

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук

Никулина Валерия Яковлевича

**на диссертационную работу Митрофанова Константина Николаевича
«Экспериментальное исследование особенностей плазмообразования и
токового сжатия плазмы лайнеров различных конструкций»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности: 01.04.08 – Физика плазмы.**

Диссертационная работа посвящена исследованию особенностей имплозии многопроволочныхборок различных конструкций (цилиндрические одиночные и вложенные сборки), в том числе и моделированию трехмерного сжатия плазмы (конические и квазисферические сборки). Основная часть экспериментов по исследованию процесса затянутого плазмообразования и динамики сжатия плазмы в таких лайнерах выполнена на одной из самых мощных электрофизических установок, как в России (на установке Ангара-5-1), так и за рубежом.

Актуальность темы работы

Высокотемпературная плазма, получаемая в результате имплозии лайнеров, является мощным источником рентгеновского излучения в диапазоне энергий от десятков эВ до нескольких кэВ. Физика таких источников излучения изучается в ведущих мировых научных центрах (напр. национальная лаборатория Сандия в США и Империял колледж в Англии). Интерес обусловлен тем, что легкие лайнеры (Z-пинчи) могут служить токовой нагрузкой и излучателем для сверхмощных установок следующего поколения (с током более 50 МА). Предполагается, что такие установки будут способны обеспечить зажигание термоядерной мишени для УТС и составят конкуренцию системам, основанным на ионных пучках и на лазерном облучении.

Более глубокое понимание процессов, происходящих при имплозии лайнера (затянутое плазмообразование, токовый предвестник, развитие магнитной Релей-Тейлоровской неустойчивости на финальной стадии

имплозии и др.), имеет решающее значение для оптимизации параметров плазменной нагрузки для осуществления устойчивого режима сжатия плазмы и получения максимального выхода рентгеновского излучения, как на существующих сильноточных генераторах (Ангара-5-1, С300, ГИТ-12, ВМГ, ZR, PTS, MAGPIE и др.), так и на генераторах следующего поколения (напр. Байкал, X-1 и др.). В связи с этим, результаты, представленные в диссертационной работе, являются актуальными.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Результаты и выводы диссертанта обоснованы и достоверны, они основаны на большой экспериментальной информации, полученной с помощью набора взаимодополняющих современных диагностических методик. Экспериментальные результаты в основном согласуются с результатами компьютерного моделирования при помощи численных РМГД кодов, учитывающих явления, присущие имплозии проволочныхборок – процесс затянутого плазмообразования, проникновение магнитного поля внутрь сборки и др. Рекомендации по выбору конструкции проволочного лайнера для осуществления различных режимов сжатия плазмы достоверны и проверены экспериментально.

Оценка новизны и достоверности.

Достоинством диссертационной работы является полнота проведенного исследования, охватывающего большинство явлений, сопутствующих имплозии проволочныхборок различных конструкций: затянутое плазмообразование тонких проволок (Al, Fe, Cu, Mo, W) и волокон (капрон и лавсан) различных веществ, в том числе, ранее недоступных для изучения (In, Sn, Bi); проникновение токового предвестника в приосевую область сборки; прорыв магнитного потока внутрь сборки на стадии окончания плазмообразования и развитие магнитной Релей-Тейлоровской неустойчивости, шунтирование части разрядного тока Z-пинча отставшей плазмой и др. При этом показано, что интенсивность плазмообразования является важной

величиной, определяющей весь процесс имплозии проволочных и волоконныхборок, в частности, распределение вещества и магнитного поля при сжатии проволочной сборки и, в конечном счете, влияющей на образование Z-пинча и выход мощного импульса рентгеновского излучения.

Соискателем разработаны оригинальные конструкции магнитных зондов, позволивших провести ему измерения распределения магнитного поля в плазме различных типов проволочныхборок. В результате исследований была подтверждена и уточнена модель гетерогенного лайнера, развиваемая коллективом установки Ангара-5-1.

Соискателем впервые проведено количественное сравнение величин интенсивности плазмообразования вольфрамовыхборок, полученных в экспериментах в режиме быстрого Z-пинча на установке Ангара-5-1 и в условиях плазмодусового разряда на установке ПФ-3, и показано их хорошее соответствие друг другу.

На основе полученных количественных данных об интенсивности плазмообразования различных веществ сконструированы различные конструкции лайнеров с заданной динамикой сжатия плазмы. Так, например, при имплозии двухкаскадных вложенныхборок смешанного состава (внешний каскад – волоконная сборка, внутренний каскад – вольфрамовая сборка) экспериментально реализован режим устойчивого сжатия плазмы внутреннего каскада, благодаря чему получен высокий выход рентгеновского излучения до 4-5 ТВт длительностью около 5 нс. В экспериментах по сжатию вложенныхборок с внешним квазисферическим каскадом продемонстрировано значительное увеличение (в 4-9 раз) плотности потока мощности и энергии МРИ по сравнению со случаем имплозии одиночных вольфрамовых квазисферическихборок с подобными параметрами.

Достоверность получения автором диссертации результатов, приведенных в диссертационной работе, подтверждена публикацией большого количества работ (около сорока) в виде статей в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК, в том числе, статей в иностранных журналах,

препринтах, тезисов докладов, представленных на международных конференциях по физике плазмы и УТС.

Основные результаты диссертационной работы были подтверждены результатами других исследовательских групп в России и за рубежом: в США, КНР и Великобритании. Например, в экспериментах с проволочными и волоконными сборками на различных электрофизических установках (напр. MAGPIE и ZR), в том числе, и в экспериментах на установках Ангара-5-1, С300 и ПФ-3, было показано сходство процессов, происходящих при сжатии плазмы таких лайнеров: длительное плазмообразование, наличие плазменного предвестника с током в приосевой области сборки, как следствие затянутого во времени плазмообразования с проволок или волокон.

В целом, диссертация Митрофанова К.Н. производит очень хорошее впечатление. Результаты исследования обладают несомненной новизной и вносят существенный вклад в физику легких лайнеров. Необходимо отметить большой объем проделанной экспериментальной работы, выполненной на высоком методологическом уровне. Диссертант внес большой личный вклад в разработку методики измерения магнитных полей, ее отработку в экспериментальных условиях на различных мощных электрофизических установках, проведение и анализ экспериментов. Это характеризует соискателя, как вполне сложившегося исследователя, умеющего самостоятельно ставить и решать сложные физические задачи.

Однако, несмотря на имеющиеся многочисленные достоинства работы, в ней обнаруживаются и отдельные недостатки, которые серьезно не влияют на представленные выводы и результаты:

1. Автором было показано, что при имплозии вложенныхборок возможна реализация различных режимов течения плазмы между каскадами (сверхальфвеновский, доальфвеновский и режим с образованием переходной области – ударной волны между каскадами). Однако, при этом не совсем ясно, какой из режимов сжатия предпочтителен для улучшения выходных параметров МРИ (длительность, мощность).

2. В диссертации представлены результаты экспериментов по сжатию вольфрамовых проволочныхборок в условиях плазмофокусного разряда на установке ПФ-3. Токово-плазменную оболочку (ТПО), сжимающуюся в область расположения проволочной сборки, можно рассматривать как некий аналог внешнего каскада во вложенных проволочныхбороках. В связи с этим, в исследованиях не полностью нашел отражение вопрос взаимодействия ТПО и проволочной сборки. Возможно ли создать такие условия взаимодействия ТПО и проволочной сборки, при которых формируется ударная волна в пространстве между ТПО и проволочной сборкой и возможна ли реализация режима устойчивого сжатия плазмы вольфрамовой сборки?

Впрочем, отмеченные недостатки не снижают высокого качества исследования и общую положительную оценку диссертационной работы. Полученная экспериментальная информация по имплозии плазмы лайнеров различных конструкций важна для проверки и усовершенствования РМГД кодов, описывающих сжатие таких нагрузок и учитывающих явление затянутого плазмообразования, распределение магнитного поля внутри лайнера, развитие неустойчивостей плазмы и радиационные потери. Экспериментальные результаты диссертационной работы будут использованы при проектировании установок будущего поколения (напр. Установки Байкал в России и X-1 в США).

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Основные результаты опубликованы достаточно полно.

Таким образом, диссертационная работа представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны научно-обоснованные положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в области физики плазмы и УТС, имеющее прямое отношение к таким приоритетным направлениям развития науки как энергетика и энергосбережение.

Таким образом, диссертационная работа представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны научно-обоснованные положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в области физики плазмы и УТС, имеющее прямое отношение к таким приоритетным направлениям развития науки как энергетика и энергосбережение.

Диссертационная работа и ее автореферат соответствует требованиям п. 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утверждённого постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, **Митрофанов Константин Николаевич**, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Отзыв составил:

И.о. заведующего лабораторией физики плотной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук

Никулин Валерий Яковлевич

« 04 » сентября 2019 г.

Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, 53.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

тел.: +7(499) 132-69-31, e-mail: nikulinvy@lebedev.ru

Подпись Никулина В.Я. заверяю:

Ученый секретарь ФИАН, кандидат физико-математических наук

/ Колобов Андрей Владимирович/