



Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

Ульянова ул., 46, Бокс-120, Нижний Новгород, 603950

Тел. (831) 436-62-02
Факс (831) 416-06-16
E-mail: dir@ipfran.ru
http://www.ipfran.ru
ОКПО 04683326, ОГРН 1025203020193,
ИНН/ КПП 5260003387/526001001

УТВЕРЖДАЮ

Директор учреждения
д.ф.-м.н., академик РАН
Денисов Григорий Геннадьевич



17 ноября 2022 г.

№ _____

На № _____ от _____

ОТЗЫВ

Ведущей организации Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» на диссертационную работу Туева П.В. «Развитие методов теоретического исследования плазменного кильватерного ускорения с лазерным драйвером тераваттного уровня мощности», представленную в качестве диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. — Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация Туева П.В. посвящена относительно новому направлению исследований: плазменным методам ускорения заряженных частиц. Наибольшее внимание, уделяется лазерно-плазменным методам, где существуют перспективы сделать компактные, высокоградиентные ускорители. Предполагается, что размеры таких ускорителей будут на несколько порядков меньше ускорителей, основанных на стандартных технологиях. В настоящий момент в этой области получены впечатляющие результаты. Энергия ускоренных электронов достигла 8 ГэВ, что сравнимо с энергией частиц в рентгеновских лазерах на свободных электронах (ЛСЭ). При этом следует отметить, такая энергия была получена на длине в несколько десятков сантиметров, в то время как длина ускорителя для рентгеновских ЛСЭ достигает сотни метров и километры. В то же время многие вопросы в области лазерно-плазменного ускорения остаются открытыми, в том числе дизайн и диагностика газовой мишени, численное моделирование ускорения, особенно на длинных трассах и т.д. Часть этих вопросов рассмотрена в диссертационной работе Туева П.В. Таким образом, тематику работы и исследуемые в ней задачи следует признать **актуальными и важными.**

Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций и их достоверность подтверждаются, в частности, прямым сравнением с результатами эксперимента, а также численным моделированием с использованием нескольких

компьютерных кодов. В диссертационной работе предложен **новый** метод для измерения плотности в газовой струе, в том числе в случае больших относительных ошибок. Представлена **новая** модель, позволяющая анализировать волноводные моды в металлических капиллярах. Предложенные в диссертационной работе методы использовались для восстановления профиля газа в сверхзвуковой струе в экспериментах в ИЛФ СО РАН. Для установки в ИЛФ СО РАН найдены параметры взаимодействия лазерного излучения со струей, оптимальные для кильватерного ускорения. Это подтверждает **теоретическую и практическую значимость** результатов диссертации. Следует, также отметить, что **личный вклад** Туева П.В. в результаты диссертационной работы был определяющим. В частности, им были разработаны оригинальные модели и вычислительные программы, позволившие решить поставленные в диссертации задачи.

В первой главе представлен устойчивый алгоритм восстановления плотности газа, основанный на интерференционных методах. Проведено экспериментальное исследование работоспособности алгоритма, которое показало устойчивость алгоритма даже для высокого уровня измерительных шумов.

Во второй главе подробно описан квазистатический метод для численного моделирования кильватерного ускорения в плазме. Метод основан на предположении, что плазменные поля помимо поперечных координат зависят не просто от продольной координаты и времени, а от их комбинации. Основной проблемой квазистатического подхода является принципиальная невозможность учета захваченных в кильватерную волну частиц. В рамках данной работы обсуждаются возможные дополнения к квазистатической модели для учета захвата частиц. Предложена квазистатическая модель, учитывающая захват электронов плазмы в кильватерную волну. Хотя для разработанной модели точное описание захвата частиц в широкой области параметров пока невозможно, модель можно использовать для быстрого сканирования исследуемой области параметров, чтобы потом ее можно было проверить стандартным PIC кодом.

В третьей главе численный код на основе разработанной модели был использован для сканирования области параметров (плотность плазмы и точка фокусировки лазерного излучения в газовой струе) для нахождения оптимальных условий кильватерного ускорения. Найденные условия были проверены и уточнены с помощью численного моделирования стандартным PIC кодом (FBPIC код).

В четвертой главе представлено расширение квазистатической модели. Вначале выведены основные уравнения модели, а затем дано описание ее численной реализации. Тестирование кода на основе модели показало, что код позволяет с высокой точностью рассчитывать распространение лазерного импульса в вакууме. Расчет кодом распространения лазерного импульса в плазме с продольным градиентом плотности показал небольшие отличия от результатов расчета стандартным PIC кодом.

В пятой главе исследовано распространение лазерного импульса в узких капиллярах, где импульс находится в контакте со стенками капилляра. Вначале представлена линейная теория мод в таких капиллярах, где использованы граничные условия Леонтовича. Показано, что при определенном радиусе падающего лазерного импульса до 98% начальной энергии переходит в слабоза- тухающую основную моду.

В приложениях А и Б представлены численные схемы улучшенного плазменного решателя для декартовой и цилиндрической геометрии, соответственно.

Вышеизложенное составляет содержание пятерых основных глав и двух приложений диссертации. Диссертационная работа также содержит Введение с кратким обзором литературы, с формулировками целей, актуальности и основного содержания работы. В Заключение сформулированы основные результаты. Диссертация правильно оформлена, имеет ясную и логически-обоснованную структуру. Тема диссертации полностью соответствует ее содержанию, которое соответствует специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Текст автореферата правильно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Туева П.В. выглядит как добротное, достоверное и завершенное исследование, в котором исследованы особенности кильватерного ускорения в плазме, а также предложены методы моделирования этого явления. Результаты диссертации хорошо обоснованы. Вместе с тем она не лишена и недостатков, которые можно сформулировать в виде **замечаний** и комментариев:

- 1) В первой главе, повышение точности восстановления профиля концентрации продемонстрировано численно на белом шуме. Однако, ошибка измерений в эксперименте содержит спектральные особенности, которые в оценках не учитывались и могут существенно повлиять на результат.
- 2) В диссертационной работе предложена модификация квазистатического кода с целью учета захвата плазменных электронов в нелинейную кильватерную волну. Представленный в работе анализ различных способов такой модификации показал, что они не способны обеспечить точное описание процесса захвата. Тем не менее в диссертации предлагается и используется модифицированный квазистатический код для быстрого сканирования по лазерно-плазменным параметрам с целью нахождения эффективных режимов ускорения. В таком случае следует указать область применимости данной модифицированной версии квазистатического кода, где есть надежда получить хотя бы качественно правильные результаты.
- 3) Такое же замечание можно адресовать к расширению квазистатической модели, представленному в Главе 4. Как следует из полученных результатов (см. Рис. 4.8), расширенная модель в отдельных случаях может неточно описывать распределение электрического поля в задней части плазменной полости, что может быть важно для корректного описания ускорения электронов. В этом случае следует знать область применимости расширенной модели.
- 4) В третьей главе проводится оптимизация расположения перетяжки лазерного импульса относительно газовой струи в диапазоне, сопоставимом с релеевской длиной. В то же время, геометрическое наведение на мишень вдоль лазерной оси с субрелеевской точностью является проблематичным с экспериментальной точки зрения, особенно в условиях остаточных aberrаций в перетяжке. Не значит ли это, что результаты, полученные в главе, никогда не смогут быть продемонстрированы в эксперименте?

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 Туевым П.В. результаты опубликованы в статьях в рецензируемых журналах, докладывались на многих российских и международных конференциях, известны научной общественности. Диссертация Туева П.В. является научно-квалификационной работой, в

которой на основании выполненных автором исследований содержатся решения задач, имеющих существенное значение для развития отрасли знания, соответствующей специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника. Таким образом, диссертационная работа полностью соответствует требованиям специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, предъявляемым к диссертациям, а соискатель достоин присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Доклад Туева П.В., отражающий основные результаты диссертации, был заслушан на научном семинаре Отделения нелинейной динамики и оптики Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» 14 ноября 2022 г. Работа получила положительную оценку участников семинара.

Отзыв составил:
Заведующий отделом 330
Федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной физики
Российской академии наук»
доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.08 — Физика плазмы

тел. 8 8314164831
e-mail: kost@ipfran.ru



Костюков Игорь Юрьевич

Отзыв утвержден на научном семинаре Отделения нелинейной динамики и оптики Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» 14 ноября 2022 г.

Подпись сотрудника ИПФ РАН Костюкова Игоря Юрьевича заверяю:
Ученый секретарь ИПФ РАН
к.ф.-м.н. Корюкин И.В.

