiation generated by direct laser acceleration of electrons in plasma of near critical density //Matter and radiation at extremes. – 2024. – Т. 9. – №. 2.
10. M. Gyrdymov, J. Cikhardt, P. Tavana, N.G. Borisenko, S.Yu. Guskov, R.A.

- Yakhin, G.A. Vegunova, W. Wei, J. Ren, Y. Zhao, D.H.H. Hoffmann, Z. Deng, W. Zhou, R. Cheng, J. Yang, J. Novotny, X. Shen, A. Pukhov, J. Jacoby, C. Spielmann, V.S. Popov, M.E. Veysman, N.E. Andreev & O.N. Rosmej. High-brightness betatron emission from the interaction of a sub picosecond laser pulse with pre-ionized low-density polymer foam for ICF research //Scientific Reports. – 2024. – Т. 14. – №. 1. – С. 14785.
11. Rosmej O. N., Gyrdymov, M., Andreev, N. E., Tavana, P., Popov, V., Borisenko, N.G., Gromov, A.I., Gus'kov, S.Yu., Yakhin, R., Vergunova, G.A., Bukharskii, N., Korneev, P., Cikhardt, J., Zähler, G., Bush, S., Jacoby, J., Pimenov, V.G., Spielmann C., & Pukhov, A., Advanced plasma target from pre-ionized low-density foam for effective and robust direct laser acceleration of electrons //High Power Laser Science and Engineering. – 2025. – Т. 13. – С. e3.
12. Вейсман М. Е., Попов, В. С., Кузнецов, С. В., Умаров, И. Р., Андреев, Н. Е. Сильноточные пучки релятивистских электронов при прямом лазерном ускорении в плазме околоритической плотности //Квантовая электроника. – 2025. – Т. 55. – №. 1. – С. 60-68.