

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию МИНАКОВА Владимира Алексеевича

«ОСОБЕННОСТИ УСКОРЕНИЯ ПУЧКОВ В ПЛАЗМЕННОЙ КИЛЬВАТЕРНОЙ ВОЛНЕ ДЛИННОГО МОДУЛИРОВАННОГО ДРАЙВЕРА»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.9 Физика плазмы и 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Электроны высоких энергий (от нескольких ГэВ до ТэВ) нужны для изучения фундаментальных вопросов физики высоких энергий, для создания вторичных источников частиц и излучения, а также могут применяться в медицине. Основной способ получения таких пучков – ускорители, использующие высокочастотные резонаторы. В последнее десятилетие наблюдается бурное развитие альтернативы высокочастотным ускорителям – технологии плазменного кильватерного ускорения электронов. В «обычных» ускорителях из-за возможного пробоя практически невозможно создать электрическое поле с напряженностью более 100 МВ/м. Однако в плазме поле не ограничено полем пробоя на поверхности резонатора – в экспериментах получены плазменные волны с напряженностью поля на два порядка больше. В случае возбуждения плазменной волны драйвером, движущимся со скоростью, близкой к скорости света, релятивистские электроны могут двигаться почти синхронно с плазменной волной, долго оставаясь в ускоряющем поле. В настоящее время наиболее перспективными драйверами считаются лазерные импульсы и протонные пучки. В частности, в демонстрационном эксперименте AWAKE, использующем для возбуждения плазменной волны протонный пучок синхротрона SPS (ЦЕРН), продемонстрировано ускорение электронов до 2 ГэВ на трассе длиной 10 м.

Плазменным ускорителям с протонным драйвером предстоит пройти долгий путь от демонстрационных экспериментов до реального применения. Существует множество сложных явлений, сопровождающих подобное ускорение. Например, возбуждение волны в них возможно только благодаря самомодуляции протонного драйвера, длительность которого многократно превосходит длину плазменной волны. В случае достаточно плотного драйвера плазменная волна может возбуждаться в нелинейном режиме, что может ограничить ее амплитуду. Помимо продольной самомодуляции, протонный драйвер эволюционирует и в поперечном направлении. Такая эволюция происходит, в том числе, на вакуумном промежутке – в случае использования двух плазменных секций. Ускоряемый пучок электронов и движение ионов также могут оказывать влияние на возбуждаемую плазменную волну. Подобные явления (и многие другие) должны быть изучены для улучшения качества и увеличения энергии получаемого электронного пучка.

Работа В.А. Минакова, по большей части, посвящена моделированию экспериментов по ускорению электронов в плазменной волне, возбуждаемой протонным драйвером, и последующему анализу различных эффектов, сопровождающих ускорение. Автор ориентируется, прежде всего, на параметры, близкие к параметрам эксперимента AWAKE, однако стоит отметить, что ряд полученных результатов носит общий характер.

В первой главе диссертации описаны использовавшиеся в работе численный код и физические модели. Вторая глава посвящена исследованию зависимости амплитуды плазменной волны от различных параметров. Определена чувствительность амплитуды волны к изменению плотности плазмы, к изменению длины, радиуса, углового разброса и других характеристик протонного драйвера. Объяснены физические механизмы,

приводящие к полученным в численном моделировании зависимостям амплитуды кильватерной волны от параметров драйвера. Найдены пороговые значения заряда пучка и эмиттанса: при дальнейшем увеличении заряда или при уменьшении эмиттанса рост амплитуды волны существенно замедляется.

Во третьей главе впервые с использованием численного моделирования продемонстрирован эффект роста эмиттанса ускоряемого электронного пучка, вызванный флуктуациями фокусирующей силы в плазменном кильватерном ускорителе. Обнаруженный эффект особенно сильно должен проявляться в варианте эксперимента AWAKE, использующем две плазменные секции, разделенные вакуумным промежутком, на котором происходит инжекция электронов. В этой схеме в первой плазменной секции происходит самомодуляция протонного драйвера, а в следующей – ускорение электронов.

В четвертой главе демонстрируется усиление ускоряющего поля, вызванное движением ионов плазмы. Показано, что причиной эффекта является достаточно сложное перераспределение энергии плазменной волны в пространстве. Описанный эффект увеличивает коэффициент трансформации энергии драйвера в энергию ускоряемого электронного пучка. Следует отметить новизну эффектов, описанных в третьей и четвертой главе диссертации.

Отмеченные результаты работы В.А. Минакова имеют большое значение для экспериментов по кильватерному ускорению электронов с использованием протонного драйвера, подобных эксперименту AWAKE. Таким образом, работа В.А. Минакова является актуальной, а разнообразие применений ускоренных электронов придает ей высокую практическую значимость. Стоит отметить, что результаты численного моделирования, приведенные в работе, находятся в хорошем соответствии с предсказаниями теории, что подтверждает достоверность полученных результатов. Численный код, использовавшийся автором, был апробирован также в других работах, в том числе, при сопоставлении результатов моделирования и результатов реальных экспериментов. Основные результаты исследования опубликованы в значительном количестве статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (*Physics of Plasmas*, *Plasma Physics and Controlled Fusion* и другие), а также были представлены автором на международных конференциях. Особо стоит отметить участие автора в коллаборации AWAKE с публикациями в таких журналах, как *Physical Review Letters* и *Nature*, что подтверждает высокую практическую значимость результатов работы.

Должен отметить некоторые недостатки. При обсуждении эффекта роста эмиттанса в схеме с двумя плазменными секциями не вполне ясна роль численного шума, очевидно, присутствующего в моделировании. Возможно, численный шум, аналогично флуктуациям фокусирующего поля, может приводить к росту эмиттанса. На мой взгляд, стоило провести еще одно моделирование задачи, сделанное с еще меньшим шагом численной сетки. При анализе эффекта усиления ускоряющего поля, который связан с движением ионов, возможно, стоило рассмотреть помимо полной плотности потока энергии еще и отдельные ее составляющие (ионную, электромагнитную). Возможно, это позволило бы лучше понять эффект усиления ускоряющего поля. Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы.

Оценивая диссертационную работу В.А. Минакова, считаю, что она является законченным научным трудом, посвященным актуальной проблеме плазменного ускорения электронов с использованием протонного драйвера. Полученные результаты являются новыми и актуальными, а основные выводы и научные положения обоснованы и корректны.

Диссертация В.А. Минакова удовлетворяет всем требованиям ВАК при Минобрнауки России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук. Работа выполнена на высоком научном уровне, и прошла апробацию в виде публикаций в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК. Результаты работы представлялись на нескольких международных конференциях. Тема диссертации соответствует специальностям 1.3.9 Физика плазмы и 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Автореферат достаточно полно отражает основные положения диссертации.

Диссертационная работа В.А. Минакова «Особенности ускорения пучков в плазменной кильватерной волне длинного модулированного драйвера» 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, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.9 Физика плазмы и 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Неруш Евгений Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Минакова Владимира Алексеевича, и их дальнейшую обработку.

Кандидат физ.-мат. наук (01.04.08 – физика плазмы),
старший научный сотрудник отдела сверхбыстрых процессов
Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной
физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)
адрес: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46
e-mail: nerush@appl.sci-nnov.ru

тел.: +7 (906) 363-39-55

17 марта 2022 г.

 / Неруш Евгений Николаевич

Подпись Неруша Е.Н. заверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН

 / Корюкин И. В.

