

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук

Школьникова Эдуарда Яковлевича

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

Диссертационная работа посвящена исследованию динамики сжатия плазмы лайнераов - проволочных и волоконных сборок. На сегодняшний день такие многопроволочные сборки относятся к наиболее мощным лабораторным источникам мягкого рентгеновского излучения (МРИ). Они используются для различных приложений фундаментального и технологического характера. Среди наиболее интересных приложений следует отметить использование проволочных сборок в исследованиях по инерциальному термоядерному синтезу (ИТС).

Основной целью проведенных исследований было получение экспериментальных данных о сжатии плазменных лайнераов различных конструкций (одиночные проволочные и волоконные сборки, конические сборки, вложенные сборки смешанного состава, квазисферические сборки). Следует отметить, что в диссертационной работе представлен большой экспериментальный материал и проведено сравнение полученных результатов с результатами численного моделирования.

Актуальность темы работы.

В настоящее время в мире ведутся исследования различных конструкций плазменных лайнераов, использующихся как в схемах ИТС («*Dynamic*

Hohlraum», «*Double Z-Pinch Hohlraum*» или «*Vacuum Hohlraum*», «*Magnetized Liner Inertial Fusion*» [MagLIF] и ее вариации «*AutoMag*»), так и в отдельных частях этих схем для облучения т/я мишени. Для этих целей активно проводятся эксперименты по сжатию токонесущих плазменных нагрузок (в данном случае проволочных сборок) для получения мощных источников мягкого рентгеновского излучения на основе Z-пинча. Поэтому при конструировании лайнеров для установок нового поколения необходимо понимание физики их сжатия с целью получения максимальных параметров импульса МРИ.

В связи с вышесказанным, тематика диссертационной работы, направленная на изучение особенностей имплозии проволочных сборок различных конструкций, таких как затянутое плазмообразование и его характеристики – интенсивности плазмообразования, исследование распределения магнитного поля внутри сжимающейся плазмы, получение режимов устойчивого сжатия плазмы, формирования компактного Z-пинча и профилирование импульса МРИ, представляется актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, основана на большой базе экспериментальных данных, полученных на нескольких мощных электрофизических установках в России и за рубежом с помощью комплекса взаимодополняющих диагностических методик, в том числе развитых лично соискателем (миниатюрные магнитные зонды). Экспериментальные результаты в основном согласуются с теоретическими оценками и численными расчетами и подтверждены результатами других исследователей. Часть результатов демонстрирует ранее неисследованные аспекты имплозии плазмы в многопроволочных сборках, например, особенности взаимодействия плазменных потоков во вложенных сборках. В экспериментах с двухкаскадными вложенными сборками реализованы различные режимы

течения плазмы между каскадами: сверхальфеновский, доальфеновский и режим с образованием переходной области – ударной волны, надежно зарегистрированной на кадровых оптических и рентгеновских изображениях. При этом получены режимы устойчивого сжатия плазмы внутреннего каскада и образования компактно сжатого Z-пинча с высоким уровнем мощности МРИ (до 5 ТВт).

Оценка новизны и достоверности.

Научная новизна проделанной работы обусловлена параметрами экспериментальных установок (Ангара-5-1, ПФ-3, КПФ-4-Феникс, PF-1000U), на которых проводились исследования, оригинальностью разработанных диагностических методик и полученных с помощью них результатов:

- впервые подробно исследованы пространственно-временные характеристики проникновения магнитного поля вместе с плазмой внутрь проволочных сборок различных конструкций и легких пенных лайнеров. Это стало возможным, благодаря усовершенствованной магнитозондовой диагностике, позволяющей проводить надежные измерения магнитного поля в плазме с высоким энерговыделением на магнитный зонд вплоть до ~ 1 ТВт/см² и $\sim 10\text{--}20$ кДж/см²;

- впервые определена интенсивность плазмообразования проволочных и волоконных сборок, изготовленных из различных веществ (капрон, лавсан, Al, нерж. сталь, Cu, In, Sn, Bi, Mo и W), в том числе, ранее недоступных для изучения в виде проволок или волокон;

- существенное различие в величине интенсивности плазмообразования металлических проволок и пластиковых волокон позволило сконструировать и испытать новые конструкции лайнеров – металлизированные волоконные сборки, квазисферические сборки с заданным профилем линейной массы проволок или волокон;

- впервые реализованы различные режимы течения плазмы между каскадами вложенных сборок (сверххальфвеновский, доальфвеновский и режим с образованием переходной области - ударной волны) и получено устойчивое сжатие плазмы внутреннего каскада. Определены физические условия реализации того или иного режима сжатия плазмы в сборках такого типа. На основе новых экспериментальных данных предложен возможный сценарий взаимодействия плазмы каскадов;
- показана перспективность использования квазисферической сборки в качестве внешнего каскада вложенных сборок с целью получения высокого уровня потока мощности и энергии на т/я мишень.

Достоверность представленных результатов работы подтверждена публикацией большого количества статей по теме диссертации (39 статей) в реферируемых журналах и докладов, представленных на отечественных и международных конференциях по физике плазмы и УТС.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, однако, в качестве недостатков необходимо отметить следующее:

1. в экспериментах с проволочными и металлизированными волоконными сборками показано, что величина интенсивности плазмообразования имеет сильную зависимость от разрядного тока в виде $\dot{m}(t) \propto I^2(t)$, однако, до конца не проработан вопрос о том, как ведет себя величина $\dot{m}(t)$ на финальной стадии плазмообразования, когда она должна стремиться к нулю;
2. в экспериментах с волоконными сборками, металлизированными различными веществами с высоким атомным номером, показано, что вначале происходит сжатие основной массы плазмы из вещества металлизации, а после происходит сжатие вещества отставшей плазмы пластиковых волокон, которая может шунтировать до 30-50 % тока Z-пинча. Не до конца осталось выясненным, возможно ли уменьшить такие «потери» разрядного тока Z-пинча;

3. В диссертации приведены данные измерений магнитных полей и восстановления пространственных распределений плотности тока и магнитного поля внутри цилиндрической проволочной сборки, но на графиках не указана погрешность такого восстановления;
4. В диссертационной работе представлены результаты измерений магнитных полей при помощи магнитных зондов, которые являются контактным методом измерения и, естественно, возмущают плазму и магнитное поле в ней. Было бы желательно провести сравнение полученных результатов с результатами измерений магнитных полей, полученными при помощи других методик.

Несмотря на перечисленные недостатки, работа выполнена на хорошем экспериментальном уровне, вносит существенный вклад в понимание физики сжатия плазмы многопроволочных сборок, исследуемой на мощных электрофизических установках. Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Представленные в данной работе исследования актуальны и обладают новизной. Полученные результаты работы будут использованы для расчета и проектирования крупных электрофизических установок будущего поколения, генерирующих импульс рентгеновского излучения для ИТС и других приложений, для проверки численных кодов, описывающих сжатие проволочных сборок, изготовленных из различных веществ, и учитывающих явление затянутого плазмообразования для создания излучателей с большим выходом МРИ.

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

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:

заведующий кафедрой электротехники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ «МИФИ»), доктор физико-математических наук

Школьников Эдуард Яковлевич
«20» июня 2019 г.

Адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ «МИФИ»)

тел.: +7 (495) 788 56 99, доб. 9263, +7 (499) 284 64 60, доб. 9263

e-mail: EYShkolnikov@mephi.ru



Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ
А.А. Абатурова