

На правах рукописи



Анненков Владимир Вадимович

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭМИССИЯ В ТОНКОЙ
ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОЙ СИСТЕМЕ**

01.04.08 — физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ТИМОФЕЕВ Игорь Валериевич – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ПОПОВ Алексей Юрьевич – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, старший научный сотрудник.

ЦАП Юрий Теодорович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный, заведующий лабораторией.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится «6» декабря 2019 г. в «10:00» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и на сайте www.inp.nsk.su/images/diss/Annenkov_disser.pdf

Автореферат разослан «16» октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П. А. Багрянский

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В последние годы наблюдается значительный прогресс в экспериментах на открытых магнитных ловушках [1; 2], позволяющий по-новому оценивать реакторные перспективы подобных систем [3]. Одним из способов подавления электронной теплопроводности, представляющей собой основной канал потерь энергии из установки, является возбуждение плазменной турбулентности с использованием электронных пучков [4]. Показателем эффективности развития турбулентных процессов может являться электромагнитное (ЭМ) излучение плазмы вблизи гармоник плазменной частоты. Однако для эффективного использования данных радиометрической диагностики турбулентной плазмы необходимо достаточно подробное теоретическое понимание происходящих в ней процессов. Первым шагом на пути к интерпретации ЭМ излучения, генерируемого в пучково-плазменных экспериментах на установке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН), стала теоретическая модель [5], в которой предполагалось, что значительный вклад в излучение на второй гармонике плазменной частоты должны давать процессы слияния длинноволновых верхнегибридных колебаний из так называемой области источника сильнотурбулентного спектра. Оказалось, что данная модель правильно описывает не только уровень мощности наблюдаемого излучения, но и характер его поляризации.

Открытые магнитные системы допускают инжекцию в плазму мультигигаваттных 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 ЭМ излучения для различных приложений в науке и технике.

Для эффективной конверсии мощности пучка в мощность излучения необходимо избегать перехода в турбулентный режим, приводящий к нагреву плазмы. В данный момент на установке ГОЛ-ПЭТ (ИЯФ СО РАН) ведутся эксперименты по исследованию ЭМ эмиссии за счёт линейной конверсии пучковых мод плазменных колебаний на квази-регулярных градиентах плотности плазмы [6; 7].

С другой стороны, недавние эксперименты по инжекции длинного субрелятивистского электронного пучка с энергией 100 кэВ и током 20-100 А в замагниченную плазму на многопробочной открытой ловушке ГОЛ-3 [8] продемонстрировали неожиданно высокую для турбулентной плазмы эффективность генерации ЭМ волн. По оценкам авторов, только в окрестности удвоенной плазменной частоты мощность ЭМ излучения достигала 1% от мощности пучка. Отличительной особенностью этих экспериментов от обычного режима с килоамперными пучками была низкая плотность плазмы ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$), благодаря которой диаметры инжектируемого пучка и ионизируемого им плазменного ка-

нала (< 1 см) оказывались сравнимыми с длинами плазменных колебаний и излучаемых ЭМ волн.

Физические процессы в тонкой плазме идут иначе, чем в безграничной. В такой плазме не только инкремент нарастания плазменных колебаний вследствие развития двухпотоковой неустойчивости отличается от случая широкой плазмы, но и максимальная амплитуда этих волн оказывается иной. Кроме того, в ограниченной тонкой плазме изменяется и возможный спектр плазменных колебаний: возбуждение косых неустойчивостей затруднено из-за малого поперечного размера среды, что приводит к доминированию в спектре преимущественно продольных колебаний. Этот факт позволяет сделать динамику системы плазма-пучок более регулярной. Иначе в такой плазме протекают и известные процессы слияния ленгмюровских волн и их рассеяния на возмущениях плотности плазмы. Существенным отличием от случая безграничной плазмы является отсутствие запрета на лобовое слияние электростатических волн в электромагнитную за счёт того, что вместо собственных электромагнитных плазменных мод в процессе участвуют вакуумные ЭМ волны.

Одним из механизмов генерации излучения в плазме с электронным пучком является трёхволновой процесс слияния первоначальных пучковых мод плазменных колебаний со встречными волнами, возникающими после заполнения нерезонансной части спектра за счёт нелинейных процессов. В результате наблюдается излучение вблизи удвоенной плазменной частоты. Этот механизм отличается низкой эффективностью ЭМ эмиссии, поскольку значительная доля мощности пучка уходит на нагрев плазмы, а не на генерацию излучения. Однако экспериментально было показано [9–11], что в случае инжекции в плазму двух встречных нерелятивистских пучков эффективность генерации электромагнитного излучения значительно возрастает. Это обусловлено возможностью слияния возбуждаемых пучками встречных косых ленгмюровских волн с высокой спектральной плотностью в поперечную электромагнитную волну. Однако остаётся открытым вопрос, насколько эффективен такой механизм для плазмы с пучком при поперечном размере системы, сопоставимым с длиной волны излучения, когда в спектре плазменных колебаний возможны только преимущественно продольные волны.

Понимание механизмов генерации излучения в тонкой пучково-плазменной системе 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. Такие генераторы будут способны работать с более высокой плотностью плазмы ($> 10^{13}$ см $^{-3}$), благодаря чему станет возможным длительная и эффективная генерация на них терагерцового излучения, область применения которого стремительно растёт в последние годы.

Целью данной работы является определение основных механизмов эффективной генерации электромагнитного излучения, наблюдавшегося в экспе-

риментах по инъекции электронного пучка в тонкую замагниченную плазму на установке ГОЛ-3 и разработка новых схем генерации ТГц излучения высокой мощности.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Построить теоретическую модель генерации излучения в пучково-плазменной системе, учитывая специфику тонкой плазмы с толщиной порядка длины волны излучения.
2. Разработать электромагнитный релятивистский 2D3V численный код на основе метода частиц в ячейках, позволяющий моделировать непрерывную (в течение тысяч периодов плазменных колебаний) инъекцию пучка частиц в замагниченную плазму.
3. С помощью моделирования, использующего базовые уравнения электродинамики и движения частиц, проверить предсказания аналитической теории, а также исследовать процесс генерации излучения при инъекции электронного пучка в плазму при параметрах и масштабах реального эксперимента на установке ГОЛ-3.

Методология и методы исследования

Построение упрощённой аналитической модели генерации излучения в тонкой пучково-плазменной системе ведётся в рамках двухжидкостной магнитной гидродинамики. Для подтверждения и определения границ применимости теоретических предсказаний используется собственный полностью релятивистский электромагнитный код с использованием метода частиц в ячейках (PIC), реализованный для графических сопроцессоров фирмы NVIDIA [12].

Научная новизна

1. Обнаружен новый высокоэффективный ($\sim 5-10\%$ от мощности пучка) механизм генерации электромагнитного излучения электронным пучком, распространяющимся в тонком плазменном канале с модулированной плотностью (механизм пучково-плазменной антенны). Построена его упрощённая аналитическая теория. Предсказания теории подтверждены с помощью численного моделирования.
2. На основе метода частиц в ячейках разработана численная модель, позволяющая изучать процессы при длительной непрерывной инъекции пучка частиц в замагниченную плазму, а также детально исследовать генерируемое в такой системе электромагнитное излучение. Показана реализуемость механизма пучково-плазменной антенны в открытой системе плазма-пучок и возможность генерации с его помощью излучения на второй гармонике плазменной частоты.
3. 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 элек-

ромагнитного излучения с эффективностью $\sim 1 - 4\%$ от мощности пучка.

4. Впервые на основе метода частиц в ячейках проведено численное моделирование инъекции 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. Предложен сценарий формирования отдельных вспышек излучения.
5. Впервые показана возможность генерации мощного ТГц излучения с эффективностью 3-7% от мощности пучка на второй гармонике плазменной частоты встречными электронными пучками, возбуждающими продольные плазменные волны разного поперечного профиля. Обнаружено, что одинаковые встречные пучки с высокой плотностью могут генерировать излучение, приобретая различную поперечную форму за счёт филаментации.

Научная и практическая значимость

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

ЭМ излучение на гармониках плазменной частоты также представляет большой интерес для интерпретации процессов, имеющих место при солнечных радиовсплесках II и III типов. Рассмотренные в данной работе механизмы генерации излучения могут дать новое понимание этих явлений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обнаружен высокоэффективный ($\simeq 5 - 10\%$ от мощности пучка) механизм генерации электромагнитного излучения на гармониках плазменной частоты при распространении электронного пучка в тонком (порядка длины волны излучения) плазменном канале с модулированной плотностью – механизм пучково-плазменной антенны.
2. Установлено, что модуляционная неустойчивость доминирующей пучковой волны может создавать продольную модуляцию плотности плазмы, которая необходима для реализации антенного механизма, что обеспечивает эффективность электромагнитной эмиссии порядка нескольких процентов.

3. С помощью численного моделирования показано, что в экспериментах с тонким пучком низкой энергии (100 кэВ) на установке ГОЛ-3 механизм плазменной антенны обеспечивает эффективность конверсии мощности пучка в мощность излучения на уровне $\simeq 1 - 3\%$ в окрестности плазменной частоты и объясняет наблюдаемую в этих экспериментах пиковую мощность излучения вблизи второй гармоники плазменной частоты.
4. Предложен механизм генерации мощного ТГц излучения на второй гармонике плазменной частоты встречными электронными пучками разного поперечного профиля с эффективностью $\simeq 3 - 7\%$ от мощности пучков.

Достоверность полученных результатов обеспечивается совпадением результатов аналитической теории и численной модели, которая, в свою очередь, была верифицирована на ряде тестовых задач.

Личный вклад

Автор принимал активное участие в постановке задачи, разрабатывал все применяемые в работе численные коды, проводил анализ полученных результатов, а также участвовал в подготовке публикаций.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИЯФ СО РАН и ИСЗФ СО РАН, на конкурсах молодых учёных ИЯФ СО РАН, а также представлялись на международных конференциях, в том числе на XLIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС (г. Звенигород, 2016), 11-й Международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (г. Новосибирск, 2016), Международной конференции «Synchrotron and Free electron laser Radiation: generation and application 2018» (г. Новосибирск, 2018), на 43-й Международной конференции по инфракрасным, миллиметровым и терагерцовым волнам (г. Нагоя, Япония, 2018). Результаты диссертации опубликованы также в зарубежных научных журналах, список которых приведен в перечне опубликованных автором работ.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 публикациях, 4 из которых изданы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Web Of Science и Scopus, 2 — в сборниках трудов международных конференций.

В изданиях из списка ВАК РФ

1. Annenkov V. V., Volchok E. P., Timofeev I. V. Generation of high-power electromagnetic radiation by a beam-driven plasma antenna // Plasma Physics and Controlled Fusion. — 2016. — Т. 58, № 4. — С. 045009.
2. Annenkov V. V., Timofeev I. V., Volchok E. P. Simulations of electromagnetic emissions produced in a thin plasma by a continuously injected electron beam // Physics of Plasmas. — 2016. — Т. 23, № 5. — С. 053101.

3. High-power terahertz emission from a plasma penetrated by counterstreaming different-size electron beams / V. V. Annenkov [и др.] // *Physics of Plasmas*. — 2018. — Т. 25, № 11. — С. 113110.
4. Annenkov V. V., Timofeev I. V., Volchok E. P. Highly efficient electromagnetic emission during 100 keV electron beam relaxation in a thin magnetized plasma // *Physics of Plasmas*. — 2019. — Т. 26, № 6. — С. 063104.

В сборниках трудов конференций

5. Annenkov V. V., Timofeev I. V., Volchok E. P. Particle-in-cell simulations of 100 keV electron beam interaction with a thin magnetized plasma // *AIP Conference Proceedings*. Т. 1771. — AIP Publishing LLC/AIP Publishing, 2016. — С. 070011.
6. Narrowband THz generation by colliding plasma waves with different transverse sizes / V. Annenkov [и др.] // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). — IEEE, 2018. — С. 1–2.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 105 страниц, включая 35 рисунков. Список литературы содержит 102 наименования.

Содержание работы

Во **введении** приводится обзор научной литературы по механизмам генерации ЭМ излучения в плазме с электронными пучками, обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются цель и задачи, решению которых посвящена работа.

В **первой главе** изучается генерация электромагнитных волн тонкой пучково-плазменной системой с типичным поперечным размером, сравнимым с длиной волны излучения. Если плотность плазмы однородна вдоль слоя (рис. 1а), то пучок с относительной плотностью $\hat{n}_b = n_b/n_0 \ll 1$ и средней скоростью v_b раскачивает плазменную волну с частотой ω_b и инкрементом Γ , которые в гидродинамическом режиме определяются по формулам:

$$\hat{\omega}_b = \omega_b/\omega_p = 1 - \hat{n}_b^{1/3}/(2^{4/3}\gamma_b), \quad \hat{\Gamma} = \Gamma/\omega_p = \sqrt{3}\hat{n}_b^{1/3}/(2^{4/3}\gamma_b), \quad (1)$$

где γ_b это релятивистский фактор электронов пучка, $\omega_p = \sqrt{4\pi e^2 n_0/m_e}$ - плазменная частота, n_0 - плотность плазмы, m_e - масса электрона, e - элементарный заряд. Такая волна имеет продольный волновой вектор k_{\parallel} и распространяется с досветовой скоростью ($v_{ph} = \omega_b/k_{\parallel} = v_b < c$, где c - скорость света в вакууме), она не способна генерировать вакуумное ЭМ излучение, поскольку её фазовая скорость вдоль плазмы не превышает скорость света. Резонанс

с вакуумными ЭМ волнами может быть достигнут только для вынужденных сверхсветовых возмущений электрического поля с $(\omega_b, k_{\parallel} - q)$, которые могут возникнуть в плазме при рассеянии доминирующей пучковой волны на периодическом возмущении ионной плотности с продольным волновым числом q (рис. 1б). В этом случае граничные условия требуют, чтобы частота излучаемой электромагнитной волны была $\omega = \sqrt{K_{\perp}^2 + K_{\parallel}^2}c = \omega_b$, а волновой вектор $K_{\parallel} = k_{\parallel} - q$. Одновременно эти условия могут быть выполнены только в том случае, когда период модуляции плотности плазмы не сильно отличается от длины пучковой волны:

$$1 - v_b/c < q/k_{\parallel} < 1 + v_b/c. \quad (2)$$

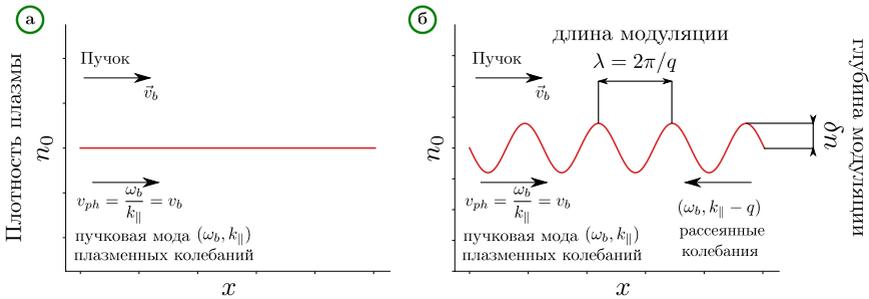


Рис. 1 — Схематичное изображение возбуждаемых в системе колебаний. (а) Первоначально однородная плотность плазмы $n = n_0$. (б) Плазма с продольной модуляцией плотности $n = n_0 + \delta n \cos qx$.

Направление излучения по отношению к направлению движения пучка определяется углом

$$\theta = \arctan \sqrt{\widehat{v}_b^2 / (1 - q/k_{\parallel})^2 - 1} \quad (3)$$

и контролируется соотношением между q и k_{\parallel} . Стоит заметить, что в неограниченной плазме классическое рассеяние потенциальной волны на возмущении плотности с параллельным волновым вектором не может приводить к генерации собственных электромагнитных мод. В рассматриваемой схеме электромагнитное излучение возникает только в плазме ограниченного размера благодаря прямому возбуждению вакуумных электромагнитных волн около поверхности плазмы. Фактически, такая система работает как плазменная антенна, которая способна преобразовывать энергию раскачиваемых пучком плазменных колебаний в энергию вакуумного электромагнитного излучения.

В простейшем случае, когда период модуляции плотности совпадает с длиной волны наиболее неустойчивой пучковой моды плазменных колебаний

($q = k_{\parallel}$), мощность электромагнитного излучения, генерируемого в единице объёма плазмы с полушириной l , определяется величиной

$$P_{rad} = S_y/l = \omega_p n_0 m_e c^2 \widehat{E}_0^2 \delta \widehat{n}^2 F / (8 \sqrt{1 - \widehat{\omega}_b^2}), \quad (4)$$

где S_y - поперечная компонента вектора Пойнтинга, $\delta \widehat{n} = \delta n/n_0$, \widehat{E}_0 - амплитуда пучковой моды плазменных колебаний в единицах $m_e c \omega_p / e$, а фактор F описывает зависимость от толщины плазмы

$$F = \sinh^2(\chi l) / [(\omega_b^2 + \sinh^2(\chi l)) \chi l]. \quad (5)$$

Максимальная плотность мощности излучения достигается в том случае, когда полуширина плазмы равняется глубине скин-слоя ($l_{opt} \approx 1/\chi$). Эта мощность спадает как $1/l$ с ростом толщины плазмы, поскольку генерация ЭМ волн происходит в тонком граничном слое, куда их поля способны проникнуть.

Для проверки предлагаемой теории проведено численное PIC моделирование плазмы с модулированной плотностью и электронным пучком. Для сравнения результатов моделирования (рис. 2) и предсказаний теории были выбраны следующие параметры: $q = k_{\parallel}$, $v_b = 0.9c$, $n_b = 0.02n_0$, $\delta \widehat{n} = 0.2$.

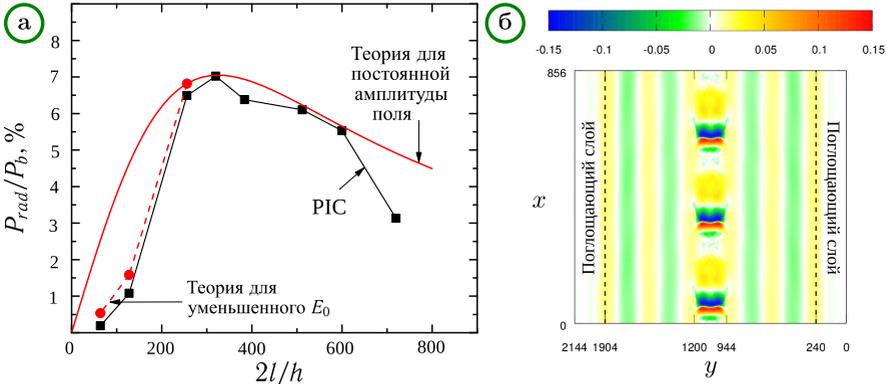


Рис. 2 — а) Зависимость относительной мощности излучения P_{rad}/P_{beam} от толщины плазмы. б) Электрическое поле $E_x(x,y)$ в момент времени $\omega_p t = 165$ для случая $2l = 256h$.

Согласно теории, такая модуляция должна приводить к строго поперечному распространению электромагнитных волн относительно плазменного столба. Типичная картина электрического поля $E_x(x,y)$ в момент наиболее интенсивного излучения показана на рис. 2б. На рис. 2а показана зависимость эффективности генерации излучения от толщины пучка и плазменного столба. Видно хорошее соответствие теоретических результатов (сплошная красная линия) и результатов моделирования (чёрная линия). Расхождение результатов в

области малых толщин объясняется значительным снижением амплитуды поля плазменной волны в момент захвата пучка по сравнению с теоретической величиной $\hat{E}_0 \simeq \gamma_b^3 \hat{\Gamma}^2 \hat{v}_b$, которая удовлетворительно описывает широкую плазму. Для больших l возможной причиной наблюдаемого несоответствия результатов моделирования и теоретических предсказаний является предположение об одномерном характере пучково-плазменной волны: для выбранных параметров системы продольное электрическое поле плазменной волны имеет достаточное расстояние для смены знака поперёк плазменного слоя в случае $2l = 720h$ ($h = 0.02c/\omega_p$ - шаг пространственной сетки) и остаётся квази-одномерным в случае $2l = 600h$.

Таким образом, из результатов моделирования можно сделать вывод, 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 процессы ЭМ эмиссии 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 (рис. 3а) может достигать 5-10% от полной мощности пучка. Кроме того показано, что в такой системе возможен процесс слияния доминирующей пучковой волны (ω_b, k_{\parallel}) и её длинноволнового сателлита ($\omega_b, k_{\parallel} - q$), возникающего при рассеянии на периодическом возмущении ионной плотности. Этот процесс приводит к генерации излучения на второй гармонике (рис. 3б) 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 (рис. 3в). 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 $q = k_{\parallel}$ выполняется автоматически. В таком режиме поперечно распространяющееся излучение преимущественно поляризовано вдоль направления распространения пучка (рис. 3г), сконцентрировано вблизи ω_p и достигает эффективности 1%.

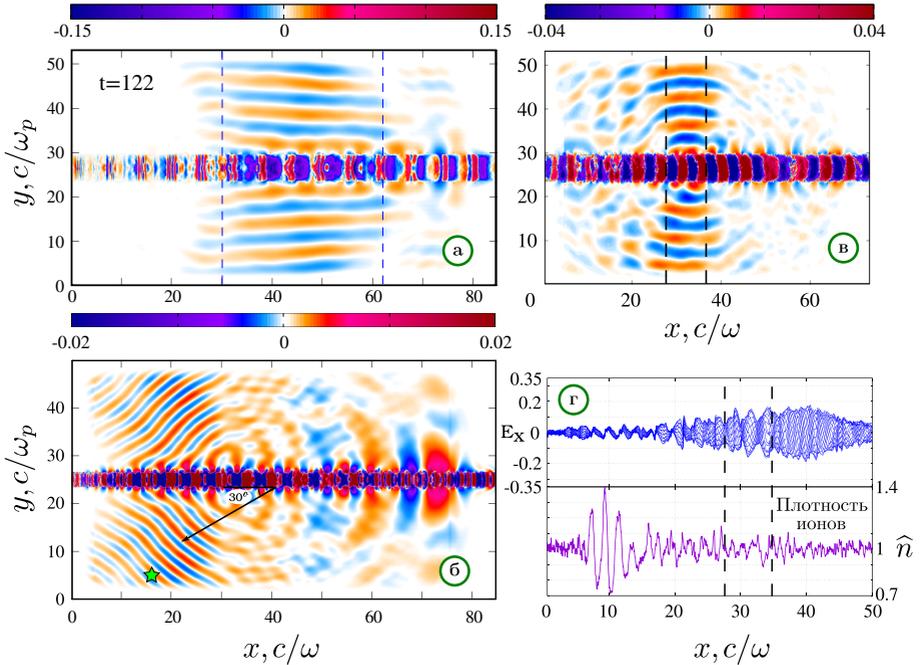


Рис. 3 — (а-в) Электрическое поле $E_x(x, y)$ при инъекции электронного пучка со скоростью $v_b = 0.9c$ и плотностью $n_b = 0.02n_0$ в модулированную плазму с $q = k_{\parallel}$ (а), $q = 3.76k_{\parallel}$ (б) и в первоначально однородную плазму (в). (г) Различные фазы одного плазменного колебания в центре плазменного слоя и соответствующий усредненный по y профиль ионной плотности при инъекции в первоначально однородную плазму.

В рамках третьей главы впервые проводится PIC моделирование непрерывной инъекции 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. Обнаружены режимы, когда значительная доля этой мощности приходится на вторую гармонику (рис. 4), что согласуется с оценками эффективности такого излучения в эксперименте. Проведённые исследования проливают свет на физику релаксации пучка в этих экспериментах и позволяют качественно интерпретировать их результаты. В частности, стало ясно, что даже в сильном магнитном поле излучение привязано к гармоникам плазменной частоты, а не к верхнегибридному резонансу или гармоникам циклотронной частоты, получено подтверждение эффективной реализации механизма плазменной антенны при параметрах реального эксперимента, предложен сценарий формирования

отдельных вспышек излучения, показано согласие результатов моделирования с экспериментальными данными в оценках пиковой мощности $2\omega_p$ -излучения при токе 25 А и объяснена причина невозможности регистрации излучения в этих экспериментах при более высоких токах.

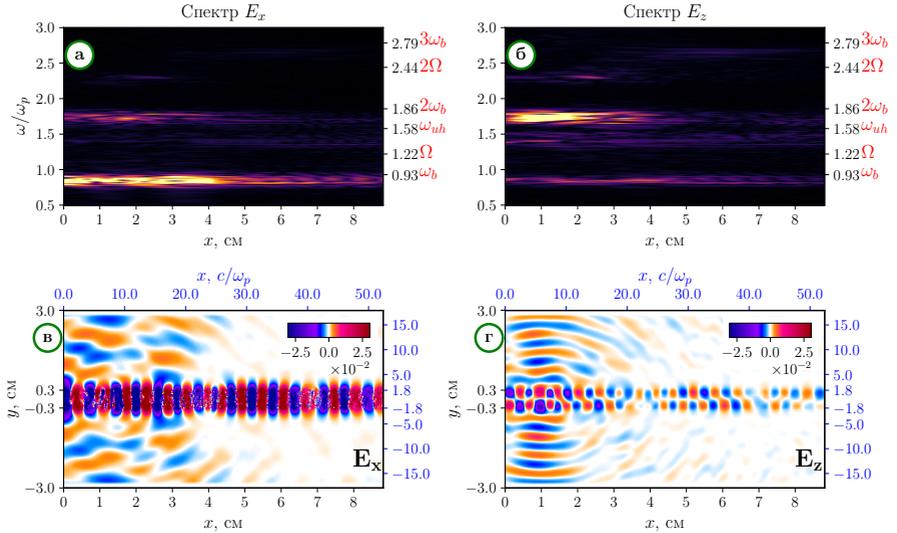


Рис. 4 — Результаты моделирования инжекции электронного пучка с энергией 100 кэВ в плазму. Внешнее магнитное поле 1.24 Т. Верхний ряд: спектры излучения за всё время расчёта; нижний ряд: карты электрических полей в момент времени $t=1314\omega_p^{-1}=7.37$ нс.

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 [13]. Этот механизм является более общим случаем механизма генерации излучения вблизи второй гармоники плазменной частоты в теории пучково-плазменной антенны, в которой рассматривалось слияние встречных плазменных колебаний с одинаковой поперечной структурой, но различными волновыми числами. 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. Моделирование сталкивающихся пучков низкой плотности с различными поперечными размерами показывает, что полученное излучение имеет узкую спектральную ширину линии ($\sim 1\%$), а его мощность достигает нескольких процентов от полной мощности пучков (рис. 5).

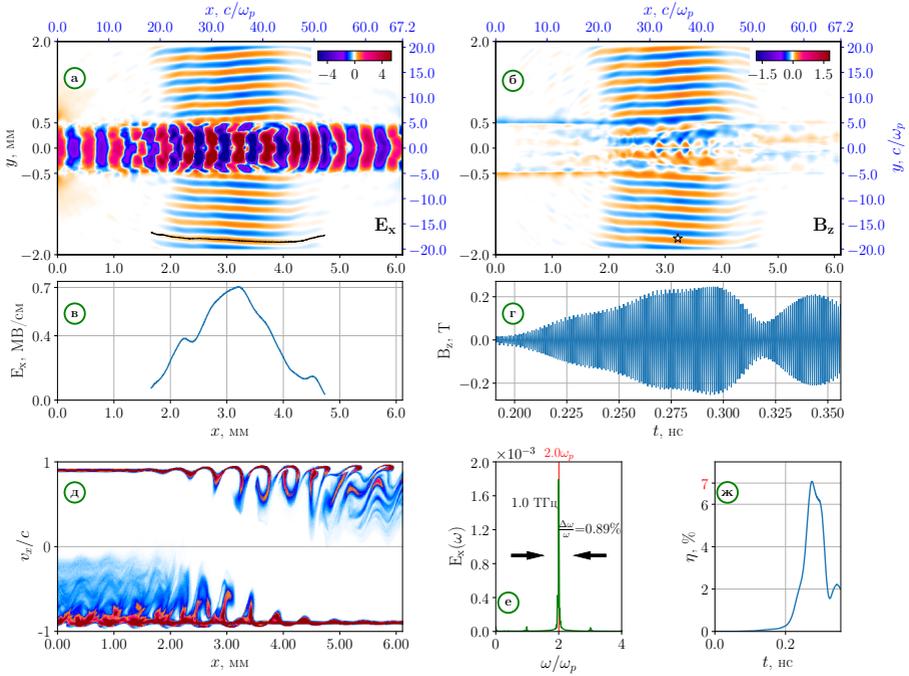


Рис. 5 — Результаты моделирования для встречных пучков низкой плотности ($n_b/n_0 = 0.002$): а) Карта электрического поля E_x (в MB/cm) в момент $862 \omega_p^{-1} = 0.275$ нс; б) карта магнитного поля B_z (в Теслах); в) профиль амплитуды излучаемой ЭМ волны, измеренный вдоль линии постоянной фазы; г) временная зависимость поля B_z в одной точке, обозначенной белой звездой; д) фазовое пространство (x, v_x) сталкивающихся электронных пучков; е) частотный спектр генерируемого излучения; ж) мощность излучения в единицах общей мощности инжектируемых пучков. Все размерные величины соответствуют плотности плазмы $n_0 = 3.1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Также установлено, что этот механизм излучения может работать с сопоставимой эффективностью в системе плотных пучков с изначально равными размерами. В такой системе различные поперечные структуры плотности пучков и разные амплитудные профили возбуждаемых волн автоматически возникают вследствие филаментационной неустойчивости.

В заключении перечислены основные результаты работы:

1. Показано, что в тонкой плазме с продольной модуляцией плотности и электронным пучком возможно появление сверхсветового сателлита самой неустойчивой пучковой волны, способного излучать в вакуум ЭМ волны подобно дипольной антенне. Для нахождения оптимальных условий генерации электромагнитных волн с помощью такой пучково-плазменной антенны, предложена простая теоретическая модель. Уста-

- новлено, что в двумерном случае теоретические предсказания эффективности конверсии мощности пучка в мощность излучения на уровне 7% находятся в хорошем согласии с численным моделированием методом частиц в ячейках.
2. Разработана численная электромагнитная модель на основе метода частиц в ячейках, позволяющая изучать физические процессы при длительной непрерывной инжекции релятивистского пучка частиц в замагниченную плазму и детально исследовать генерируемое в такой системе ЭМ излучение. Показана реализуемость механизма пучково-плазменной антенны в этой модели. Обнаружена возможность генерации в такой системе излучения вблизи удвоенной плазменной частоты с эффективностью 0.4%, тогда как в излучение на плазменной частоте может конвертироваться до 10% мощности пучка.
 3. Установлено, что продольная модуляция плотности плазмы, играющая ключевую роль в механизме плазменной антенны, может нарастать самосогласованно как результат развития модуляционной неустойчивости доминирующей пучковой волны. Показано, что даже если на начальном этапе наиболее неустойчивое возмущение плотности не приводит к возбуждению сверхсветовых сателлитов, более поздняя нелинейная стадия этой неустойчивости сопровождается захватом плазменных колебаний в отдельные ямы плотности, внутри которых условие эффективного излучения плазменной антенны $q = k_{\parallel}$ выполняется автоматически. В этом режиме в поперечно распространяющемся излучении доминируют ЭМ волны с частотой ω_p , поляризованные вдоль направления движения пучка.
 4. Проведено PIC моделирование непрерывной инжекции в плазму тонкого суб-релятивистского электронного пучка при параметрах лабораторного эксперимента на открытой ловушке ГОЛ-3 и показана 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. Обнаружены режимы, когда значительная доля этой мощности (до 30%) приходится на вторую гармонику.
 5. Предложена качественная интерпретация экспериментов по релаксации электронного пучка с энергией 100 кэВ на установке ГОЛ-3. В частности, показано, что даже в сильном магнитном поле излучение привязано к гармоникам плазменной частоты, а не к верхнегибридному резонансу или гармоникам циклотронной частоты, получено подтверждение эффективной реализации механизма плазменной антенны при параметрах реального эксперимента, предложен сценарий формирования отдельных вспышек излучения, показано согласие результатов моделирования с экспериментальными данными в оценках пиковой мощности $2\omega_p$ -излучения при токе 25 А и объяснена причина невоз-

возможности регистрации излучения в этих экспериментах при более высоких токах.

6. Исследована возможность генерации излучения вблизи второй гармоники плазменной частоты встречными электронными пучками разного поперечного профиля с эффективностью 3-7% от суммарной мощности пучков. Установлено, что этот же механизм излучения может работать с близкой эффективностью в системе плотных электронных пучков с изначально равными размерами. В такой системе различные формы плотности пучка и разные амплитудные профили возбужденных волн автоматически создаются за счёт филаментационной неустойчивости.

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.

Кроме того, обнаруженные в работе механизмы электромагнитной эмиссии могут играть важную роль в формировании солнечных радио- и суб-ТГц всплесков.

Список литературы

1. Threefold Increase of the Bulk Electron Temperature of Plasma Discharges in a Magnetic Mirror Device / P. A. Bagryansky [и др.] // *Physical Review Letters*. — 2015. — Т. 114, № 20. — С. 205001. — arXiv: [1411.6288](#).
2. Plasma Heating and Confinement in GOL-3 Multi Mirror Trap / A. Burdakov [и др.] // *Fusion Science and Technology*. — 2007. — Т. 51, 2Т. — С. 106–111.
3. Bagryansky P. A., Beklemishev A. D., Postupaev V. V. Encouraging Results and New Ideas for Fusion in Linear Traps. — 2018.
4. Direct observation of anomalously low longitudinal electron heat conductivity in the course of collective relaxation of a high-current relativistic electron beam in plasma / A. V. Arzhannikov [и др.] // *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. — 2003. — Т. 77, № 7. — С. 358–361.
5. Timofeev I. V. Second harmonic electromagnetic emission of a turbulent magnetized plasma driven by a powerful electron beam // *Physics of Plasmas*. — 2012. — Т. 19, № 4. — С. 044501. — arXiv: [1202.3434](#).
6. Study of 0.3-0.8 THz flux generated by magnetized plasma column due to relaxation of high-current REB / A. V. Arzhannikov [и др.] // *EPJ Web of Conferences*. Т. 149. — 2017.
7. Timofeev I. V., Annenkov V. V., Arzhannikov A. V. Regimes of enhanced electromagnetic emission in beam-plasma interactions // *Physics of Plasmas*. — 2015. — Т. 22, № 11. — С. 113109.
8. Microwave Generation During 100 keV Electron Beam Relaxation in GOL-3 / A. V. Burdakov [и др.] // *Fusion Science and Technology*. — 2013. — Т. 63, 1Т. — С. 286–288.
9. Observation of electromagnetic radiation at twice the electron plasma frequency generated by beam-plasma interactions / P. Leung [et al.] // *Physics of Auroral Arc Formation*. — 1981. — P. 387–392.
10. Intrator T., Hershkowitz N., Chan C. Experimental observations of nonlinearly enhanced $2\omega_{UH}$ electromagnetic radiation excited by steady-state colliding electron beams // *Physics of Fluids*. — 1984. — Т. 27, № 2. — С. 527–534.
11. Microwave/millimeter-wave generation in a counterstreaming-beam-plasma system / R. W. Schumacher [и др.] // *Journal of Applied Physics*. — 1993. — Т. 74, № 5. — С. 3057–3060.
12. NVIDIA Tesla: A unified graphics and computing architecture / E. Lindholm [и др.] // *IEEE Micro*. Т. 28. — 03.2008. — С. 39–55.
13. Timofeev I. V., Annenkov V. V., Volchok E. P. Generation of high-field narrowband terahertz radiation by counterpropagating plasma wakefields // *Physics of Plasmas*. — 2017. — Т. 24, № 10. — С. 103106.

АННЕНКОВ Владимир Вадимович

**Электромагнитная эмиссия
в тонкой пучково-плазменной системе**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 3.06.2019 г.

Подписано в печать 3.06.2019 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1,2 усл. печ.л., 0,8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 2

Обработано на РС и отпечатано

на ротаприфте ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11