

## ОТЗЫВ

официального оппонента Крауза Вячеслава Ивановича  
на диссертационную работу Земскова Романа Сергеевича  
“Магнитогидродинамические и кинетические процессы при взаимодействии  
высокоскоростных потоков лазерной плазмы с сильным магнитным полем”,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.9 - физика плазмы

Диссертационная работа Роман Сергеевича Земскова посвящена комплексному экспериментально-теоретическому исследованию взаимодействия лазерно-индуцированных плазменных потоков с сильными внешними магнитными полями, величиной до 18 Тл. Исследование выполнено в рамках актуального междисциплинарного направления — на стыке физики плазмы, физики высоких плотностей энергии и лабораторной астрофизики. Работа сочетает лабораторные эксперименты и численное моделирование, что обеспечивает всесторонний анализ изучаемых процессов.

**Целью исследования** являлось изучение структуры, динамики и устойчивости плазменных потоков, создаваемых при облучении твёрдых мишеней лазерным излучением различной длительности — наносекундными и фемтосекундными импульсами — при схожих флюенсах, а также выявление закономерностей их взаимодействия с магнитными полями различной конфигурации. В рамках поставленной задачи автор исследовал процессы формирования диамагнитных каверн, развитие неустойчивостей Рэлея–Тейлора и Вейбеля, механизмы коллимации плазменных джетов и влияние холловских эффектов на эволюцию плазменных структур.

Экспериментальная часть работы выполнена на современном петаваттном лазерном комплексе PEARL, обладающем уникальными возможностями для лабораторного моделирования астрофизических процессов. Для диагностики плазменных потоков использованы методы

интерферометрии, поляриметрии и теневого фотографирования, что позволило получать пространственно-временные картины эволюции плазмы с высоким разрешением. Существенным элементом исследования является применение численного моделирования с использованием PIC-, гибридных и радиационных МГД-кодов (FLASH), позволившего количественно описать наблюдаемые явления и подтвердить экспериментальные результаты.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы.

**Во Введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цели, задачи и положения, выносимые на защиту, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

**Первая глава** носит обзорно-методологический характер: рассматриваются основы лабораторного моделирования астрофизических процессов, методы масштабирования, а также описываются экспериментальные возможности лазерного комплекса PEARL и используемых диагностик.

**Вторая глава** содержит результаты исследований плазменных потоков, созданных наносекундными импульсами, их взаимодействия с внешними магнитными полями и процессов коллимации. Автором экспериментально показано образование диамагнитных каверн, развитие неустойчивостей Рэлея–Тейлора, формирование «плазменного листа», распространяющегося поперек магнитного поля. Также реализован эксперимент с оригинальной конфигурацией магнитного поля типа «песочных часов», имеющий прямое отношение к моделированию коллимации джетов молодых звезд.

**Третья глава** посвящена изучению плазмы, создаваемой фемтосекундными импульсами релятивистской интенсивности. Впервые наблюдаются долгоживущие филаментационные структуры, связанные с развитием вейбелевской неустойчивости, а также выявлены особенности динамики фемтосекундно-индуцированных потоков при взаимодействии с магнитными полями, включая проявление холловских эффектов и переход от

классической неустойчивости Рэлея–Тейлора к её модифицированной форме. Проведен сравнительный анализ динамики плазменных потоков при облучении мишени импульсами различной длительности и показано значительное различие в динамике потоков созданных лазерным излучением нано- и фемтосекундной длительности. Описаны оригинальные эксперименты по взаимодействию двух встречных потоков.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**Тема диссертации безусловно актуальна** и соответствует современным приоритетам фундаментальной и прикладной физики плазмы. Лабораторное моделирование астрофизических процессов на установках высокой мощности является одним из наиболее перспективных направлений исследований, позволяющим воспроизводить условия, недостижимые для прямых наблюдений. Результаты работы важны для понимания механизмов коллимации астрофизических джетов, генерации магнитных полей и развития плазменных неустойчивостей, а также представляют практический интерес для задач управляемого термоядерного синтеза и верификации численных моделей.

**Работа содержит комплекс новых научных результатов.** Впервые проведено сравнительное исследование динамики наносекундно- и фемтосекундно-индуцированных плазменных потоков при одинаковых флюенсах; наблюдаются диамагнитные каверны и жёлобковые неустойчивости Рэлея–Тейлора, а также зарегистрирована долгоживущая вейбелевская неустойчивость в плазме, созданной фемтосекундной лазерным импульсом релятивистской интенсивности, а также формирование «плазменного листа». Установлено влияние холловских эффектов на эволюцию плазменных структур. Впервые проведено лабораторное моделирование коллимации астрофизических джетов в геометрии полоидального магнитного поля типа «песочных часов»

**Личный вклад** соискателя в представляемую работу является определяющим, начиная с подготовки и выполнения экспериментов (в том

числе по схемам, предложенным лично соискателем), обработки и интерпретации экспериментальных данных, заканчивая выполнением численных расчётов и в подготовки публикаций.

Диссертация представляет собой завершённое научное исследование, характеризующееся логической структурой и высоким качеством оформления. Материал изложен чётко и последовательно, результаты сопровождаются иллюстрациями и аналитическими моделями. Автореферат адекватно отражает содержание работы. Основные результаты опубликованы в 13 научных трудах, включая 9 статей в рецензируемых журналах, что свидетельствует о высокой степени апробации и признании научным сообществом.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена применением нескольких независимых диагностик, сопоставлением экспериментальных данных с результатами PIC-, гибридного и МГД-моделирования, а также публикацией результатов в ведущих международных изданиях (журналы Q1–Q2). Выводы и положения логично вытекают из совокупности экспериментальных данных и численных расчётов. Автор последовательно демонстрирует связь между наблюдаемыми явлениями и расчётными моделями, что подтверждает корректность интерпретации. Результаты согласуются с современными представлениями о поведении плазмы в сильных магнитных полях и с результатами, полученными на других установках, что подтверждает адекватность предложенных методических подходов.

Диссертация в целом производит очень хорошее впечатление. Эксперименты проведены на уникальной установке PEARL, работа на которой накладывает высокие требования к профессионализму экспериментатора. Следует отметить широкий спектр постановки оригинальных экспериментальных задач и большой объем полученных новых результатов. При этом важность постановки экспериментов хорошо обоснована, а использование численных методов раскрывает дополнительные возможности

в интерпретации полученных результатов. Изложение материала логически выверено и создает цельное представление о работе.

К работе имеется ряд замечаний.

1) В обосновании теоретической и практической значимости отмечается, что «Результаты лабораторных исследований, выполненных с лазерной плазмой, взаимодействующей с внешними магнитными полями, необходимы для верификации и проверки численных кодов и аналитических моделей, применяемых для описания явлений в астрофизике, физике термоядерной плазмы и физике высоких плотностей энергии». В то же время в диссертации основной упор сделан именно на астрофизику. Более того, глава 1 целиком посвящена именно астрофизическим проблемам. По моему мнению, это занижает реальную значимость полученных результатов, которая на самом деле гораздо выше.

2) Что касается описания экспериментальных подходов к лабораторной астрофизике, хочется отметить, что круг решаемых задач, значительно шире обсуждаемых в разделе. А при описании моделирования астрофизических джетов следовало бы упомянуть работы на Z-пинчах и планарных ускорителях.

Ну и нужно отметить некоторую некорректность фразы «Важнейшую роль в генерации и коллимации джетов играет самогенерированное тороидальное магнитное поле [86], воспроизведение которого в лаборатории представляет значительную сложность. В работе [156] с помощью продвинутых магнитозондовых методик было экспериментально доказано существование азимутального магнитного поля в установках плазменного фокуса». В плазменном фокусе (как и в Z-пинчах) азимутальное поле существует по определению, что обусловлено схемой эксперимента. Трудности имеются в создании продольного (полоидального) поля.

3) На странице 43 отмечено: «В этом случае параметры  $M$  и  $MA$  характеризуют важные энергетические соотношения в плазме, например  $MA$  отражает отношение кинетической энергии плазмы и энергии магнитного поля

в одном и том же объеме.» Но выше утверждается, что проникновение магнитного поля в плазму ограничивается тонким скин-слоем. Так о каком же одном и том же объеме идет речь?

4) На стр. 92 написано, что «что плазменная бета  $\beta$  в обоих случаях фемтосекундной и наносекундной плазмы меньше нуля», а «Числа Рейнольдса в обоих случаях фемтосекундной и наносекундной плазмы заметно выше нуля». Непонятно, каким образом  $\beta$  может быть меньше нуля. Видимо в обоих случаях имелась ввиду 1, а не 0.

5) В диссертации часто употребляются выражение «горячие электроны», температура (часто выше 100 кэВ!). И только на стр. 86 отмечается, что распределение может быть не Максвеловским и речь идет о некой «эффективной» температуре. Мне кажется, что нужно было уточнять, о какой температуре идет речь в каждом конкретном случае, и объяснить, что подразумевается под «эффективной» температурой.

6) Материал диссертации изложен достаточно ясно, в целом воспринимается хорошо. Конечно, в тексте есть и опечатки и жаргонные выражения, что, тем не менее, не приводит к большим проблемам в восприятии текста. Однако расположение рисунков в тексте, на мой взгляд, могло быть лучше. Так, например, первое упоминание о рис. 2.4 сделано на 43 странице. Сам же рисунок появляется только на 45 странице, уже после описания рисунка 2.5, который, в свою очередь, появляется лишь на 47 странице, уже в следующем разделе. В ряде случаев наоборот – рисунок появляется задолго до первого упоминания. Все это существенно затрудняет восприятие текста. К тому же на самом рис. 2.5 нумерация панелей дана русскими буквами, а в подписи к рисунку – латиницей. Это же замечание относится к рис. 3.15.

Указанные замечания не снижают научной ценности и общего уровня выполненного исследования.

Можно заключить, что диссертация Р.С. Земскова «Магнитогидродинамические и кинетические процессы при взаимодействии

высокоскоростных потоков лазерной плазмы с сильным магнитным полем» является завершенной работой, имеющей важное значение для физики плазмы и удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (действует с 01.01.2014 г.), которые предъявляются к кандидатским диссертациям, а ее автор Земсков Роман Сергеевич, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Выражаю согласие на обработку диссертационным советом моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,  
начальник лаборатории ФГБУ Национальный  
исследовательский центр «Курчатовский институт»  
(г. Москва).



Крауз Вячеслав Иванович

Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный  
исследовательский центр «Курчатовский институт»

Адрес: 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

Тел.+7 (495) 196 7622; Электронный адрес: [krauz\\_vi@nrcki.ru](mailto:krauz_vi@nrcki.ru)

Подпись В.И. Крауза заверяю:

Первый заместитель главного ученого секретаря –  
руководитель службы главного ученого секретаря

НИЦ «Курчатовский институт»



Борисов К.Е.