

## Отзыв официального оппонента

На диссертационную работу Анненкова Владимира Вадимовича  
"Электромагнитная эмиссия в тонкой пучково-плазменной системе",  
представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.08 – "Физика плазмы".

В последние годы наблюдается значительный прогресс в экспериментах на открытых магнитных ловушках, результаты которых позволяют по-новому оценить дальнейшие перспективы подобных систем. Одной из особенностей таких открытых магнитных систем является возможность инжекции в плазму мульти-гигаваттных электронных пучков. Конверсия даже малой доли их мощности в излучение (на уровне нескольких процентов) открыла бы возможность генерации ТГц импульсов с рекордной гигаваттной мощностью. Этот факт позволяет рассматривать такие пучково-плазменные системы как перспективные источники электромагнитного (ЭМ) излучения для различных приложений. В частности, в экспериментах на многопробочной открытой ловушке ГОЛ-3 при использовании суб-релятивистского электронного пучка с энергией 100 кэВ и током 20-100 А была продемонстрирована неожиданно высокая для турбулентной плазмы эффективность генерации ЭМ волн. Отличительной особенностью этих экспериментов от обычного режима с килоамперными пучками была относительно низкая плотность плазмы ( $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ), в результате чего диаметры инжектируемого пучка и ионизируемого им плазменного канала оказывались сравнимыми с длинами плазменных колебаний и излучаемых ЭМ волн. Поскольку физические процессы в тонкой плазме идут иначе, чем в безграничной, то изучение механизмов генерации излучения в такой тонкой пучково-плазменной системе является важной физической задачей. Ее решение позволит не только объяснить наблюдаемый в экспериментах высокий уровень ЭМ эмиссии с эффективностью конверсии мощности суб-релятивистского пучка порядка 1%, но и позволит создать аналогичные источники ЭМ излучения с использованием более плотных и релятивистских пучков с большим энергосодержанием. Представляется, что такие генераторы будут способны работать с более высокой плотностью плазмы. Это сделает возможным реализацию длительной и эффективной генерации терагерцового излучения, область применения которого стремительно растёт в последние годы.

Таким образом, целью автора диссертационной работы было определение основных механизмов эффективной генерации электромагнитного излучения, наблюдавшегося в экспериментах по инжекции электронного пучка в тонкую замагниченную плазму на установке ГОЛ-3 и разработка новых схем генерации ТГц излучения высокой мощности.

В результате работы Анненков В.В. обнаружил новый высокоэффективный механизм генерации электромагнитного излучения электронным пучком, распространяющимся в тонком плазменном канале с модулированной плотностью (механизм пучково-плазменной антенны). Для его описания была предложена упрощённая аналитическая теория, релевантность которой подтверждена с помощью численного моделирования. Диссертант также разработал численную модель, базирующуюся на методе частиц в ячейках. Эта модель позволила изучать процессы при длительной непрерывной инжекции пучка частиц в замагниченную плазму, а также детально исследовать генерируемое в такой системе электромагнитное излучение, что, в свою очередь, позволило продемонстрировать реализуемость механизма пучково-плазменной антенны в открытой системе плазма-пучок и возможность генерации с его помощью излучения на второй гармонике плазменной частоты. Диссертантом установлено, что продольная модуляция плотности плазмы, играющая ключевую роль в механизме плазменной антенны, может нарастать самосогласованно как результат развития модуляционной неустойчивости доминирующей пучковой волны и приводить к генерации электромагнитного излучения с высокой эффективностью. В представленной работе на основе метода частиц в ячейках впервые проведено численное моделирование инжекции электронного пучка в тонкую замагниченную плазму при параметрах и масштабах реального эксперимента на установке ГОЛ-3. Установлен возможный сценарий релаксации пучка в этих условиях и показано доминирование механизма пучково-плазменной антенны при генерации ЭМ излучения на гармониках плазменной частоты. Кроме того, впервые показана возможность генерации мощного ТГц излучения с высокой эффективностью на второй гармонике плазменной частоты встречными электронными пучками, возбуждающими продольные плазменные волны разного поперечного профиля, а также обнаружено, что одинаковые встречные пучки с высокой плотностью могут генерировать излучение, приобретая различную поперечную форму за счёт филаментации.

Хотя исследованный в данной работе новый механизм генерации ЭМ излучения специфичен для относительно тонкой плазмы, размеры которой сопоставимы с длиной волны излучения, результаты исследований позволяют не только интерпретировать конкретные лабораторные пучково-плазменные эксперименты на открытых ловушках, но и указывают путь к созданию эффективных источников ЭМ волн. Частота излучения в этих источниках привязана не к циклотронной, а к плазменной частоте, что может оказаться более предпочтительно в терагерцовом диапазоне, где циклотронные механизмы требуют создания сильных магнитных полей.

Диссертация содержит Введение, четыре главы основного материала и Заключение.

Во Введении приводится обзор научной литературы по механизмам генерации ЭМ излучения в плазме с электронными пучками, обоснована актуальность темы диссертации и формулируются цель и задачи работы.

В первой главе изучается генерация электромагнитных волн тонкой пучково-плазменной системой с типичным поперечным размером, сравнимым с длиной волны излучения. В результате проведенного анализа показано, что ЭМ излучение, генерируемое в тонкой пучково-плазменной системе с близким к оптимальному поперечным размером, адекватно описывается механизмом пучково-плазменной антенны. Это означает, что предлагаемая модель генерации ЭМ излучения может быть использована для оценки максимальной мощности излучения, достижимой в процессе пучково-плазменного взаимодействия при условиях реального лабораторного эксперимента.

Во второй главе приводятся результаты анализа процессов ЭМ эмиссии, которые впервые изучаются в рамках реалистичной задачи о непрерывной инжекции релятивистского электронного пучка через границу плазмы. Обнаружено, что предложенная ранее теоретическая модель, основанная на механизме плазменной антенны, адекватно описывает ЭМ эмиссию из открытой системы плазма-пучок с типичной шириной, сравнимой с длиной волны излучения. Численные эксперименты по инжекции пучка в предварительно модулированную плазму демонстрируют, что мощность ЭМ излучения на плазменной частоте может достигать 5-10% от полной мощности пучка. Кроме того показано, что в такой системе возможен процесс слияния доминирующей пучковой волны и её длинноволнового сателлита, возникающего при рассеянии на периодическом возмущении ионной плотности. Этот процесс приводит к генерации излучения на второй гармонике с эффективностью порядка 0.4%. Также обнаружено, что продольная модуляция плотности плазмы, играющая ключевую роль в антенном механизме, может формироваться самосогласованно вследствие модуляционной неустойчивости пучковой волны с высокой амплитудой. Показано, что даже если наиболее быстро нарастающее возмущение плотности изначально не приводит к возбуждению сверхсветовых сателлитов, поздняя нелинейная стадия модуляционной неустойчивости сопровождается захватом колебаний плазмы отдельными ямами плотности, в которых длина волны плазменных колебаний совпадает с размером ямы и условие эффективного излучения выполняется автоматически.

В третьей главе впервые приводятся результаты PIC моделирования непрерывной инжекции в плазму тонкого суб-релятивистского электронного пучка при параметрах лабораторного эксперимента на открытой ловушке ГОЛ-3 и демонстрируется принципиальная возможность генерации в этих условиях ЭМ излучения вблизи плазменной частоты и её второй гармоники с суммарной мощностью, составляющей несколько процентов от мощности инжектируемого пучка. Проведённые исследования позволяют объяснить механизм релаксации пучка в этих экспериментах и качественно интерпретировать их результаты.

В четвёртой главе исследуется возможность эффективной реализации в плазме с электронными пучками недавно обнаруженного механизма генерации ЭМ излучения на удвоенной плазменной частоте встречными плазменными волнами с различной поперечной

структурой, который был впервые исследован для случая сталкивающихся коротких лазерных импульсов. Показано, что благодаря непрерывной накачке встречные пучковые волны способны сохранять свои амплитуды на высоких нелинейных уровнях в течение длительного времени и могут возбуждаться в плазме гораздо более эффективно, чем в лазерной схеме. Приводятся результаты моделирования сталкивающихся пучков низкой плотности с различными поперечными размерами.

В Заключении перечислены основные результаты работы.

### **Замечания по работе.**

1. В первой главе приводятся оценки мощности излучения тонкой пучково-плазменной системой в простейшем случае (формулы (1.5) – (1.13)). Рассмотрение ограничивается черенковским механизмом излучения. Поскольку система находится во внешнем магнитном поле, возможно, было бы разумным обсудить эффективность и роль нормального и аномального эффекта Доплера. Отметим, что важная роль этих эффектов подчеркивается в книге Гинзбурга «Теоретическая физика и астрофизика» (М.: Наука, 1981 с.503) и работе Кузелева, Рухадзе в сб. «Проблемы теоретической физики и астрофизики» (М.: Наука, 1989 с.70). Представляется, что также было бы уместным обсудить влияние кинетических эффектов на величину и диаграмму направленности ЭМ излучения.
2. В выражение (1.6) для нелинейной плотности тока электронов входит величина «дельта n» (глубина модуляции плотности ионов). Является ли появление ионной плотности в выражении для электронного тока следствием квази-нейтральности плазмы?
3. В главе 1.2 диссертантом упомянут параллельный 2D3V код. Для меня осталось непонятным, является ли этот код широко используемым, или он разработан автором работы (при его активном участии).
4. В главе 2.3.2 первые две строки являют собой «реликт», от которого диссертант забыл избавиться при редактировании.
5. В главе 2.3.2 обсуждается процесс генерации второй гармоники. Поскольку – это эффект более высокого порядка (слияние пучковой волны и волны рассеяния на регулярной структуре плотности), то его эффективность, казалось бы, должна быть меньше, чем эффективность генерации первой гармоники (модуляция пучковой волны регулярной структурой плотности). Однако, на рис. 2.6в амплитуды электрических полей на частоте первой гармоники значительно меньше, чем на второй гармонике. В чем причина такого поведения?
6. В главе 4 обсуждается механизм ЭМ эмиссии вблизи удвоенной плазменной частоты в случае слияния встречных плазменных колебаний с одинаковыми волновыми векторами и различным поперечным распределением. Возможность реализации этого механизма генерации излучения

показана численно. Остается открытым вопрос, возможно ли получить аналитические выражения (оценки), описывающие этот эффект?

Указанные замечания и приведенные вопросы не меняют общей положительной оценки данной диссертационной работы. Можно констатировать, что диссертация Анненкова Владимира Вадимовича весьма актуальна и выполнена на высоком научном уровне. Ее результаты докладывались на крупных международных конференциях. По ним опубликованы 4 научные работы в ведущих рецензируемых изданиях мирового уровня, включая работы в научных журналах из перечня ВАК РФ. Полученные результаты не только представляют интерес для интерпретации лабораторных экспериментов по релаксации тонкого электронного пучка на установке ГОЛ-3, но и создают необходимый теоретический базис для разработки мощных узкополосных источников суб-ТГц и ТГц излучения.

Считаю, что диссертационная работа вполне соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор настоящего диссертационного исследования Анненков Владимир Вадимович безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – "Физика плазмы".

Доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук (ФТИ им. Иоффе)  
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26  
Тел. 8 (812) 297-22-45  
Моб. +7-(906) 277-80-72  
e-mail: a.popov@mail.ioffe.ru

Попов Алексей Юрьевич  
12 ноября 2019 г.

Подпись А.Ю. Попова заверяю  
и.о. ученого секретаря ФТИ им. Иоффе  
к.ф.м.н.



М.И. Патров