

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Голованова Антона Александровича
«Сильно нелинейные кильватерные ускоряющие структуры
в неоднородной плазме»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.08 — физика плазмы

Диссертационная работа Антона Александровича Голованова сфокусирована на развитии теоретических методов исследования сильно нелинейного режима кильватерной волны, возбуждаемой мощным лазерным импульсом или сгустком заряженных частиц в неоднородной плазме. В плазменных кильватерных волнах создаются сильные продольные электрические поля, подходящие для создания на их основе компактных ускорителей заряженных частиц. Развитие лазерной техники и достижение больших пиковых мощностей позволило перейти в сильно нелинейный режим кильватерного ускорения, в котором возможен захват и ускорение плазменных электронов. Экспериментальные исследования сильно нелинейных лазерно-плазменных ускорителей показали перспективность их использования для получения электронных сгустков с энергией больше 1 ГэВ. При этом для применения таких ускорителей на практике необходима оптимизация их параметров, к которым относится и использование плазменных мишеней с управляемой продольной или поперечной неоднородностью, в том числе с различными плазменными каналами, что обуславливает **актуальность** настоящей работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы, списка публикаций автора по теме диссертации и списка иллюстративного материала. Общий объем диссертации составляет 159 страниц, включая 51 рисунок и 1 таблицу; основной список литературы содержит 165 наименований, список авторских работ — 17 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования и представлен достаточно полный обзор современного состояния по его тематике; сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, научная и практическая значимость; кратко изложено содержание глав диссертации; указаны степень достоверности и апробация результатов; отмечен личный вклад автора; представлены положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** в подробной форме изложен известный ранее общий теоретический подход к описанию осесимметричных кильватерных волн с использованием уравнений Максвелла для электромагнитного поля и кинетических уравнений Власова для функций распределения плазменных компонент. В этой главе введены основные обозначения, система единиц измерения, а также сформулированы основные допущения, используемые при дальнейшем описании, к числу которых относится пондеромоторное описание для лазерного импульса и квазистатическое приближение, предполагающее сохранение структуры кильватерной волны при ее распространении в плазме.

Оригинальные результаты приведены в **Главах 2-5**.

В **Главе 2** предложена модель аксиально-симметричной кильватерной волны в сильно нелинейном режиме в плазме с радиально-неоднородным в поперечном направлении профилем. В этом режиме кильватерная волна имеет вид плазменной полости, из которой исключены электроны плазмы, с достаточно резкой границей. Расположенный на границе электронный слой экранирует полость от окружающей нейтральной плазмы, при этом в модели не делается предположений о поперечной форме слоя. Получено обыкновенное дифференциальное уравнение, описывающее форму полости с учетом воздействия на нее лазерного импульса и ускоряемых частиц, а также найдено его аналитическое решение, позволяющее рассчитать длину плазменной полости в плазме с каналами. Как с использованием аналитического решения, так и при помощи трехмерного численного моделирования показано, что наличие канала в плазме приводит к сокращению плазменной полости в продольном направлении. На основе разработанной модели найдены распределения компонент электромагнитного поля в пространстве как внутри, так и снаружи плазменной полости.

В **Главе 3** обсуждается взаимодействие кильватерной волны и ускоряемых электронных сгустков в случае поперечно неоднородной плазмы. Одной из рассмотренных задач является воздействие ускоряемого сгустка на плазменную полость и распределение полей в ней, в том числе предложен метод достижения наибольшей эффективности ускорения и рассчитано распределение плотности заряда в сгустке, приводящее к его ускорению в однородном поле. Кроме того, в работе рассмотрены поперечные бетатронные колебания электронов при их движении в плазме с полым каналом и рассчитаны характеристики спектра соответствующего бетатронного излучения.

В **Главе 4** развита модель плазменной полости в двумерном пространстве, играющем большую роль при проведении численного моделирования плазменных ускорителей. Как и в случае модели аксиально-симметричной полости, рассмотренной в Главе 2, предложенная модель учитывает возможность использования произвольного поперечного профиля плазмы. Как численно, так и аналитически показано, что плазменная полость в двумерном пространстве оказывается удлиненной в продольном направлении по сравнению с ее аналогом в трехмерном случае.

В **Главе 5** рассмотрено ускорение электронов в плазме с продольной неоднородностью. В качестве мишени с неоднородным профилем предложено использовать газовую ячейку, заполненную разреженным газом. Работа сочетает в себе расчет распределения концентрации газа в газовой ячейке при помощи численного моделирования гидродинамическим пакетом OpenFOAM и PIC-моделирование процесса лазерно-плазменного ускорения в рассчитанных плазменных профилях для параметров лазерной установки PEARL в Нижнем Новгороде. Полученные результаты свидетельствуют о наличии пороговой концентрации плазмы, ниже которой захват электронов и ускорение электронов не происходят, и о возможности ускорения электронов до энергии порядка 1 ГэВ для рассмотренных параметров лазерного импульса. Кроме того, проведен расчет концентрации газа в двухсекционной газовой ячейке, позволяющей создать профиль с двумя различными уровнями концентрации плазмы.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна и значимость работы не вызывает сомнений. Полученные результаты представляют собой существенное продвижение в теоретическом описании сильно-нелинейного режима кильватерной волны и могут быть использованы при интерпретации результатов экспериментов и численного моделирования. Основные результаты были неоднократно представлены на конференциях международного уровня и изложены в 17 работах, в том числе в 10 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах Web of Science и Scopus.

Достоверность результатов подтверждается физической аргументированностью и использованием хорошо зарекомендовавших себя теоретических методов, а также хорошим согласием разработанных теоретических моделей с результатами трехмерного численного

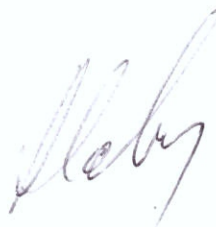
моделирования методом частиц в ячейках, основанным на базовых физических принципах. Сформулированные в тексте диссертации основные результаты и положения, выносимые на защиту, **обоснованы** и полностью соответствуют содержанию.

Диссертация написана грамотно и ясно, сопровождается качественным иллюстративным материалом и представляет собой целостное законченное исследование, что подтверждает высокий научный уровень соискателя. Естественно, что диссертационная работа не лишена и некоторых **недостатков**:

1. Все защищаемые положения написаны без привязки к параметрам создающего полость излучения. Привязка к лазерному драйверу и его характеристикам полностью отсутствует. Второе защищаемое положение больше похоже на выводы по результатам работы
2. При обсуждении общей постановки задачи хотелось бы увидеть оценки области параметров, где справедливо пондеромоторное приближение, а также количественный критерий, отделяющий сильно нелинейную плазменную волну от просто нелинейной волны.
3. Общее замечание по работе сводится к тому, что автор уделяет основное внимание характеристикам ускоряющей полости, хотя основная цель – создание подходов и моделей для расчета ускорения электронов. Необходимо было сравнить результаты прямого численного моделирования ускорения электронов с расчетами в рамках развиваемых автором подходов.
4. В главе 5 проведено сравнение расчетов в двумерной и трехмерной геометриях. Сравняются опять же характеристики ускоряющей полости, а не динамика и спектр (энергетический, угловой) формирующегося электронного пучка. По результатам этой главы логично было бы увидеть рекомендации по применению двумерных расчетов к рассматриваемой задаче: когда и что можно (или нельзя).
5. Ряд замечаний по тексту: в формуле 1.4 явно используются нормированные переменные времени и координаты, а самой нормировки я не нашел; во второй главе не всегда ясно, о каком драйвере- электронном или лазерном идет речь, имеются перескоки с одного типа драйвера на другой «без предупреждения»; при моделировании кодом Smilie концентрация плазмы взята в $40n_p$, хотя ранее было $25 n_p$.
6. Работа почти свободна от опечаток и жаргонизмов, однако ряд неудачных выражений все же встречается: «при длине импульса в несколько десятков фемтосекунд», «размер отверстия в перегородке между двумя секциями сильно меньше».

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку диссертации и носят скорее рекомендательный характер. Работа выполнена на высоком научном уровне и прошла апробацию на российских и международных конференциях, основные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации. Диссертационная работа Голованова Антона Александровича полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
профессор
кафедры общей физики и волновых процессов
физического факультета
Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова



А. Б. Савельев-Трофимов

Контактная информация:

Савельев-Трофимов Андрей Борисович,
доктор физико-математических наук,
профессор
физический факультет
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
тел.84959395318, e-mail: abst@physicsc.msu.ru

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора А. Б. Савельева-Трофимова заверяю

Декан
физического факультета
Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова

