

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук,
заведующего отделом сверхбыстрых процессов (330), ФГБНУ
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук»
Костюкова Игоря Юрьевича
на диссертационную работу Пугачёвой Дарьи Валерьевны
«Лазерно-плазменное ускорение поляризованных заряженных частиц»
на соискание учёной степени кандидата физико-математических по
специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Диссертация Пугачевой Д.В. посвящена исследованию возможностей применения лазерно-плазменных методов для ускорителей лептонов сверхвысокой энергии. Целями диссертационной работы являлись: (i) описание динамики поляризации частиц при ускорении на длинных трассах, (ii) анализ и оптимизация ускорения в многостадийных ускорителях, (iii) учет радиационных потерь при ускорении частиц до сверхвысокой энергии. Для достижения целей работы был решен ряд задач с использованием аналитическим методов и специально разработанных численных моделей.

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения, и списка литературы, включающего 136 наименований.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели работы, описаны новизна и практическая значимость выполненных исследований, перечислены выносимые на защиту положения, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора.

В качестве отдельной главы в диссертации представлен **Обзор литературы** по лазерно-плазменному ускорению электронов. Несмотря на то, что по данной тематике уже опубликованы тысячи работ, Пугачевой Д.В. удалось в краткой форме представить основные результаты в этой области, а также описать эти результаты в их историческом развитии. Приведенный обзор оставляет приятное впечатление благодаря ясному и систематичному изложению.

Первая глава посвящена исследованию динамики спина электрона при его ускорении в поле кильватерной плазменной волны. В начале главы сформулированы уравнения, описывающие генерацию кильватерной волны в плазменном канале мощным лазерным импульсом. В свою очередь, свойства решений данных уравнений для кильватерного потенциала использованы для вывода уравнений, описывающих динамику спина релятивистского электрона, движущегося в поле кильватерной волны. В приближении постоянного ускоряющего поля найдены аналитические решения уравнений, описывающих прецессию спина. Найдены оптимальные параметры, соответствующие минимальной деполяризации точечного электронного сгустка. Найденные аналитические результаты находятся в хорошем

согласии с результатами самосогласованного численного моделирования методом частиц.

Одной из возможностей, позволяющих достигнуть сверхвысокой энергии ускоряемых частиц, является многостадийное ускорение. Особенности многостадийного ускорения с помощью лазерно-плазменных методов исследуются во **второй главе**. Показано, что основной вклад в рост эмиттанса ускоряемого сгустка частиц вносит перемешивание фаз бетатронных колебаний отдельных частиц под действием фокусирующих сил со стороны плазменного поля. Для сохранения эмиттанса желательно инжектировать частицы в области, где фокусирующая сила линейно зависит от расстояния частиц до оси канала. Продемонстрировано, что в случае умеренного нелинейного режима ускорение позитронов не так эффективно, как для электронов. В результате исследований обнаружено, что для сохранения параметров сгустка при его инжектировании в ускорительную стадию и при выводе из нее необходимо добиться плавного изменения кильватерных полей на периоде бетатронных колебаний.

При ускорении частиц сверхвысокой энергии сильное влияние начинают оказывать радиационные потери. Для плазменных ускорителей данные потери вызваны бетатронными колебаниями частиц под действием фокусирующих сил, приводящие к генерации бетатронного излучения в синхротронном режиме. Исследованию влияния генерации бетатронного излучения на набор энергией частицей при ускорении, а также на динамику спина посвящена **третья глава** диссертационной работы. Показано, что генерация излучения приводит к подавлению деполяризации пучка и к уменьшению темпа набора энергии. Обнаружено, что эффект Соколова — Тернова оказывает незначительное влияние на процесс деполяризации для плазменных ускорителей.

Актуальность проведенных исследований не вызывает сомнений. В последнее время лазерно-плазменные методы ускорения электронов демонстрируют впечатляющий прогресс. В экспериментах энергия электронов превысила 8 ГэВ, что всего в несколько раз ниже значений, достигаемых в стандартных радиочастотных ускорителях. В настоящее время в мире реализуется несколько масштабных международных проектов, таких как FACET, EuPRAXIA и др. Вместе с тем, проекты электрон-позитронных коллайдеров, основанных на радиочастотных ускорителях, столкнулись с серьезными трудностями, связанными с большими финансовыми затратами, которые необходимы для их реализации. Таким образом, лазерно-плазменные методы привлекают к себе большое внимание как возможная более дешевая альтернатива радиочастотным ускорительным структурам, используемых в коллайдерах. В этом случае необходимо исследовать особенности лазерно-плазменного ускорения при сверхвысокой энергии частиц, чему и посвящена в значительной степени данная диссертационная работа.

Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и их достоверность подтверждаются численным моделированием методом

частиц, публикацией результатов в рецензируемых изданиях из списка ВАК, а также представлением результатов на российских и международных конференциях. **Новизна** научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертации, несомненна, что также подтверждается их публикацией в рецензируемых журналах. Более того, необходимо отметить, что работы Пугачевой Д.В. явились одними из первых, где исследовалась динамика спина при ускорении частиц в кильватерных полях.

Разработанные модели могут быть использованы при реализации международных проектов и разработке ускорителей высокой энергии, что подтверждает **научную и практическую значимость** результатов работы Пугачевой Д.В. Следует, также отметить, что **личный вклад** соискателя в результаты диссертационной работы является определяющим (Пугачева Д.В. представлена первой в списке авторов статей по теме диссертации).

Диссертация правильно оформлена, имеет ясную и логически-обоснованную структуру. Текст **авторреферата** правильно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации хорошо обоснованы. Вместе с тем она не лишена и недостатков, которые можно сформулировать в виде **замечаний** и комментариев:

1. В обзоре литературы мало внимания уделено исследованиям спиновой динамики и деполяризации пучков при кильватерном ускорении, проводимым в последнее время другими научными группами. Среди таких групп можно отметить: группу проф. К. Кайтеля из Института ядерной физики Макса Планка (Гейдельберг, Германия), группу проф. А. Пухова из университета Дюссельдорфа, группу проф. Л. Л. Цзи из Института оптики и точной механики (Шанхай, Китай), группу проф. Ч. Джоши из Университета Калифорнии (США).
2. В тексте диссертации не указано определение эмиттанса, использованное при расчетах. Существуют геометрическое (через площадь эллипсоида в фазовом пространстве, содержащего значительную долю частиц) и статистическое среднеквадратичное (через моменты функции распределения) определения. Кроме того, существуют варианты статистического эмиттанса в импульсном пространстве (где используются моменты $\langle x^2 \rangle$ и $\langle p_x^2 \rangle$) или следовом пространстве (где используются моменты $\langle x^2 \rangle$ и $\langle x'^2 \rangle$), причем в обоих случаях можно ввести нормализованный и ненормализованный эмиттансы. В статистическом определении нормировочная константа в определенной степени так же произвольна, поэтому в разных работах можно встретить разные нормировки; в данной работе она так же не указана, что затрудняет интерпретацию абсолютных значений эмиттанса.
3. На стр. 65 со ссылкой на работу [107] говорится о наличии зависимости динамики деполяризации от динамики эмиттанса. Учитывая, что целью диссертации являлось исследование динамики поляризованных сгустков, то в проведенном в разделе 2.1 исследовании динамики слайсового эмиттанса было бы уместным продемонстрировать данную зависимость для параметров, использованных в диссертации.

4. В комментарии к рисунку 2.14 сказано: «При этом аналитическая кривая (2.13) достаточно хорошо описывает конечную величину деполяризации после ускорения в первой стадии, однако не может быть использована для оценки скачкообразных изменений деполяризации в последующих стадиях». Из рисунка 2.14 кажется, что совпадение аналитической кривой с моделированием во всех трех стадиях примерно одинаковое и не очень хорошее. Данное утверждение требует дополнительных пояснений.

5. В разделе 2.4, где исследуется динамика поляризации электронного и позитронного пучков при ускорении в умеренно нелинейной волне, берутся электронный и позитронный пучки с одинаковыми параметрами, рассчитанными таким образом, чтобы эмиттанс электронного пучка оказался согласован с начальным фокусирующим полем. При этом данная величина эмиттанса не является согласованной для позитронного пучка, что приводит к резкому росту его эмиттанса при ускорении. Более уместным было бы проводить исследование для пучков, эмиттанс каждого из которых согласован с соответствующими начальными полями.

6. Данный вопрос связан с предыдущим. В выводах в пункте 3 сказано «Величина фокусирующей силы, действующей на частицы в точке инжекции в окрестность максимума ускоряющего поля, отличается для позитронных и электронных сгустков, что приводит к необходимости индивидуального подбора начальных согласованных параметров пучков.» Дальше в этом же пункте говорится: «Величина деполяризации позитронных и электронных пучков одинакова при равной длине ускорения в обоих режимах.» Но утверждение о равной величине деполяризации сделано для пучков с несогласованными параметрами, поэтому оно, видимо, является просто частным случаем и может не быть справедливо в случае «индивидуального подбора начальных согласованных параметров пучков», учитывая представленный в диссертации аргумент, что одинаковая величина достигается за счет взаимной компенсации эффектов увеличения эмиттанса (вызванного несогласованностью) и сокращения набранной при ускорении энергии. Поэтому создается впечатление, что данные утверждения в выводах частично противоречат друг другу.

7. При первом упоминании эффекта Соколова — Тернова в диссертации говорится, что его суть заключается в самополяризации пучков вдоль направления однородного постоянного магнитного поля за счет синхротронного излучения. При этом в кильватерной волне нет однородного постоянного магнитного поля, а в формуле (3.10) для оценки времени поляризации пучка без объяснения используется не напряженность магнитного поля, а величина ускоряющего градиента в кильватерной волне. В тексте диссертации стоило бы более подробно объяснить смысл эффекта Соколова — Тернова применительно к ускорению в кильватерной волне и причину, по которой в оценках возможно использовать величину ускоряющего градиента.

8. В формуле, связывающей производную по времени импульса и производную по времени скорости и представленной в тексте сразу после

формулы (1.17), допущена ошибка: вектор $d\mathbf{p}/dt$ должен содержать два слагаемых (вдоль $d\boldsymbol{\beta}/dt$ и $\boldsymbol{\beta}$).

9. Встречаются недочеты в оформлении диссертации.

9а) В подписи к рисунку 3.2 речь идет от 3 сплошных кривых, в то время как на рисунке представлена одна сплошная кривая и две прерывистые.

9б) На рисунке 3.5 лучше было бы изобразить огибающую колебаний, поскольку из-за малости периода колебаний в выбранном масштабе кривые представляют собой заштрихованные области, почти полностью перекрывающие друг друга, что не дает возможности полноценно сравнить кривые между собой.

9с) Работа содержит ряд грамматических ошибок и опечаток: «прицессии», «в следствие взаимодействия», «газонаполненном», «в независимости от выполнения условий», «сплошной линей» и т.д.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы, ее научной значимости и новизны. Оценивая работу в целом, следует отметить, что она выполнена на высоком научном уровне и демонстрирует важный вклад соискателя в разработку обсуждаемых проблем. Таким образом, диссертация представляет собой законченную научную работу, которая полностью соответствует требованиям специальности 1.3.9 - «физика плазмы», удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24.09.2013 г. (ред. 01.10.2018 г.), а ее автор Пугачева Дарья Валерьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 - «физика плазмы».

Официальный оппонент, заведующий отделом сверхбыстрых процессов (330), Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН); 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46; тел. +7(903) 043-82-75, www.ipfran.ru, kost@ipfran.ru; доктор физико-математических наук (научная специальность — 01.04.08 - «Физика плазмы») Костюков Игорь Юрьевич.

Подпись Костюкова И.Ю. заверяю
Ученый секретарь ИПФ РАН
к.ф.-м.н.



Костюков
Костюков И.Ю.
2021 года

Корюкин
Корюкин И.В.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

Телефон: +7(831) 436-41-87

e-mail: dir@ipfran.ru