

На правах рукописи



Туев Петр Викторович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО
КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРЕНИЯ С ЛАЗЕРНЫМ
ДРАЙВЕРОМ ТЕРАВАТТНОГО УРОВНЯ
МОЩНОСТИ**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2022

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор РАН **Лотов Константин Владимирович**

Официальные оппоненты: **Брантов Андрей Владимирович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Савельев-Трофимов Андрей Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита диссертации состоится 14 декабря 2022 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан 27 октября 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.162.02,

доктор физико-математических наук  Багрянский Петр Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Плазменное кильватерное ускорений является бурно развивающейся областью исследований. В плазменных волнах может достигаться огромная напряженность электрического поля, превышающая привычные для классических ускорительных структур значения на несколько порядков. В большинстве случаев драйвером таких волн выступают лазерные импульсы длительностью в десятки фемтосекунд, а ускоряемыми (витнесс) частицами служат электроны.

Большое разнообразие режимов взаимодействия располагает к новым исследованиям в этой области [1]. Исторически сложилось, что эксперименты по лазерному кильватерному ускорению проводились с передовыми на тот момент импульсами [2]. Однако широкое распространение могут получить только источники, построенные на базе относительно доступных лазерных систем. Поэтому определение минимальных требований на лазерный импульс, подходящий для генерации электронных сгустков из плазмы, является задачей, представляющей особый интерес. В этом случае удастся минимизировать размер лазерной системы, а следовательно и всей установки в целом. Ожидается, что минимальные параметры будут далеки от рекордных, и подойдут лазерные импульсы умеренной интенсивности. Для разработки методик исследования необходимо из широкого спектра всевозможных параметров сосредоточится на достаточно узкой области. В качестве базовых параметров будем опираться на лазерную установку, которая в настоящее время создается в ИЛФ СО РАН, и где предполагается возможность получения коротких высококонтрастных импульсов тераваттового уровня мощности [3].

Наиболее простая конфигурация эксперимента подразумевает использование сверхзвуковых газовых течений в качестве мишени для лазерного импульса. В таком случае лазерный импульс своим полем ионизирует газ, а затем в образовавшейся плазме происходит процесс ускорения. Сверхзвуковые струи обладают продолжительной областью однородной плотности и традиционно измеряются интерференционными методами в кильватерных экспериментах [4]. Однако малое энергосодержание импульса накладывает ограничение на длину взаимодействия и плотность плазмы, поэтому требуется адаптировать существующие алгоритмы к новым условиям измерений.

Важно работать в достаточно нелинейном режиме, чтобы формирование ускоряемого сгустка происходило из плазменных электронов, и не потребовалась внешняя инжекция частиц. В настоящее время граница захвата плазменных электронов в пространстве параметров еще не изучена в полной мере, поскольку может зависеть от многих факторов [1]. Поэтому для каждой конкретной установки необходимо проводить отдельный параметрический поиск для определения оптимальных режимов взаимодей-

ствия. Полностью экспериментальное изучение кильватерного ускорения сильно затруднено из-за высокой сложности диагностики. Сложность диагностики связана с микронными масштабами волновых структур, которые распространяются в плазме с околосветовыми скоростями. С другой стороны, задачу можно попробовать решать аналитически. Однако на плазменное кильватерное ускорение могут оказывать существенное влияние всевозможные нелинейные эффекты, которые не удастся полностью учесть в рамках аналитического анализа. Из-за этого возможно построение теорий только в простейших приближениях, поэтому численное моделирование имеет решающее значение в этой области науки [5]. Большинство интересных процессов происходит в небольшой области пространства, которая движется вместе с пучками. Это облегчает моделирование, так как позволяет использовать короткое движущееся окно. Однако в задаче присутствуют сильно различающиеся временные и пространственные масштабы, от длины волны лазерного импульса (около микрона) до полной длины ускорения (десятки сантиметров). Часто постановка вычислительных экспериментов с использованием кодов, опирающихся на базовые принципы движения частиц в электромагнитных полях, требует наличия больших компьютерных мощностей. Более того, даже использование таких кодов не всегда возможно. Следовательно, разработка эффективных алгоритмов и упрощенных моделей является актуальной задачей [5]. Одной из популярных упрощенных моделей является квазистатическое приближение (QSA) [6], которое значительно снижает требования к вычислительным ресурсам по сравнению с моделированием методом “частиц в ячейке” (PIC) без упрощающих предположений. Эта модель была реализована в ряде вычислительных кодов иногда в сочетании с другими упрощениями, такими как уравнение огибающей для лазерного импульса или жидкостное приближение для плазмы. В некоторых режимах взаимодействия квазистатическая модель не учитывает все важные физические процессы, например захват электронов плазмы, поэтому требуется дальнейшее ее развитие. Компактный источник должен работать в нелинейном режиме взаимодействия, и, вероятно, каждый конкретный набор параметров потребует численного поиска, который желательно осуществлять без привлечения значительных вычислительных ресурсов. Это делает задачу улучшения квазистатического приближения особенно важной. Отметим, что ранее уже было предложено расширение этой модели для учета процесса захвата электронов плазмы [7], однако как будет показано в данной работе, оно не является корректным для всех параметров взаимодействия и требует дальнейших улучшений.

При работе с газовыми струями часто полагаются на нелинейную плазменную фокусировку для предотвращения дифракции импульса. Работа в этом режиме накладывает ограничения на соотношения плотности плазмы, длины взаимодействия и параметров лазерного импульса. Эти ограничения сужают диапазон параметров ускоренных электронов, кото-

рый доступен без существенных изменений в конструкции мишени или характеристик лазерного импульса. С другой стороны, для предотвращения дифракционного расплывания широко используются капилляры [2], а исследование различных конфигураций капилляров является широко обсуждаемой темой. В этом случае можно работать с плазмой более низкой плотности, что приводит к уменьшению расфазировки волны с витнессом в процессе ускорения и способствует более эффективной передаче энергии от драйвера. Фокусировка происходит за счет создаваемого профиля плотности с минимумом на оси, либо обеспечивается непосредственно стенками капилляра. Мы сосредоточимся на рассмотрении последнего случая в линейной теории, причем будем считать стенки капилляра металлическими. Это оправдано тем, что при высокой интенсивности излучения вблизи стенки все материалы ведут себя как плазма, и их свойства близки к свойствам металла [8]. При распространении лазерного импульса в металлическом волноводе реализуется режим, в котором длина волны излучения мала в сравнении с размером капилляра. В этом случае классическое описание волноводных мод в металлических волноводах с конечной проводимостью перестает работать [9]. Детальный анализ этого режима является важным шагом на пути использования таких структур в кильватерном ускорении.

Целью работы является разработка эффективных методов анализа кильватерного ускорения в различных режимах взаимодействия и исследование с их помощью возможностей применения коротких лазерных импульсов средней интенсивности в качестве драйверов для компактных кильватерных ускорителей.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать алгоритм восстановления параметров сверхзвуковой газовой струи с малой оптической толщиной из интерференционных измерений.
2. Расширить область применимости квазистатического приближения, добавив в него учет эффектов, связанных с возбуждением сильнонелинейных волн в плазме.
3. Модернизировать код LCODE [10, 11], добавив в него разработанные модели.
4. Оптимизировать параметры взаимодействия лазерного импульса с энергосодержанием около 300 мДж с плазмой для обеспечения генерации электронных сгустков.
5. Исследовать особенности строения мод в узких металлических капиллярах и уточнить существующие приближенные модели.

Научная новизна

Предложен новый алгоритм для устойчивого восстановления распределения плотности в объектах с цилиндрической симметрией при малых значениях полезного сигнала. Разработаны и проанализированы воз-

возможные модификации квазистатического приближения для учета захвата плазменных электронов. Обнаружен новый режим генерации электронных сгустков при взаимодействии короткого высококонтрастного лазерного импульса тераваттного уровня мощности с плазменной мишенью. Разработана полуаналитическая модель для анализа волноводных мод в металлических капиллярах в широкой области параметров.

Теоретическая и практическая значимость

Разработанные инструменты могут применяться для широкого спектра исследований в области лазер-плазменного кильватерного ускорения. Оптимизированы параметры взаимодействия лазерного импульса ИЛФ СО РАН со сверхзвуковой газовой струей для генерации электронных сгустков. В рамках линейной теории объяснено аномально малое затухание лазерного излучения в металлическом капилляре и обнаружены важные отличия от приближенных решений в области параметров, специфичных для кильватерного ускорения.

Методология и методы исследования

Для численного моделирования используется квазистатический код LCODE и электромагнитный PIC код FBPIC [12]. Для обработки результатов и численного анализа аналитической модели разработаны алгоритмы на языке Python.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разложение фазового распределения, полученного из интерференционных измерений сверхзвуковой газовой струи, по супергауссовым функциям позволяет устойчиво исследовать параметры течения, когда объект вносит относительно малое возмущение на уровне 1 рад.
2. Существующие в настоящее время алгоритмы учета захвата плазменных электронов кильватерной волной в рамках квазистатического приближения позволяют проводить только предварительную быструю оптимизацию параметров взаимодействия. Наиболее перспективные режимы взаимодействия необходимо исследовать с помощью более медленных кодов, использующих более полные физические модели.
3. Смещение перетяжки лазерного импульса в область, где плотность плазмы вышла на постоянную величину, позволяет достичь больших пиковых интенсивностей, нежели при его фокусировке на границу плазмы. Это делает возможным захват электронов из однородной плазмы с плотностью около $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при энергосодержании драйвера около 300 мДж.
4. Упрощающие предположения, традиционно используемые в линейной теории волноводов, дают ошибку до 20% в скорости затухания основной моды при рассмотрении излучения с длиной волны 850 нм в металлическом капилляре радиуса порядка 15 мкм. Кроме

того, существуют качественные отличия в характере возбуждения мод линейно-поляризованным лазерным импульсом.

Степень достоверности результатов обеспечивается перекрестной проверкой двумя вычислительными кодами. Корректность используемых кодов обеспечивается сравнением с ранее проведенными экспериментами. Где это возможно, проведено сравнение с экспериментальными измерениями и аналитическими теориями.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на конкурсах молодых ученых ИЯФ СО РАН в 2018, 2020 и 2021 годах, а также представлялись на международных конференциях: 43-я конференция по физике плазмы (EPS, Бельгия, Левен, 2016); 2-я Европейская конференция по современным методам ускорения (EAAS, Италия, о. Эльба, 2017); конференция по лазер-плазменному ускорению (LPAW, Хорватия, Сплит, 2019); Азиатский форум по ускорителям и детекторам (AFAD, Россия, Новосибирск, 2021); 47-я конференция по физике плазмы (EPS, Испания, Сиджес, 2021). Часть результатов диссертации вошла в выпускную квалификационную работу аспиранта, которая была успешно защищена в 2021 году.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 116 страниц, включая 34 рисунка. Список литературы содержит 111 наименований.

Личный вклад

Автор принимал активное участие в постановке задач, разработке применяемых численных кодов и построении аналитических моделей, проводил анализ полученных результатов, а также участвовал в подготовке публикаций и докладов.

Основное содержание работы

Введение кратко знакомит читателя с плазменным кильватерным ускорением. Также обосновывается актуальность проведенного исследования, формулируются цели и задачи, приводятся информация о степени достоверности и апробации работы.

Первая глава посвящена описанию алгоритма восстановления плотности сверхзвуковой газовой струи из интерференционных измерений. Предварительные оценки показали, что требуется обеспечить плотность плазмы на уровне 10^{18} - 10^{19} см⁻³ на длине около 1 мм для получения ускоренных частиц с энергией масштаба 100 МэВ [3]. В качестве мишени для лазерного импульса была предложена сверхзвуковая газовая струя, а для ее получения спроектировано сверхзвуковое сопло Лавала. Характеристики получаемых течений из изготовленных сопел требуется измерить. Все экспериментальные результаты были получены сотрудниками ИЛФ СО РАН

С.В. Автаевой, К.В. Губиным и В.И. Труновым. Автором был предложен и реализован алгоритм анализа экспериментальных данных.

Для диагностики таких объектов традиционно используют оптические измерения. Был выбран двухлучевой интерферометр Маха-Цендера, в одном из плеч которого располагалась азотная газовая струя. На этот выбор повлияли простота конструкции и малое время интегрирования сигнала. Сложность интерпретации измерений заключается в малой интенсивности получаемого сигнала. Для рассматриваемой струи ожидаемый набег фазы составляет порядка 1 рад или 1/6 интерференционной полосы. нас интересовало распределение плотности газа, которое связано с набегом фазы интегральным преобразованием Абеля. Его обращение является слабо обусловленной математической задачей, в этом случае фоновые шумы оказывают существенное влияние.

Фазовое распределение восстанавливалось из интерференционной картины методом Фурье [13]. Сначала применяется преобразование Фурье перпендикулярно интерференционным полосам. Затем вырезается область вблизи частоты их следования. Начало координат смещается в выбранную частоту, и берется обратное преобразование. Тогда арктангенс отношения мнимой части обработанного сигнала к действительной будет соответствовать разности набора фазы между двумя лучами интерферометра.

Ранее предложенные алгоритмы решения обратной задачи Абеля нацелены на решение максимально общих задач. Мы же сосредоточимся на исследовании сверхзвуковых течений в области параметров, интересной для кильватерного ускорения. Объект исследования обладает цилиндрической симметрией. Предварительные численные моделирования показывают, что функция распределения плотности будет монотонно убывающей по радиусу. Основываясь на этих фактах, для каждого поперечного сечения примем разложение плотности газа в виде:

$$n_{jet}(r) \approx \sum_{i=2}^{M_1} \sum_{j=2}^{M_2} C_i^j \exp[-(r/\sigma_j)^i], \quad (1)$$

где C_i^j — константы разложения, σ_j — пространственные размеры базисных функций, M_1 и M_2 задают максимальную крутизну фронта нарастания плотности и описываемый поперечный размер. К этому разложению применяется прямое преобразование Абеля, после чего константы C_i^j находятся методом наименьших квадратов с положительными коэффициентами. Таким образом мы перекладываем функцию сглаживания экспериментальных данных на базисные функции.

Сравним результаты обработки тестового сигнала предложенным методом с результатами работы хорошо известных алгоритмов: стандартного обращения Абеля и алгоритма Хансена-Ло, реализованных в модуле PyAbel [14]. В качестве тестовой задачи рассмотрим гипергауссово распре-

деление плотности с резким ее нарастанием и продолжительной областью постоянного значения. Вычислялось прямое преобразование Абеля от модельного распределения плотности, и к получившемуся распределению фазы добавлялась шумовая составляющая, распределенная по нормальному закону с различной амплитудой.

Отметим, что необходимо сглаживать тестовый сигнал для получения разумных результатов с помощью классических алгоритмов, поскольку они полностью сохраняют высокочастотные компоненты сигнала. В нашем случае мы использовали фильтр Баттерворта третьего порядка.

Для классических алгоритмов наблюдается прямая трансляция заданных шумов на восстановленный сигнал, в то время как предложенный алгоритм отлично справляется с возложенной на него задачей их подавления (рисунок 1). Для уменьшения этих ошибок для прямых методов необходимо применять более сильную фильтрацию, чего хотелось бы избежать для уменьшения влияния обработки на восстановленный градиент нарастания плотности газа на краях струи. С этой точки зрения разложение по гладким функциям также не уступает традиционным методам решения обратной задачи.

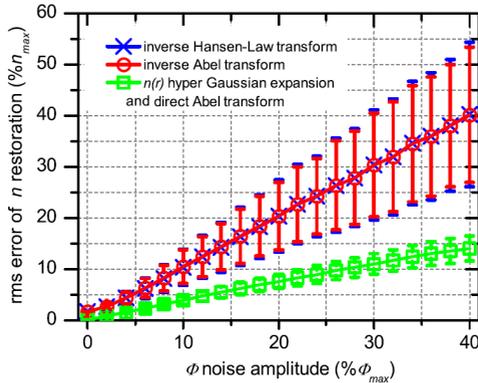


Рисунок 1 — Среднеквадратичная ошибка восстановления в зависимости от уровня шума в тестовом сигнале

Алгоритм успешно используется в ИЛФ СО РАН. Проведенные измерения показывают, что изготовленные сопла обеспечивают область однородности протяженностью ~ 0.8 мм, с плотностью $[5.2 \pm 0.3] \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$. Эти измерения приведены в диссертации для полноты изложения.

Во второй главе описывается применяемое в LCODE квазистатическое приближение и обсуждается проблема описания захвата плазменных электронов в кильватерную волну. Квазистатическое приближение позволяет ускорить вычисления на несколько порядков. Оно базируется на су-

щественной разнице времен эволюции драйвера и плазмы. Можно считать, что структура плазменной волны определяется расстоянием от головы пучка $\xi = z - ct$ и состоянием пучка при пролете через определенную координату пространства, где z — координата вдоль распространения пучка, t — время, c — скорость света. Тогда достаточно вычислить отклик только для одного слоя плазмы. Некоторое количество соседних продольных слоев плазмы заменяются вычисленным, пока пучки заметно не изменятся. Посчитанные поля используются для эволюции драйвера и витнесса на элементарном шаге их эволюции, и цикл повторяется (рисунок 2).

В этой модели для каждого нового шага эволюции пучков взаимодействие вычисляется с новым невозмущенным слоем плазмы. Состояние предыдущего слоя никак не учитывается, что полностью исключает возможность описания захвата плазменных электронов. Однако эволюция пучков вычисляется с помощью уравнений движения без использования приближений. Если использовать эти уравнения для всех электронов плазмы, мы перейдем к модели без упрощающих предположений с соответствующей сложностью вычислений. Будем их использовать лишь для частиц, вероятность захвата которых наибольшая. В диссертации рассматриваются ряд подходов для выделения таких частиц, некоторые оказались неустойчивыми. Описываются используемые способы подавления таких неустойчивостей. Однако определить однозначно верный критерий не удалось. Далее будем выделять электроны и считать их эволюцию полными уравнениями движения, для которых выполнены следующие критерии:

1. $\gamma_p > 1.2$,
2. $r_p < 0.15 k_p^{-1}$,

где γ_p — релятивистский фактор рассматриваемого плазменного электрона, r_p — его радиальное положение. Этот подход был предложен ранее в работе [7], уделим особое внимание его применимости в рассматриваемой области параметров.

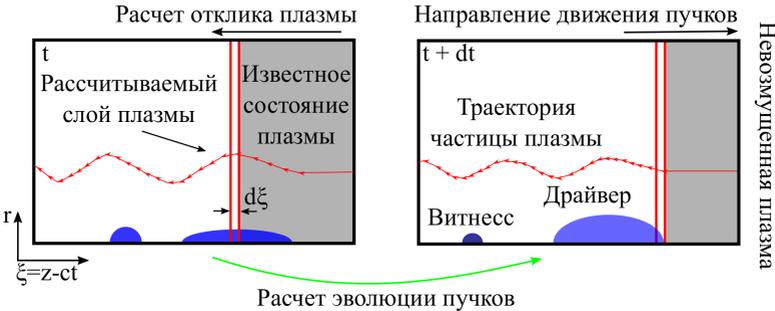


Рисунок 2 — Схема вычислительного цикла в квазистатическом приближении

В рамках третьей главы проведено исследование генерации электронных пучков из плазмы при взаимодействии с лазерным импульсом с длиной волны 810 нм, длительностью 12 фс, радиусом в перетяжке 14 мкм и энергией 300 мДж. В моделировании будем рассматривать однородную неограниченную по радиусу плазму с областью однородности 900 мкм и линейным нарастанием/спадом плотности до нуля на протяжении 50 мкм. Варьируемыми параметрами являются плотность плазмы и расположение перетяжки импульса, а целевыми характеристиками — наибольший заряд и энергия сформировавшегося пучка.

При низкой плотности плазмы лазерный импульс быстро расходится, и формирование электронного сгустка не происходит. С увеличением плотности плазмы эффекты нелинейной самофокусировки оказывают большее влияние на распространение излучения. В этом случае возбуждаемые волны оказываются способны ускорять часть плазменных электронов (рисунок 3 (а)) до энергии порядка 100 МэВ при плотности плазмы $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При дальнейшем повышении плотности лазерный импульс сильно истощается, что в условиях эксперимента может негативно отразиться на характеристиках пучка.

Фокусируя импульс вглубь плазмы, можно рассчитывать на увеличение суммарного ускоренного заряда (рисунок 3 (б)), при этом энергия сгустков изменяется слабо. Этот эффект связан с синергическим действием линейной фокусировки и рефракции плазмы, что приводит к увеличению интенсивности лазерного импульса и возбуждению волн большей амплитуды.

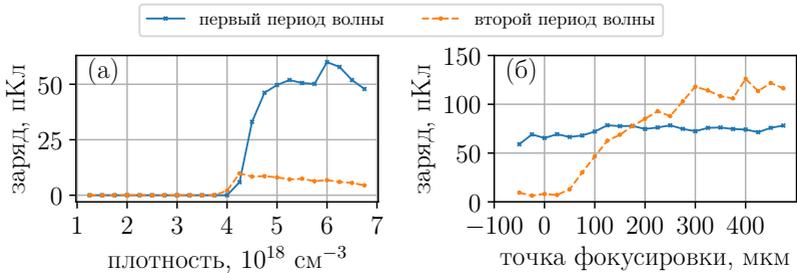


Рисунок 3 — Зависимость заряда сформировавшихся пучков от плотности плазмы (а) и положения точки фокусировки при плотности плазмы $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (б)

Также проведено моделирование PIC кодом общего назначения FVPIC для уточнения полученных результатов. Распределение плотности плазмы и сформировавшийся электронный сгусток представлены на рисунке 4 при плотности плазмы $n_0 = 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и точке фокусировки

$z_f = 300$ мкм. В отличие от рассмотренных выше результатов, происходит формирование лишь одного сгустка. Видно, что квазистатическим кодом значительно переоценивается величина захватываемого заряда (таблица 1). Другие способы выделения захваченных частиц в квазистатическом коде не привели к лучшему результату. Отметим, что вычисления с помощью кода FBPIC затрачивают в тысячу раз больше времени, чем нужно для работы квазистатического кода с использованием одинаковых вычислительных ресурсов.

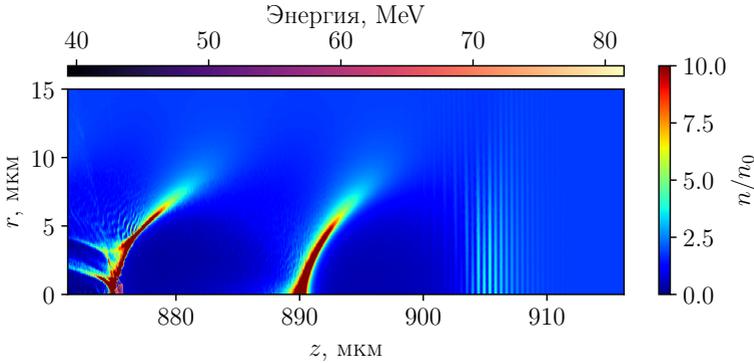


Рисунок 4 — Сформировавшийся сгусток электронов на фоне карты распределения плотности плазмы; моделирование кодом FBPIC

Из вышесказанного можно сделать вывод, что на текущий момент квазистатические коды с существующими моделями захвата частиц плазмы могут использоваться только для предварительного быстрого анализа интересующей конфигурации. Однако качественные зависимости воспроизводятся похожим образом в обоих кодах. Если в квазистатическом коде наблюдается захват малого числа электронов, то вероятней всего захвата в такой конфигурации не будет. Интерес представляют области, где квазистатический код предсказывает формирование пучка электронов с большим зарядом.

Таблица 1 — Характеристики электронов, захваченных во второй период кильватерной волны

	Энергия	Энергоразброс	Эммитанс	Заряд
FBPIC	77 МэВ	16 МэВ	8 мм мрад	18 пКл
LCODE	75 МэВ	30 МэВ	4 мм мрад	120 пКл

В четвертой главе обсуждаются ограничения классической квазистатической модели описания плазмы. В используемых уравнениях опу-

цены все малые слагаемые, связанные с производной $\partial/\partial z$, что приводит к исключению из рассмотрения волн с ненулевой групповой скоростью и неточностям при исследовании плазмы с продольным градиентом. Однако эти неточности можно попробовать устранить. Наряду с исследованием границ QSA в диссертации предложено ее возможное расширение [15] с обсуждением возможности численной реализации.

Уравнение на электрическое поле с сохранением слагаемых первого порядка малости имеет вид

$$\left(\Delta_{\perp} + 2 \frac{\partial^2}{\partial z \partial \xi} \right) \vec{E} = 4\pi \hat{\nabla} \rho - \frac{4\pi}{c} \frac{\partial \vec{j}}{\partial \xi}, \quad (2)$$

где \vec{E} — электрическое поле, ρ и \vec{j} — плотность заряда и тока, $\hat{\nabla} = (\nabla_{\perp}, \partial_z + \partial_{\xi})$, а подстрочный индекс \perp обозначает двумерные (поперечные) операторы. Аналогично записывается уравнение на магнитное поле. Радиальное положение макрочастицы в сечении взаимодействия драйвера с плазмой должно отвечать уравнению

$$\left. \frac{\partial r_p}{\partial \xi} \right|_z = \frac{1}{v_z - c} \left(v_r - v_z \left. \frac{\partial r_p}{\partial z} \right|_{\xi} \right), \quad (3)$$

где \vec{v} — скорость макрочастицы. Аналогично можно выписать уравнения для остальных характеристик частицы. При этом классическое QSA является предельным случаем предложенной модели (AQSA).

Для исследования возникающих в QSA неточностей при описании отклика плазмы в сильнонелинейных волнах рассмотрим распространение гауссова электронного пучка с поперечным и продольным размерами 3 мкм и 10 мкм, соответственно, релятивистским фактором $4 \cdot 10^4$ и пиковым током 11 кА. Профиль плазмы изображен в верхнем ряду рисунка 5. Конечная плотность плазмы $n_0 = 2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ определяет единицу электрического поля $E_0 = \sqrt{4\pi n_0 m_e c^2}$.

QSA хорошо работает в областях однородной плотности плазмы (рисунок 5, левая и правая колонки). В области градиента плотности классическое QSA дает иной отклик плазмы, чем AQSA и PIC (средний столбец на рисунке 5). В отличие от QSA, AQSA воспроизводит удлинение плазменной волны (особенность 1 на рисунке 5) и более протяженную область высокой плотности вблизи оси (особенность 2), наблюдаемую при моделировании без приближений. Оба эффекта вызваны продольно движущимися электронами плазмы, которые приходят из предыдущих областей, где плотность плазмы ниже и волна длиннее. Причина различий в форме пика поля в AQSA и FBPIC (особенность 3) еще не до конца ясна и вероятнее всего связана с численной реализацией. Форма “хвостовой” волны, наблюдаемой после области градиента плотности (особенность 4), также отличается в QSA и AQSA или FBPIC. Эта волна (видимая как гребень

плотности) содержит электроны плазмы высокой энергии, ускоренные в областях плазмы, через которые пучок прошел ранее. Поскольку плотность плазмы там ниже, эти электроны появляются при больших $|\xi|$, и фронт хвостовой волны изгибается, что видно в моделировании AQSA и FBPIC, но не в QSA.

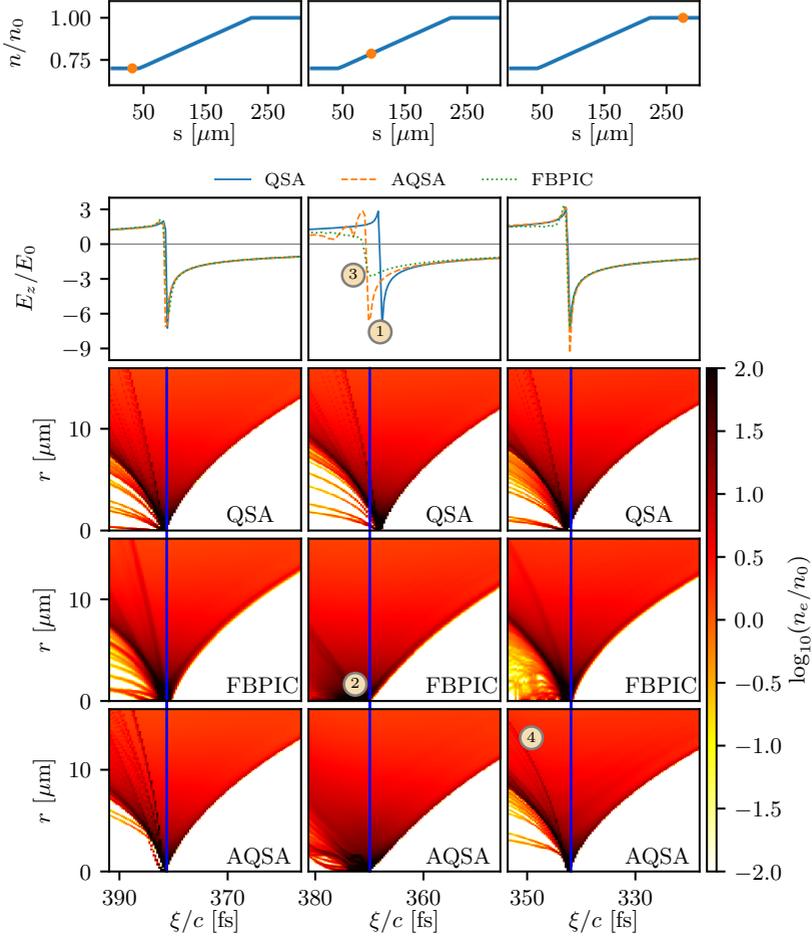


Рисунок 5 — Сравнение FBPIC и LCODE с использованием QSA и AQSA моделей. В первом (верхнем) ряду показано расположение рассматриваемых сечений (оранжевые точки) на профиле плотности плазмы. Во втором ряду показано продольное электрическое поле $E_z(\xi)$, рассчитанное с помощью рассмотренных моделей, а в остальных рядах — карты электронной плотности. Синие вертикальные линии на картах плотности показывают положение минимума поля E_z для AQSA

Отметим, что моделирование с использованием AQSA в 80 раз быстрее PIC кода, что близко теоретическому пределу ускорения вычислений, равному отношению шагов моделирования $\Delta s/\Delta \xi = 100$. Дальнейшее развитие этой модели представляет большой интерес. Результаты четвертой главы подтверждают выводы, сделанные во второй и третьей главах: если для правильного описания некоторых явлений требуется удерживать в уравнениях дополнительные слагаемые, то без этих слагаемых описание этих явлений будет, в лучшем случае, иметь качественный характер.

Пятая глава посвящена обсуждению точности традиционно используемых в волноводной теории приближений в области параметров, интересной для лазерного кильватерного ускорения. В рассмотренных ранее режимах плазма служит не только ускоряющей структурой, но и фокусирующей. Такой режим является не самым эффективным для передачи энергии от драйвера к витнессу. Для работы в более эффективных режимах активно применяется каналирование излучения капиллярами. Наиболее сильным является прямое каналирование стенками капилляра, в этом случае любой материал стенки ведет себя как металл.

Ранее проведенные эксперименты в ИЛФ СО РАН выявили, что отражающие свойства металла не зависят от интенсивности импульса вплоть до 10^{17} Вт/см² [16]. Этот факт позволяет полагаться на линейную теорию. В задаче присутствуют два малых параметра: поверхностный импеданс металла ζ и отношение длины волны излучения λ к радиусу капилляра a . При $|\zeta| \ll \lambda/a < 1$ получается классическое решение волноводной теории, в случае $\lambda/a \ll |\zeta| \ll 1$ существует другое решение [9].

Однако параметры, интересные для кильватерного ускорения ($\lambda = 850$ нм, $a = 15$ мкм и материал стенок медь), находятся близко к переходной области, и для их рассмотрения была построена полуаналитическая теория. Для основной моды приближенное решение предсказывает темп затухания с точностью 20% (рисунок 6 (а)), для более высоких мод ошибка увеличивается из-за изменения соотношения малых параметров.

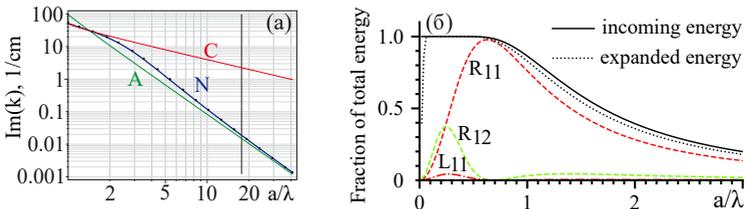


Рисунок 6 — Скорости затухания для основной моды, вычисленные в приближении $|\zeta| \ll \lambda/a < 1$ ('C'), в приближении $\lambda/a \ll |\zeta| \ll 1$ ('A') и численно ('N'). Вертикальная линия соответствует рассматриваемым параметрам (а). Доля энергии лазера, попадающая в отдельные моды волновода, в зависимости от радиуса падающего импульса (б)

При рассмотрении возбуждения мод линейно поляризованным лазерным импульсом (рисунок 6 (б)) было обнаружено более существенное отличие. Структура мод в приближенном решении такова, что возбуждается только R -серия, что при точном решении оказывается неверным.

В заключении изложены основные результаты работы и даются рекомендации по дальнейшему развитию темы.

В приложениях А и Б детально обсуждается численная реализация модели из главы 4 для плоской и цилиндрической геометрий, соответственно. Во многом она основана на схеме, применяемой в LCODE, которую можно восстановить, сократив малые параметры.

Заключение

Разработан устойчивый алгоритм восстановления распределения плотности сверхзвуковой газовой струи при малой оптической толщине. С его помощью измерены параметры газовой струи, создаваемой спроектированным в ИЛФ СО РАН соплом Лавалья. Характерный размер квазиоднородной области составляет 0.8 мм, а плотность газа достигает $5.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что является приемлемым для экспериментов по лазерному кильватерному ускорению.

Проанализированы несколько вариантов модификации квазистатического приближения для исследования захвата плазменных электронов в кильватерную волну. Показано несовершенство моделей, ограничивающихся простым переводом частиц из плазменных в пучковые. Реализована модификация квазистатического кода, позволяющая производить быстрые оценки возможности захвата электронов плазмы кильватерной волной. Достигается прирост производительности на три порядка по сравнению с обычными PIC кодами.

Обнаружено, что фокусировка лазерного импульса вглубь плазмы позволяет инициировать формирование моноэнергетического сгустка электронов при параметрах взаимодействия, потенциально реализуемых в ИЛФ СО РАН. При этом взаимодействие происходит в умеренно нелинейном режиме, формирование электронного сгустка происходит во втором периоде кильватерной волны, и ускоренные электроны имеют энергию порядка 75 МэВ.

Показано, что классическое квазистатическое приближение не учитывает ряд эффектов, важных для исследования сильнонелинейных волн. Поэтому захват плазменных электронов следует изучать на базе более точной модели. Построение такой модели возможно, а ее предсказания согласуются как с аналитической теорией, так и с моделированием из первых принципов. Однако предложенная модель еще не включает эффекты захвата плазменных электронов, а устойчивость численной схемы не гарантируется. Рекомендуется продолжить дальнейшее развитие этой модели. В первую очередь важно разработать точную численную схему для пред-

ложенных уравнений, обладающую абсолютной устойчивостью. А затем приступить к тестированию в широком диапазоне параметров и исправлению обнаруженных неточностей.

Построена полуаналитическая теория, позволяющая определять модовый состав волновода в широкой области параметров. Особенно рассматривались параметры, интересные для кильватерных экспериментов: длина волны излучения 850 нм при радиусе капилляра 15 мкм. Обнаружено, что существующие приближенные теории имеют заметные неточности как в коэффициентах заглухания, так и в возможности возбуждения отдельных мод линейно-поляризованным лазерным импульсом. Выводы линейной теории согласуются с проведенными ранее экспериментами.

Список публикаций автора по теме диссертации:

1. **Tuev, P. V.** Attenuation of waveguide modes in narrow metal capillaries / P. V. Tuev, K. V. Lotov. — Текст : электронный // Journal of the Optical Society of America A. — 2021. — Vol. 38, nr 1. — P. 108–114. — URL: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.410552>. — Дата публикации: 24.12.2020.
2. Algorithm for supersonic gas jet density profile retrieval from interferometric measurement / S. V. Avtaeva, K. V. Gubin, V. I. Trunov, **P. V. Tuev**. — Текст : электронный // Journal of the Optical Society of America A. — 2019. — Vol. 36, nr 5. — P. 910–917. — URL: <https://doi.org/10.1364/JOSAA.36.000910>. — Дата публикации: 25.04.2019.
3. **Туев, П. В.** Формирование ускоряемого сгустка из электронов плазмы при моделировании кильватерного ускорения квазистатическим кодом / П. В. Туев, А. П. Соседкин, К. В. Лотов. — Текст : электронный // Сибирский физический журнал. — 2017. — Т. 12, № 4. — С. 14–19. — URL: <http://dx.doi.org/10.25205/2541-9447-2017-12-4-14-19> (дата обращения: 12.09.2022).
4. **Tuev, P. V.** Optimization of moderate-power laser pulse interaction with plasmas using quasistatic simulations / P. V. Tuev, K. V. Lotov. — Текст : электронный // Proceedings of the 47th EPS Conference on Plasma Physics (Sitges, Spain, 21–25 June 2021). — Sitges, 2021. — Vol. 45A. — P2.2004. — URL: <http://ocs.ciemat.es/EPS2021PAP/pdf/P2.2004.pdf> (дата обращения: 12.09.2022).
5. **Tuev, P. V.** Mode structure of a short laser pulse propagating through a metal capillary / P. V. Tuev, K. V. Lotov. — Текст : электронный // Proceedings of the 43rd EPS Conference on Plasma Physics (Leuven, Belgium, 4–8 July 2016). — Leuven, 2016. — Vol. 40A. — P5.088. — URL: <http://ocs.ciemat.es/EPS2016PAP/pdf/P5.088.pdf> (дата обращения: 12.09.2022).

Список литературы

- [1] Nakaјima, K. Laser-driven plasma electron acceleration and radiation / K. Nakaјima. — Текст : электронный // Reviews of Accelerator Science and Technology. — 2016. — Vol. 9. — P. 19–61. — URL: <http://dx.doi.org/10.1142/S1793626816300024> (дата обращения: 09.09.2022).
- [2] Hooker, S. M. Developments in laser-driven plasma accelerators / S. M. Hooker. — Текст : электронный // Nature Photonics. — 2013. — Vol. 7. — P. 775–782. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.234>. — Дата публикации: 27.09.2013.
- [3] Laser-driven plasma wakefield electron acceleration and coherent femtosecond pulse generation in X-ray and gamma ranges / V. I. Trunov, K. V. Lotov, K. V. Gubin [et al.]. — Текст : электронный // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 793. — P. 012028. — URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/793/1/012028> (дата обращения: 09.09.2022).
- [4] Characterization of neutral density profile in a wide range of pressure of cylindrical pulsed gas jets / V. Malka, C. Coulaud, J. P. Geindre [et al.] — Текст : электронный // Review of Scientific Instruments. — 2000. — Vol. 71, nr 6. — P. 2329–2333. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.1150619>. — Дата публикации: 01.06.2000.
- [5] Vay, J.-L. Simulations for Plasma and Laser Acceleration / J.-L. Vay, R. Lehe. — Текст : электронный // Reviews of Accelerator Science and Technology. — 2016 — Vol. 9. — P. 165–186. — URL: <http://dx.doi.org/10.1142/S1793626816300085>. — Дата публикации: 14.07.2014.
- [6] Mora, P. Kinetic modeling of intense, short laser pulses propagating in tenuous plasmas / P. Mora, T. M. Antonsen. — Текст : электронный // Physics of Plasmas. — 1997. — Vol. 4. — P. 217–229. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.872134>. — Дата публикации: 03.09.1998.
- [7] Morshed, S. Efficient simulation of electron trapping in laser and plasma wakefield acceleration / S. Morshed, T. M. Antonsen, J. P. Palastro. — Текст : электронный // Physics of Plasmas. — 2010. — Vol. 17. — P. 063106. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3432685>. — Дата публикации: 16.06.2010.
- [8] Absorption of Ultrashort Laser Pulses by Solid Targets Heated Rapidly to Temperatures 1-1000 eV / D. F. Price, R. M. More, R. S. Walling [et al.].

- Текст : электронный // *Physical Review Letters*. — 1995. — Vol. 75. — P. 252–255. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.252>. — Дата публикации: 10.07.1995.
- [9] Kotelnikov, I. A. Attenuation in Waveguide / I. A. Kotelnikov. — Текст : электронный // *Technical Physics*. — 2004. — Vol. 49. — P. 1196–1201. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/1.1800242> (дата обращения: 09.09.2022).
- [10] Lotov, K. V. Fine wakefield structure in the blowout regime of plasma wakefield accelerators / K. V. Lotov. — Текст : электронный // *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*. — 2003. — Vol. 6. — P. 061301. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.6.061301>. — Дата публикации: 06.06.2003.
- [11] LCODE: [сайт]. — <https://lcode.info/> (дата обращения 09.09.2022). — Яз. англ. — Текст : электронный.
- [12] A spectral, quasi-cylindrical and dispersion-free Particle-In-Cell algorithm / R. Lehe, M. Kirchen, I. A. Andriyash [et al.]. — Текст : электронный // *Computer Physics Communications*. — 2016. — Vol. 203. — P. 66–82. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2016.02.007>. — Дата публикации: 01.06.2016.
- [13] Takeda, M. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry / M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. — Текст : электронный // *Journal of the Optical Society of America A*. — 1982. — Vol. 72, nr 1. — P. 156–160. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/JOSA.72.000156>. — Дата публикации: 01.01.1982.
- [14] A direct comparison of high-speed methods for the numerical Abel transform / D. D. Hickstein, S. T. Gibson, R. Yurchak [et al.]. — Текст : электронный // *Review of Scientific Instruments*. — 2019. — Vol. 90. — P. 065115. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.5092635>. — Дата публикации: 25.06.2019.
- [15] Tuev, P. V. Advanced quasistatic approximation / P. V. Tuev, R. I. Spitsyn, K. V. Lotov. — Текст : электронный // Препринт [arxiv.org](https://arxiv.org/abs/2205.04390). — URL: <https://arxiv.org/abs/2205.04390> (дата обращения: 09.09.2022).
- [16] Guiding femtosecond high-intensity high-contrast laser pulses by copper capillaries / K. V. Lotov, K. V. Gubin, V. E. Leshchenko [et al.]. — Текст : электронный // *Physics of Plasmas*. — 2015. — Vol. 22. — P. 103111. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4933354>. — Дата публикации: 19.10.2015.

Туев Петр Викторович

**Развитие методов теоретического исследования
плазменного кильватерного ускорения с лазерным
драйвером тераваттного уровня мощности**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 10.10.2022

Подписано в печать 12.10.2022

Формат 60×90/16 Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 10

Обработано на РС и отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11