

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук
академик РАН Н.А. Ратахин Н.А. Ратахин

«02 » июля 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации 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»

Диссертация К.Н. Митрофанова посвящена экспериментальным исследованиям процесса сжатия быстрых плазменных лайнераов различных конфигураций, проводимых на сильноточных импульсных генераторах терраваттного уровня мощности.

Тема диссертационной работы является актуальной, так как тематика определена задачами, связанными с решением проблемы управляемого инерциального термоядерного синтеза (ИТС). Основной акцент в диссертации сделан на создании мощных источников рентгеновского излучения для облучения термоядерных мишеней в различных схемах ИТС: «Dynamic Hohlraum», «Double Z-Pinch Hohlraum» (или «Vacuum Hohlraum»), «Magnetized Liner Inertial Fusion» (MagLIF) и ее вариации «AutoMag». Данные схемы и их отдельные элементы в настоящее время отрабатываются и тестируются как в научно-исследовательских организациях России, так и за рубежом. В рамках этих работ проводятся исследования различных конструкций плазменных лайнераов. Поэтому для конструирования установок нового поколения необходимо понимание физических процессов, протекающих при сжатии плазменных лайнераов, с целью получения максимальных интегральных и удельных параметров импульса рентгеновского излучения. В диссертации приводятся результаты исследований различных типов лайнераов: одиночные проволочные и волоконные сборки, конические сборки, двухкаскадные вложенные сборки смешанного состава и квазисферические сборки.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, списка литературы из 250 наименований, Заключения и двух Приложений. Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, показана научная новизна, сформулированы цели и задачи, решенные в ходе выполнения исследований, описана структура работы, изложены положения, выносимые на защиту, описана практическая и научная ценность работы, а так же её апробация.

В первой главе диссертационной работы описаны технические параметры и характеристики электрофизических установок, на которых проводились исследования: установка Ангара-5-1 (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), плазмофокусные установки ПФ-3 (НИЦ

«Курчатовский институт»), PF-1000 (ИФПиЛМ, Варшава, Польша) и КПФ-4-Феникс (СФТИ, Абхазия). Представлена часть диагностических методик данных установок, использованных в экспериментах и развиваемых как самим автором, так и его коллегами. Большое внимание уделено диагностике измерения магнитных полей в сжимающихся многопроволочных лайнерах с помощью магнитных зондов. Проанализированы факторы, ограничивающие применение данной методики. Представлены усовершенствованные конструкции миниатюрных магнитных зондов для измерения распределений магнитных полей в плазме с высокой плотностью энергии. Обоснован выбор формы и размеров оболочки зонда, при которых зонд вносит в плазму минимальные возмущения.

Во второй главе представлены результаты экспериментов по исследованию явления затянутого плазмообразования в одиночных проволочных и волоконных сборках, изготовленных из различных веществ (капрон, лавсан, Al, нерж. сталь, Cu, Mo и W) или пластиковых волокон, металлизированных напылением различных металлов (Al, In, Sn, Bi). Получены количественные значения интенсивности плазмообразования $\dot{m}(t)$ для экспериментальных условий установки Ангара-5-1. Проведено количественное сравнение $\dot{m}(t)$ вольфрамовых проволок при сжатии многопроволочных сборок в условиях вакуума на установке Ангара-5-1 и при сжатии W-сборок в условиях плазмофокусного разряда на установке ПФ-3. В экспериментах с цилиндрическими и коническими проволочными сборками проверена функциональная зависимость $\dot{m}(t) \propto (I/R_0)^2$, то есть интенсивности плазмообразования от тока разряда I и начального радиуса R_0 .

В третьей главе представлены результаты исследований особенностей динамики сжатия плазмы одиночных проволочных и волоконных сборок, изготовленных из различных веществ. Получены радиальное, азимутальное и аксиальное распределения магнитного поля внутри плазмы сборок, восстановлено радиальное распределение плотности тока. Показано, что окончание плазмообразования на проволоках сборки происходит локально и несинхронно в различных местах вдоль длины проволок. Это приводит к локальному прорыву магнитного потока внутрь объема проволочной сборки на финальной стадии сжатия проволочной сборки. Исследовано влияние несинхронности срабатывания модулей установки Ангара-5-1 на проникновение магнитного поля внутрь проволочной сборки, которое приводит к несимметричному сжатию плазмы и к понижению выхода рентгеновского излучения.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов и компьютерного моделирования по сжатию двухкаскадных соосных многопроволочных сборок, как одной из перспективных конструкций лайнера для ИТС. На основе данных главы 2 показано, что в зависимости от выбора отношения интенсивностей плазмообразования внутреннего и внешнего каскадов и их радиусов в пространстве между каскадами реализуется тот или иной режим течения плазмы. Возможны следующие режимы течения: доальфвеновский; сверхальфвеновский; течение плазмы с образованием области ударной волны. В экспериментах получены все указанные режимы течения плазмы. Предложен возможный сценарий взаимодействия плазмы внешнего и внутреннего каскадов вложенных сборок.

В пятой главе представлены результаты экспериментов по сжатию плазмы пенно-проводолочных, винтовых вложенных сборок и вложенных сборок с внешним каскадом квазисферической формы. Эксперименты со винтовыми вложенными сборками (“basket

arrays") показали, что такая конструкция лайнера может быть использована в таких схемах ИТС, как MAGLiF или AutoMAG, для создания начального аксиального магнитного поля последующего его сжатия. В экспериментах с "basket arrays" и пенно-проводочными конструкциями лайнеров зарегистрировано замедление образования предвестника на оси лайнера в процессе затянутого плазмообразования, что позволяет уменьшить неблагоприятное воздействие плазменных потоков на термоядерную мишень. В опытах по сжатию квазисферических многопроволочных сборок оценена перспективность осуществления сжатия плазмы в данной конструкции сборки.

В Заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

В Приложении 1 представлен метод восстановления радиальной скорости сжатия плазмы из измерений градиента индукции магнитного поля внутри многопроволочной сборки во время ее имплозии.

В Приложении 2 представлены акты внедрения магнитозондовой диагностики на различных электрофизических установках.

К основным, наиболее значимым результатам работы, определяющим научную новизну сформулированных положений и выводов можно отнести следующее:

1. 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. Интенсивность плазмообразования с пластиковых волокон оказалась в несколько раз меньше, чем с металлических проволок. Такая существенная разница в величине интенсивности плазмообразования позволила сконструировать новые типы лайнеров – металлизированные волоконные сборки.

2. В процессе сжатия многопроволочных сборок исследованы радиальное, азимутальное и аксиальное распределения магнитного поля в плазме. Предложен метод определения радиальной скорости потока плазмы с проволочной сборки по данным измерения индукции магнитного поля и его градиента.

3. Предложен новый подход к исследованию влияния развития неустойчивостей на процесс сжатия пинча в многопроволочных сборках. Подход основан на сравнении данных о пространственной структуре рентгеновской эмиссии плазмы на внешней границе проволочной сборки вблизи ее начального радиуса, полученных из двумерных рентгеновских кадровых изображений, с данными о пространственном распределении магнитного поля в этой же области.

4. Реализованы и исследованы различные режимы течения плазмы между каскадами вложенных сборок (сверхальфвеновский, доальфвеновский и режим с образованием переходной области – ударной волны) и получено устойчивое сжатие плазмы внутреннего каскада. На основе новых экспериментальных данных предложен возможный сценарий взаимодействия плазмы каскадов.

5. Продемонстрирована перспективность применения квазисферической сборки в качестве внешнего каскада во вложенных сборках для увеличения потока мощности и энергии рентгеновского излучения на термоядерную мишень.

Достоверность основных положений и выводов диссертационной работы Митрофанова К.Н. обеспечена: глубоким анализом отечественных и зарубежных работ, в

которых рассмотрены аспекты разрабатываемой проблемы; применением современных экспериментальных методов; хорошим соответствием результатов экспериментов с результатами численного моделирования; апробацией основных результатов исследований на международных и российских научных конференциях. Результаты диссертационной работы опубликованы в 37 статьях в реферируемых журналах и 2-х препринтах.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Практическая ценность работы обусловлена тем, что в результате исследований автора:

1. Разработана методика, позволяющая в экспериментах по сжатию многопроволочных сборок проводить с помощью магнитных зондов измерения магнитного поля в плазме с высокой плотностью тепловой энергии. Созданы универсальные конструкции миниатюрных магнитных зондов для исследования пространственного распределения магнитного поля в плазме.

2. Получены новые численные данные об интенсивности плазмообразования проволочных сборок, изготовленных из различных веществ, что позволило сконструировать новые типы лайнера – металлизированные цилиндрические волоконные сборки, вложенные сборки смешанного состава и квазисферические сборки.

3. Получены новые экспериментальные данные, необходимые для верификации компьютерных кодов по моделированию токовой имплозии лайнера, учитывающих явление затянутого плазмообразования, распределение магнитного поля внутри лайнера, развитие неустойчивостей плазмы и радиационные потери.

При общей положительной оценке работы считаем необходимым сделать следующие **замечания**:

1. В диссертационной работе широко используется выражение для интенсивности плазмообразования в пренебрежении азимутальной структуры расположения проволочек (источников плазмы) в многопроволочной сборке, однако, не проанализированы условия применимости данного выражения для сборок с малым числом проволочек.

2. В разделе 1.4.3. приводится сравнение измерений токов в приосевой области с помощью зондов различной конструкции в условиях относительно медленных установок ПФ-3 и PF-1000. Очень жаль, что такое прямое сравнение не сделано для условий генератора Ангара-5-1.

3. Раздел 3.3. посвящен исследованию отставшей плазмы и отставшего тока. С учетом наличия развитой методики измерения магнитных полей с помощью магнитных зондов, можно было ожидать, что в этом разделе будут приведены данные о величине тока в приосевой области пинча в различные моменты времени при сжатии различных нагрузок. К сожалению, во всем разделе присутствует только упоминание о величине тока внутри радиуса 6 мм для сборки из капроновых волокон на момент начала первого импульса излучения. Для вольфрамовых сборок данные о токе во внутренней области сборки не приводятся вообще.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, которая выполнена на хорошем экспериментальном уровне и вносит существенный вклад в понимание физики плазмы, генерируемой на мощных

электрофизических установках. Представленные в диссертации экспериментальные исследования свидетельствуют о высокой квалификации соискателя, а сделанные в диссертационной работе выводы обоснованы и соответствуют поставленным целям и задачам. Основные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в научных изданиях и соответствуют специальности 01.04.08, все основные результаты получены при определяющем вкладе автора. Диссертация К.Н. Митрофанова является законченной научно-исследовательской работой, содержащей большой экспериментальный материал, она выполнена на высоком научном уровне и представляет интерес для специалистов, работающих в области исследования высокотемпературной плазмы и ИТС.

Диссертация 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.

Диссертационная работа Митрофанова К.Н. и материалы по данной работе рассмотрены на расширенном научном заседании Отдела высоких плотностей энергии ИСЭ СО РАН, протокол № 8 от 28 июня 2019 года.

Отзыв составил

главный научный сотрудник ИСЭ СО РАН,
доктор физ.-мат. наук

Орешкин Владимир Иванович

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический, д. 2/3.

Тел. (3822) 49-29-88, факс (3822) 49-16-77

Адрес эл. почты: oreshkin@ovpc.hcei.tsc.ru