

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Костюкова Игоря Юрьевича

на диссертационную работу

Спицына Романа Игоревича

«Исследование механизмов разрушения плазменной кильватерной волны с помощью контроля потоков энергии в численном моделировании»,

представленную в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

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

наук,

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Актуальность темы диссертационного исследования. Плазменные методы ускорения заряженных частиц в настоящее время представляют собой одно из самых быстроразвивающихся направлений в физике ускорителей. Основным преимуществом таких методов является возможность получить очень высокие градиенты ускорения, недоступные в традиционных ускорителях. Потенциально «плазменные» ускорители способны заменить многокилометровые коллайдеры нового поколения и сделать компактными мощные источники жесткого электромагнитного излучения. В настоящее время в экспериментах продемонстрировано ускорение электронов в лазерной плазме до энергии более 10 ГэВ и удвоение энергии электронного пучка с энергией 42 ГэВ в результате плазменно-пучкового взаимодействия, а также генерацию релятивистских электронных сгустков с зарядом свыше 1 мкКл. Однако для практического применения данных методов нужно решить много задач, связанных с инжекцией электронов в ускоряющую плазменную структуру, с оптимизацией процесса ускорения, с точным описанием динамики драйвера и т.д. Таким образом, диссертация Спицына Р. И. **безусловно является актуальной.** В работе помимо этих задач обсуждаются эксперименты в рамках проекта AWAKE в ЦЕРНе и возможные эксперименты на разрабатываемой установке суб-экзаваттного класса XCELS.

Общая характеристика диссертации. Материал диссертации представлен в трех главах, содержит введение, заключение и список использованных источников, включающий 44 наименования.

Во **Введении** представлен обзор последних результатов в области плазменного ускорения электронов, обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость исследования, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена численной модели ускорения электронов в плазме. Данная модель является основой оригинального кода LCODE, разработанного в ИЯФ СО РАН. Модель использует квазистатическое приближение. Это позволяет значительно сократить время моделирования и уменьшить требования на вычислительные ресурсы. Однако некоторые

важные кинетические эффекты нельзя аккуратно учесть в этом приближении. Большое внимание уделено численному моделированию распространения лазерного импульса в плазме. Разработанная модель позволяет рассчитать потоки энергии частиц и потоки электромагнитной энергии в области моделирования. Данная опция может быть использована для контроля сохранения энергии при моделировании с необходимой точностью. Проведено численное моделирование ускорения электронов в плазменном канале для параметров установки XCELS. Показано, что для корректного описания истощения лазерного импульса в модели с огибающей импульса пространственный шаг в продольном направлении должен быть много меньше лазерной длины волны.

Вторая глава посвящена исследованию опрокидывания плазменной (кильватерной) волны, возникающей позади лазерного или пучкового драйвера. Данная задача имеет важное значение для многих приложений. В диссертационной работе задача рассматривается в контексте генерации квазимонохроматического терагерцового излучения двумя лазерными импульсами в плазме. В квазилинейном режиме время жизни плазменной волны большое, и в этом случае необходимо учитывать ионную динамику. Более того, в рассматриваемой задаче она является ключевым фактором, приводящим к опрокидыванию волны. В диссертационной работе показано, что анализ потоков энергии можно использовать для определения момента опрокидывания. Найдена зависимость характерного времени опрокидывания от массы иона и представлено простое объяснение обнаруженной зависимости.

В **третьей главе** исследуется опрокидывание плазменной волны в приложении к экспериментам в рамках проекта AWAKE. Проект AWAKE (Advanced WAKEfield Experiment) в ЦЕРНе (Европейская организация по ядерным исследованиям) является одним из самых амбициозных экспериментов в области плазменного ускорения. В экспериментах используется пучок протонов в качестве драйвера (вместо лазерного импульса или электронного сгустка) для создания кильватерной волны в плазме и ускорения электронов. Плазма создается коротким лазерным импульсом,двигающимся соосно с протонным сгустком, и имеет вид цилиндра относительно небольшого радиуса. Часть электронов, образующих плазменную волну, может вылетать за пределы плазменного цилиндра. Это приводит к возникновению электронного гало. В главе дано подробное описание экспериментов AWAKE, а также динамики гало, рассчитанной в численном моделировании. Подход на основе анализа потоков энергии и энергообмена использован для характеристики разрушения плазменной волны. Показано, что значительная часть энергии плазменной волны уносится электронами гало. Обнаружен эффект линзирования электронов гало, приводящий к тому, что такие электроны, возвращаясь в плазму, преимущественно попадают в ускоряющую фазу плазменной волны. Это приводит к ускоренному затуханию волны и ее разрушению. Продемонстрировано, что основную роль в поглощении энергии плазменной волны играют электроны, вылетающие относительно недалеко за пределы плазмы.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты и выводы.

Научная новизна положений и результатов. Новизна научных результатов представлена в четырех пунктах и включает: создание вычислительного модуля, интегрированного в программный код LCODE, для расчета динамики лазерного импульса; разработку метода контроля потоков энергии электромагнитного поля и частиц плазмы; использование этого метода для определения времени жизни плазменной волны и выявления механизма разрушения волны в радиально ограниченной плазме.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для планирования экспериментов в рамках проекта AWAKE на базе ускорительного комплекса ЦЕРН, на лазерных установках PERAL (Россия), на разрабатываемой суб-экзаваттной установке XCELS (Россия) и др., а также создания ярких лазерно-плазменных источников жесткого электромагнитного излучения и вторичных частиц.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечена использованием проверенных кодов, сравнением с аналитическими оценками и известными экспериментальными данными.

К диссертационной работе можно сформулировать следующие **замечания и вопросы**:

1. Хотелось бы видеть в диссертационной работе подробный вывод уравнения (1.15), взятого за основу для описания эволюции лазерного импульса в плазме. Почему в правой части уравнения используется отношение усредненной плотности плазмы к усредненному гамма-фактору электронов плазмы, а не среднее от полного выражения, являющегося отношением плотности к гамма-фактору?
2. В работе точность моделирования разработанным модулем эволюции лазерного импульса в плазме определяется на основе анализа выполнения законов сохранения энергии в области моделирования. Однако помимо энергии лазерный импульс характеризуется и другими важными параметрами, например, геометрическими размерами. Поэтому для верификации разработанного модуля хотелось бы увидеть сравнения результатов моделирования с аналитической теорией в предельных случаях и с результатами численного моделирования стандартным PIC кодом.
3. В работе предложен метод контроля потоками энергии в области моделирования для определения момента опрокидывания плазменной волны. Предполагается, что опрокидывание происходит, когда заметно меняется поток энергии. Каковы условия применимости данного метода? Как будет работать метод в случае неоднородной плазмы или при быстрой эволюции лазерного импульса, приводящей к эволюции параметров плазменной волны (в том числе потока энергии) без ее опрокидывания?
4. При исследовании динамики электронов гало в радиально ограниченной плазме был обнаружен эффект линзирования. В диссертационной работе представлено качественное и недостаточно полное объяснение. Было бы неплохо представить простую количественную модель эффекта, описать, как происходит поперечная и продольная (по отношению к оси распространения драйвера) динамика электронов гало. По-видимому, имеется ввиду, что основное ускорение производится продольными силами внутри плазменной волны вблизи к оси распространения, в то время как линзирование происходит на радиальной периферии волны, и в нем участвуют и радиальные поля. Почему при этом происходит группировка электронов преимущественно в ускоряющей фазе не очень понятно.

Перечисленные замечания и вопросы не снижают общую высокую оценку работы и носят рекомендательный характер для дальнейшего развития тематики исследования.

Полученные в ходе работы над диссертацией **результаты прошли необходимую апробацию**, были представлены на многочисленных всероссийских и международных конференциях и опубликованы в 7 статьях в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ и индексируемых международными базами Scopus и Web of Science. Результаты диссертации могут быть использованы в таких научных центрах как ИОФ РАН, ФТИ РАН, ИПФ РАН, ФИ РАН, МГУ, МИФИ, НГУ и других.

Автореферат соответствует содержанию и структуре диссертации, адекватно отражает полученные в работе результаты. Согласно целям и задачам диссертационной работы, используемым методам исследования и полученным результатам, тема диссертации соответствует специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Заключение по работе. Диссертационная работа Р. И. Спицына «Исследование механизмов разрушения плазменной кильватерной волны с помощью контроля потоков энергии в численном моделировании» является законченной научно-квалификационной работой. По актуальности решаемых задач, новизне и масштабу проведенных исследований, совокупности полученных результатов, их научной и практической значимости представленная диссертационная работа соответствует всем требованиям к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Спицын Роман Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Костюков Игорь Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Спицына Романа Игоревича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
Костюков Игорь Юрьевич
Доктор физико-математических наук (01.04.08 – Физика плазмы),
Член-корреспондент РАН,
Специальность 01.04.08 «Физика плазмы»,
адрес: 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46
тел: +7 (831) 4164831
эл. почта: kost@ipfran.ru
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной
физики Российской академии наук»
Заведующий отделом сверхбыстрых процессов

«04» июня 2026 г.


И.Ю. Костюков

Подпись И.Ю. Костюкова заверяю
Ученый секретарь ИПФ РАН


И.В. Корюкин

МП

