

Отзыв

Официального оппонента на диссертацию Тимофеева Игоря Валерьевича «Генерация терагерцового излучения при коллективных взаимодействиях электронных и лазерных пучков с плазмой», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08. – физика плазмы.

Диссертация Тимофеева И. В. посвящена классической задаче физики плазмы — взаимодействию электронов и электромагнитного излучения с плазмой. Что касается взаимодействия электронов с плазмой, то данная задача восходит еще к работам основоположника современной физики плазмы И. Ленгмюра, который и ввел термин «плазма» в научный лексикон. В частности, в 1929 г. он наблюдал явление (которое также называется «парадокс Ленгмюра»), состоящее в том, что быстрые электроны при прохождении плазменного слоя теряли свою энергию на значительно меньших расстояниях, чем это следовало из модели, основанной на рассеянии быстрых электронов на частицах плазмы. Фактически, явление, наблюдавшееся Ленгмюром, в значительной степени обусловлено процессами перекачки энергии электронного пучка в различные плазменные колебания. Исследованию, в том числе и таких процессов, посвящена данная диссертационная работа.

Несмотря на то, что изучение взаимодействия пучков заряженных частиц и излучения с плазмой ведется почти столетие, а пик экспериментальных и теоретических исследований приходится на 1960-1970 гг., к данной проблеме остается значительный интерес. Это вызвано как нерешенностью многих важных вопросов, так и ролью, которую играет такое взаимодействие в различных приложениях: в физике газового разряда и плазменной обработке материалов, в схемах управляемого термоядерного синтеза с магнитным и инерционным удержанием, в космической плазме, в плазменных методах ускорения заряженных частиц и генерации излучения в труднодоступных областях электромагнитного спектра т. д. Основное внимание в диссертации как раз уделяется генерации мощного электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне, которой относительно слабо освоен. Поэтому тематику диссертационной работы Тимофеева И. В. и исследуемые в ней задачи следует признать **актуальными** и важными.

Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и их достоверность подтверждаются, в частности, численным моделированием методом частиц и экспериментами на установке ГОЛ-3, результаты которых соответствуют представленным положениям. **Новизна** научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертации, несомненна. Предложенные в диссертационной работе объяснения экспериментальных результатов, а также плазменные схемы источников терагерцового излучения, подтверждают **научную и практическую значимость** результатов работы

Тимофеева И.В. Следует, также отметить, что **личный вклад** И.В. Тимофеева в результаты диссертационной работы был определяющим.

Исследование, представленное в диссертации, обоснованно начинается с наиболее простого, линейного режима взаимодействия электронного пучка с плазмой, когда нелинейными эффектами можно пренебречь. Линейный режим взаимодействия обсуждается в **первой главе**, где основным объектом исследования является дисперсионное уравнение, описывающее плазменнопучковые колебания во внешнем магнитном поле. Несмотря на то, что в данном режиме многими эффектами можно пренебречь, и исследование сводится к поиску и анализу корней алгебраического уравнения, серьезное продвижение в данном вопросе удалось получить лишь сравнительно недавно. Дело в том, что само уравнение имеет довольно сложный вид и представляет собой бесконечный, плохо сходящийся ряд, что сильно затрудняет даже численное решение уравнения. Недавний прогресс, в значительной мере обусловленный работами соискателя, связан как с использованием интегрального представления для бесконечной суммы членов ряда, так и с разработкой быстрых и эффективных алгоритмов для численного решения уравнения. В первой части главы на основе общего кинетического подхода исследована задача о взаимодействии моноэнергетического пучка в горячей замагниченной плазме. Показано, что тепловой разброс частиц инжектируемого в плазму пучка приводит к более эффективной стабилизации неустойчивых мод, чем тепловой разброс плазменных частиц. Также продемонстрировано, что даже для малых нерелятивистских температур плазмы гидродинамический подход может привести к некорректному результату. Во второй части главы исследована пучковая неустойчивость в замагниченной плазме со значительным хвостом надтепловых электронов. Показано, что наличие хвоста еще сильнее подавляет неустойчивость, в том числе значительно уменьшая инкремент наиболее быстрой продольной неустойчивости.

Во **второй главе** с помощью двухмерной численной модели на основе метода PIC (particle-in-cell, метод частиц в ячейках) исследовано взаимодействие пучка малой плотности с плазмой в присутствии магнитного поля. Показано, что развитие неустойчивостей приводит к захвату пучка и разбиению его на сгустки, локализованные как в продольном, так и в поперечном направлении. На поздней стадии в результате нелинейного взаимодействия между модами происходит перекачка энергии из первоначально неустойчивых мод в коротковолновые колебания с малыми углами распространения. В результате моделирования обнаружено, что при наличии слабого магнитного поля нелинейное взаимодействие между модами ослабляется. В случае сильного магнитного поля спектр вторичных колебаний сильно модифицируется, в результате чего энергия передается косым волнам, а поток энергии направлен в основном поперек внешнего магнитного поля.

Во второй части главы предложена полуфеноменологическая модель сильной турбулентности, хорошо описывающая особенности плазменно-

пучкового взаимодействия, наблюдаемые в экспериментах на установке ГОЛ-3 и в численном PIC моделировании. Модель предполагает, что значительная часть электромагнитной энергии может содержаться в длинноволновых колебаниях плазмы в области источника и в колебаниях, запертых в плазменных кавернах. Последние в результате коллапса способны генерировать короткие, но заметные вспышки излучения.

В третьей части главы рассматривается влияние надтепловых электронов из хвоста функции распределения на дисперсионные характеристики плазмы и на динамику модуляционной неустойчивости. Данная задача является весьма актуальной, поскольку подобные распределения электронов наблюдаются как в космической плазме, так и во многих лабораторных экспериментах. Для анализа влияния надтепловых электронов была введена модельная изотропная функция распределения. При малых значениях импульсов она близка к максвелловской, а при больших - спадает по степенному закону. Причем основная часть кинетической энергии электронов сосредоточена в хвосте функции распределения. В качестве характеристик теплового движения были введены эффективная температура, описывающая все распределение, и температура ядра, характеризующая основную холодную часть электронной подсистемы. В работе были выведены дисперсионные уравнения и декременты затухания ленгмюровских и ионно-звуковых колебаний для модельной функции распределения. Показано, что дисперсионное уравнение ленгмюровских колебаний в пределе больших длин волн может быть получено в рамках гидродинамического подхода, где в качестве температуры используется эффективная температура всего распределения, а дисперсионное уравнение для ионно-звуковых колебаний может быть выведено в рамках кинетического приближения, где в качестве температуры используется температура ядра распределения. Полученные результаты использованы для анализа модуляционной неустойчивости, которая является необходимой стадией на пути образования плазменных каверн. Показано, что наличие надтепловых электронов приводит к сужению спектра модуляционной неустойчивости, при этом значение максимального инкремента и величина соответствующего ему волнового вектора практически не меняются.

Исследованию особенностей генерации электромагнитного излучения вблизи первой и второй гармоник плазменной частоты в турбулентной плазме посвящена **третья глава** диссертационной работы. Данное исследование представляет значительный интерес не только из-за возможного использования излучения в различных приложениях, но и в диагностических целях, поскольку такое излучение иногда является единственным источником информации о плазменных процессах, протекающих как в космических, так и в лабораторных объектах. В работе предполагается, что длинные импульсы электромагнитного излучения вблизи второй гармонике плазменной частоты образуются в результате слияния верхнегибридных колебаний, а кратковременные вспышки такого излучения возникают в результате коллапса отдельных плазменных каверн. Предложенная модель позволила

предсказать уровни мощности излучения и его поляризационные свойства, наблюдаемые в экспериментах на установке ГОЛ-3.

После того как в экспериментах на установке ГОЛ-3 была продемонстрирована генерация излучения на гармониках плазменной частоты, а в диссертационной работе были построены соответствующие модели, естественным продолжением исследований является поиск схем с более высокой эффективностью генерации узконаправленного излучения, в том числе в терагерцовом диапазоне. Этому вопросу посвящена **четвертая глава**. В диссертации обсуждаются, в частности, два механизма, один из которых основан на конверсии мод на градиентах плотности плазмы, а другой - на взаимодействии двух встречных электронных пучков в плазме. Последний двухпучковый механизм генерации второй гармоники плазменной частоты исследован как для случая ограниченной плазмы, так и для случая неограниченной плазмы. Показано, что основную роль в генерации излучения играет трёхволновой процесс слияния колебаний, резонансных с пучком.

В рамках первого механизма исследован как случай крупномасштабных флуктуаций плотности плазмы, так и случай, когда плотность плазмы заметно меняется на масштабах, сравнимых с длинами волн плазменных колебаний. Проанализированы четыре схемы: однородная плазма с резкой границей, неоднородная плазма с плавным поперечным градиентом плотности, плазма с продольным градиентом плотности и схема, в которой длина волны продольного возмущения плотности плазмы совпадает с длиной волны неустойчивой пучковой моды. Последняя схема показала наиболее высокую эффективность генерации.

Для анализа схем генерации была построена модель плазменной антенны, учитывающая конечные размеры области взаимодействия, и которая показала хорошее согласие с результатами численных расчетов. Найдены оптимальные для генерации размеры области плазменно-пучкового взаимодействия.

В последней **пятой главе** анализ двухпучкового механизма генерации и модель плазменной антенны, представленные в предыдущей главе, были использованы для исследования генерации излучения в плазме в поле распространяющихся на встречу друг другу двух мощных лазерных импульсов. Фактически, вместо пучков в качестве драйверов, раскачивающих плазменные колебания, предлагается использовать короткие лазерные импульсы. В диссертационной работе рассмотрены три схемы перекрытия лазерных импульсов в области взаимодействия, позволяющие внести асимметрию, необходимую для генерации излучения: сдвиг точки фокусировки лазерных импульсов друг относительно друга в продольном направлении, в поперечном направлении, а также разные углы фокусировки импульсов. Наиболее эффективной оказалась схема со смешенными в продольном направлении фокусами. Частота излучения может перестраиваться за счет изменения плотности плазмы и соответствующего изменения длительности лазерных импульсов. Разработана аналитическая

модель генерации, находящаяся в хорошем согласии с результатами PIC моделирования. Как показывают расчеты, предложенная схема позволяет генерировать терагерцовое излучение гигаваттного уровня мощности в узкой полосе частот ($\sim 1\%$).

Вышеизложенное составляет содержание пяти основных глав диссертации. Диссертационная работа также содержит **введение** с кратким обзором литературы, с формулировками целей, актуальности и основного содержания работы. В **заключении** сформулированы основные результаты. Диссертация правильно оформлена.

Следует отметить, что плазменно-пучковое взаимодействие в присутствии внешнего магнитного поля представляет собой очень сложный объект исследования. Даже начальная линейная стадия взаимодействия изобилует многочисленными режимами и особенностями, поэтому исследование ее далеко от завершения. Если же говорить о нелинейной стадии взаимодействия, то строгий анализ ее, стартующий из первых принципов, возможен, видимо, лишь с помощью численных моделей. В этом случае большую роль для понимания происходящих в плазме процессов, а также для интерпретации и предсказания результатов экспериментов играют полуфеноменологические модели. Построение таких моделей представляет собой очень трудоемкое занятие, близкое, в некотором смысле, к искусству, поскольку оно требует анализа многочисленных упрощенных теоретических моделей, экспериментальных данных и результатов численного моделирования, а также обобщения результатов анализа, формулирования адекватных гипотез и положений, лежащих в основе разрабатываемой модели. В рамках своей диссертационной работы соискателю, проявившему изобретательность и творческий подход, удалось построить несколько таких моделей, добившись при этом неплохого согласия с экспериментом.

Диссертация Тимофеева И. В. выглядит как добротное, достоверное и завершенное исследование, в котором исследованы различные режимы плазменно-пучкового взаимодействия. На основе результатов исследования предложены эффективные схемы генерации терагерцового и субтерагерцового излучения. Результаты диссертации хорошо обоснованы. Вместе с тем она не лишена и недостатков, которые можно сформулировать в виде вопросов и комментариев:

1. Инкременты неустойчивостей в плазменно-пучковой системе с внешним магнитным полем в рамках линейно теории исследовалось в огромном количестве работ. Хотелось бы увидеть сравнение вычисленных в первой главе с помощью разработанной соискателем численной модели инкрементов с работами других авторов, хотя бы в каких-то предельных случаях. Можно ли проверить полученные в первой главе результаты с помощью PIC моделирования?
2. Результаты для дисперсионных соотношений плазменных колебаний и модуляционной неустойчивости в немаксвелловской плазме получены для конкретного модельного распределения электронов по энергии. Хотелось бы в диссертационной работе увидеть обсуждение, насколько сильно

полученные результаты зависят от вида распределения, и, в частности, от показателя степени, описывающего убывание спектра надтепловых электронов.

3. В диссертационной работе для исследования сложных плазменных явлений используется двухмерная численная модель. Представляется, что следует более подробно обсудить применимость моделей низкой размерности к описанию процессов в реальных системах.

4. Исследование пучковой неустойчивости с помощью двумерного PIC кода, представленное во второй главе, проведено для одного набора параметров пучка и плазмы (при нескольких значениях магнитного поля). Для того чтобы судить об универсальности найденных в результате исследования особенностей динамики пучковой неустойчивости и правил перекачки энергии между модами, а также об условиях применимости полученных результатов, следовало бы провести исследование в более широком диапазоне плазменно-пучковых параметров.

5. Одним из важных эффектов, который, как подчеркивается в диссертационной работе, определяет релаксацию пучка в плазме, является перекачка энергии между различными модами плазменно-пучковой системы. Помимо нелинейных механизмов перекачки, рассмотренных в диссертации, возможны механизмы, обусловленные трансформацией мод из-за неоднородности магнитного поля. Обсуждение влияния неоднородностей магнитного поля, которые всегда имеют место в реальных системах, в диссертационной работе отсутствует.

6. В третье главе предложена простая модель для оценки свойств ЭМ излучения из турбулентной плазмы, сформированной в результате взаимодействия с электронным пучком. Несмотря на то, что модель достаточно грубая и основана на некоторых упрощающих предположениях (длинноволновая область источника равномерно заселена колебаниями верхнегибридной ветви, излучение генерируется в результате рассеяния колебаний на флуктуациях плотности плазмы и нелинейного слияния с образованием ЭМ волны на суммарной частоте и т.д.), ее предсказания находится в хорошем согласии с экспериментом. Тем не менее, экстраполяция этой модели в область более плотной плазмы (и на терагерцовый диапазон для выходящего излучения) требует более надежного обоснования. Возможно ли моделирование генерации излучения методом частиц в ячейках, используемое в других главах диссертационной работы?

7. Главы 4 и 5 диссертационной работы посвящены различным плазменным схемам источников терагерцового излучения. Важной характеристикой источника излучения является диаграмма направленности и, в частности, характерная ширина лепестков диаграммы. В работе такая диаграмма и оценка для ее ширины не приводятся, хотя в обоих главах говорится об «узконаправленных» источниках излучения.

8. Пятая глава, где рассматривается лазерно-плазменное взаимодействие, выглядит несколько инородным элементом диссертационной работы, которая почти на 90% посвящена плазменно-пучковому взаимодействию.

9. В главе 5 для генерации терагерцового излучения предложена схема на основе распространяющихся навстречу друг другу мощных лазерных импульсах. Экспериментаторы не очень любят такие схемы, поскольку они чреваты повреждением оптических элементов. Будет ли работать подобная схема, если между прямыми, вдоль которых распространяются импульсы, существует небольшой угол?

10. Встречаются описки и несущественные неточности изложения. Например, на стр. 167 вместо слово «электронов» написано с ошибкой «элетеонов».

Отмеченные недостатки не умаляют достоинств диссертационной работы, оценивая которую в целом, следует отметить, что она выполнена на высоком научном уровне и демонстрирует важный вклад соискателя в разработку обсуждаемых проблем. Полученные Тимофеевым И.В. результаты опубликованы в большом числе статей в рецензируемых журналах, докладывались на многих российских и международных конференциях, известны научной общественности. Диссертация Тимофеева И. В. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Диссертационная работа полностью соответствует требованиям специальности 01.04.08 - «физика плазмы», а автореферат соответствует содержанию диссертации

Таким образом, диссертация Тимофеева И.В. удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а **соискатель достоин присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 - «физика плазмы»**.

Доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник

И. Ю. Костюков

Подпись И.Ю. Костюкова заверяю
Ученый секретарь
Института прикладной физики РАН
кандидат физико-математических наук

И. В. Корюкин

25 июля 2018 г.

