

ОТЗЫВ

доктора физико-математических наук, заведующего отделом Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН Гасилова Владимира Анатольевича, на автореферат диссертации Чайковского Станислава Анатольевича «Экспериментальные исследования формирования плотной излучающей плазмы в диодах наносекундных генераторов тока мегаамперного диапазона», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Проблемы, рассматриваемые в диссертации С.А. Чайковского, сконцентрированы на экспериментальном исследовании плотной высокотемпературной плазмы, генерируемой в скин-слое на цилиндрических проводниках при электровзрыве импульсом тока амплитудой порядка нескольких мегаампер и временем нарастания около 100 нс. Сюда входят процессы магнитной диффузии, нелинейной вследствие взаимовлияния материала скин-слоя и магнитного поля на соответствующие параметры, развития поверхностных неустойчивостей; изучение физических процессов при сжатии каскадированных плазменных оболочек (лайнеров), обеспечивающих формирование интенсивно излучающих в диапазоне выше 1 кэВ пинчей, создание компактных генераторов тока и разработка методики рентгеновского теневого зондирования на основе X-пинчей.

Мотивацией для данного отзыва на автореферат диссертации С.А. Чайковского является то обстоятельство, что рассматриваемые в его работе существенно нелинейные процессы в настоящее время активно изучаются как экспериментально, так и путем многопараметрических вычислительных экспериментов с математическими моделями различной сложности (или содержательности). Такие модели, представленные системами дифференциальных уравнений в частных производных, имеют мультифизичный характер, описывают большую совокупность физических процессов взаимодействия вещества и электромагнитного поля, которую в целях численного анализа требуется воспроизвести посредством той или иной дискретизации, т.е. переходом к компьютерному аналогу исходного физико-математического описания явления. Как правило, реалистичные модели плазмы пинчей включают описание теплофизических и оптических свойств плазмы, учитывающее экспериментальные данные – либо непосредственно в виде эмпирических зависимостей, либо в виде поправочных коэффициентов для рассчитанных по квантовомеханическим моделям свойств вещества, и т.п. Поэтому зачастую ситуация такова, что для систем уравнений плазодинамических моделей не доказаны теоремы,

устанавливающие их математическую корректность (существование, единственность решения, непрерывную зависимость от входных данных задачи). В то же время свойства дискретных аналогов этих моделей (аппроксимация, устойчивость), определяющие в конечном итоге сходимость численных решений к решениям исходных начально-краевых задач при повышении уровня дискретизации (например, в разностных схемах - измельчении шага конечно-разностной расчетной сетки, в методах типа "частица в ячейке" - измельчение ячеек и увеличение числа частиц, и т.п.), поддаются теоретическому анализу только в определенных условиях, зачастую при весьма больших упрощениях, линеаризации уравнений модели и т.д. Поэтому в плане развития вычислительных моделей физики плазмы весьма важны такие экспериментальные данные, которые позволяют провести апробацию компьютерных моделей, их калибровку с тем, чтобы повысить предсказательную надежность численного моделирования. Работа С.А. Чайковского как раз и дает обширный экспериментальный материал для проверки расчетных методик.

Представленная работа безусловно удовлетворяет критерию актуальности, поскольку рассматриваемые в ней проблемы в настоящее время интенсивно изучаются в Российской Федерации и за рубежом, о чем свидетельствуют многочисленные публикации в научной периодике и трудах конференций по физике плазмы. Она удовлетворяет и критерию новизны, поскольку в ней представлены оригинальные экспериментальные методики автора, с помощью которых им получены новые данные по плазмообразованию при электровзрыве цилиндрических проводников и динамике плазменных лайнеров.

Из полученных результатов выделим те, которые, по нашему мнению, наиболее интересны в отношении постановок вычислительных экспериментов развития кодов для предсказательного моделирования Z-пинчей для новых типов экспериментов на уровне мощности 100-1000 ТВт:

1. Динамика распространения фронта тока в проводник и ударной волны, их взаимное влияние, с учетом уравнений состояния и некоторой матрицы проводимости. Представляет интерес зависимость результатов измерений скорости диффузии магнитного поля от параметров ударной волны.

2. Формирование и развитие неустойчивостей на поверхности металла. В диссертации получен большой массив экспериментальных изображений плазмы при различной индукции поля для различных металлов. Интересна взаимосвязь при развитии перегретых

неустойчивостей и плазменных перетяжек. Развитие таких неустойчивостей иллюстрируется рисунками в главе 9 диссертации.

3. Плазмодинамическое переключение тока с внешнего каскада плазменного лайнера на внутренний. В двухкаскадных плазменных лайнерах распределение вещества можно представлять в виде двух оболочек, одна из которых (внутренняя) вложена в другую (внешнюю). Интерес к двухкаскадным системам возник достаточно давно, примерно в начале 80-х годов. Однако интерес к таким системам сохраняется и в настоящее время благодаря тому, что в них привлекает дополнительная возможность повышения эффективности нагрева плазмы сравнительно с однокаскадной системой. Использование оболочек из разных веществ, и оптимизация сжатия за счет различия не только размеров и масс оболочек, но также их теплофизических и оптических свойств обуславливает итоговый эффект обострения мощности, подводимой к внутреннему каскаду.

Представляет интерес проверка путем численного анализа механизма переключения в том виде, как это предполагается в диссертации. Здесь необходимо делать акцент на возможно более точное моделирование развития гидромагнитной (Релей-Тейлоровской) неустойчивости, выхода неустойчивости на нелинейную стадию и турбулилизацию плазмы, а также эффектов "прорыва" плазменной оболочки магнитным потоком и образования "магнитных пузырей".

Эти процессы необходимо изучать в двумерной и трехмерной постановках задач, для чего необходима настройка кодов радиационной магнитной плазмодинамики по экспериментальным данным.

В своей диссертационной работе С.А. Чайковский экспериментально демонстрирует высокую эффективность нагрева плазмы внутреннего каскада двухкаскадного лайнера. Показано, что при определенных параметрах лайнера можно повысить мощность и выход излучения электронов К-оболочки за счет применения двухкаскадной структуры лайнера. Основной причиной повышения эффективности генерации К-излучения автор обоснованно считает улучшение устойчивости сжатия плазмы и возможность за счет этого повысить компактность финального плазменного пинча. Улучшение компактности сжатия может быть достигнуто при высоком удельном энерговкладе, что обеспечивает высокую конечную температуру плазмы.

Примечательным экспериментальным фактом является то, что применение лайнера двухкаскадной структуры позволяет и на медленных генераторах микросекундного диапазона достичь значений выхода К-

излучения, типичных для быстрых генераторов с временем нарастания тока около 100 нс. В отличие от быстрых генераторов, на микросекундных генераторах необходимо использовать лайнер с большим начальным радиусом для того, чтобы обеспечить необходимое для генерации К-излучения ионизационное состояние плазмы. Это существенно усложняет задачу компактного сжатия плазмы, в частности, из-за развития неустойчивостей релей-тейлоровского типа.

При прочтении автореферата возникли следующие замечания.

1. Одним из несомненных достижений диссертационной работы является создание компактных генераторов для X-пинчей на основе низкоиндуктивной конденсаторной батареи. Здесь достигнуты малый размер "яркого" источника рентгеновского излучения (2-4 мкм) и синхронизация с внешним устройством на уровне 10 нс. В тексте диссертации упоминаются аналогичные предшествующие разработки, например, генератор "ПИАФ", созданный Л. А. Аранчуком в Политехнической школе (Франция, г. Палезо). Однако было бы целесообразно уделить больше внимания сравнительному анализу таких разработок.

2. Автором собран обширный экспериментальный материал, позволяющий составить достаточно полное описание имплозии двухкаскадных лайнеров. Тем самым открылась бы возможность построения новых математических моделей, и проведения вычислительных экспериментов в новых постановках задачи имплозии электродинамически ускоряемых составных лайнеров. Это необходимо для развития количественной теории имплозии, в частности, для надежного прогнозирования результатов будущих экспериментов. Однако, автор в ряде случаев не решается делать однозначные утверждения о характере физических процессов при сжатии лайнера. В результате соответствующие пункты разделов автореферата "научная новизна" и "научная ценность" имеют несколько расплывчатые формулировки.

В целом диссертационную работу С.А. Чайковского можно охарактеризовать как целостное завершённое исследование, вносящее крупный вклад в развитие электрофизических методов создания и исследования плотной импульсной плазмы, и заслуживающее высокой положительной оценки. Результаты, полученные С.А. Чайковским, достаточно апробированы, обладают несомненной новизной, имеют высокий научный уровень и большую практическую ценность. Выносимые на защиту положения аргументированы и достоверны. Основные результаты работы опубликованы в открытой печати, они обсуждались на многих авторитетных российских и международных конференциях и симпозиумах.

Автореферат по форме и содержанию удовлетворяет требованиям ВАК для докторских диссертаций, а соискатель Чайковский Станислав Анатольевич заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 - электрофизика, электрофизические установки.

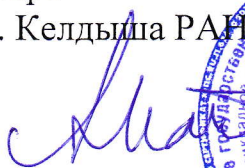
Заведующий отделом "Математические модели и численные методы высокотемпературной гидродинамики" ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
доктор физ.-мат. наук



Гасилов Владимир Анатольевич
тел. +7 (499) 972-38-55
e-mail vgasilov@keldysh.ru

Федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша
Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН),
Российская федерация, 125047, Москва, Миусская пл., 4,
office@keldysh.ru
+7 (499) 950 79 19

Подпись заведующего отделом
д.ф.-м.н. В.А.Гасилова заверяю:
Ученый секретарь
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
К.ф.м.н.



А.И. Маслов

" " июля 2016 г.