

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий
институт инновационных и термоядерных исследований»

На правах рукописи

МИТРОФАНОВ КОНСТАНТИН НИКОЛАЕВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ
ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ И ТОКОВОГО СЖАТИЯ ПЛАЗМЫ ЛАЙНЕРОВ
РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук



Москва – 2019

Работа выполнена в АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук
ГАРАНИН Сергей Флорович
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (РФЯЦ-ВНИИЭФ), главный научный сотрудник научно-теоретического отдела фундаментальных исследований и перспективных наукоемких разработок

доктор физико-математических наук
НИКУЛИН Валерий Яковлевич
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, заведующий лабораторией физики плотной плазмы

доктор физико-математических наук
ШКОЛЬНИКОВ Эдуард Яковлевич
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ «МИФИ»), заведующий кафедрой электротехники

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), г. Томск

Защита состоится «21» октября 2019 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.023.02 при федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте www.lebedev.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.023.02
доктор физ.-мат. наук, профессор

Истомин Я.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень ее разработанности

В настоящее время на основе инерционного удержания плазмы создаются установки, использующие электромагнитную энергию сильноточных генераторов на основе емкостных накопителей, в том числе, взрывомагнитных генераторов, мощных лазерных систем, а также пучки высокоэнергичных частиц (ионов, электронов). Как правило, в большинстве таких систем происходит преобразование первоначально накопленной электромагнитной энергии в энергию рентгеновского излучения, необходимого для облучения и инерционного сжатия вещества термоядерной мишени. Сжатие вещества мишени происходит за счет реактивных сил, возникающих при испарении оболочки с помощью мощного лазерного или рентгеновского излучений. Определённые перспективы для инерциального термоядерного синтеза (ИТС) имеет использование рентгеновских лучей. Успехи в создании импульсных генераторов сверхвысокой электрической мощности ($\geq 10^{12}$ - 10^{13} Вт с энергией в импульсе в несколько мегаджоулей) привели к их широкому использованию для решения задач программы ИТС. В мире были созданы генераторы тераваттного уровня: Saturn, ZR (модернизация установки Z) – в США, Ангара-5-1 (см. рис. 1), Стенд 300, ГИТ 16 – в России, MAGPIE – в Великобритании и другие, применяемые для получения мощных источников рентгеновского излучения, а также для исследований в области термоядерного синтеза.



Рис. 1. Общий вид установки Ангара-5-1 (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»).

В настоящее время в мире активно проводятся эксперименты по сжатию токонесущих плазменных нагрузок, называемых лайнерами, для получения мощных источников мягкого рентгеновского излучения (МРИ) на основе Z-пинча. Например, в качестве лайнеров, при сжатии которых генерируется мощный импульс МРИ, используются многопроволочные

сборки, состоящие из нескольких десятков и даже сотен тонких проволок. По-видимому, первые эксперименты с лайнерами в виде проволочных сборок были выполнены еще на установке OWL II на мегаамперном уровне разрядного тока [1]. Была показана перспективность сжатия плазмы проволочныхборок, состоящих из малого числа тонких алюминиевых проволок, по сравнению с такими же одиночными проволоками.

В середине 90-х годов прошлого века было обнаружено, что использование на данных установках нагрузок в виде многопроволочныхборок с большим числом проволок приводит к существенному сокращению длительности импульса МРИ при сохранении полной энергии излучения. На сегодняшний день такие многопроволочные сборки относятся к наиболее мощным лабораторным источникам МРИ. Их можно использовать для различных приложений фундаментального и технологического характера. Среди наиболее интересных приложений следует отметить использование проволочныхборок в исследованиях по ИТС [2, 3]. После запуска в США новой установки Z было показано, что при сжатии W-проволочныхборок, состоящих из большого числа проволок (больше 100), импульсом тока ~ 18 МА за 100 нс могут быть получены импульсы МРИ ($h\nu > 200$ эВ) длительностью несколько наносекунд ($\sim 5-8$ нс), мощностью $\sim 280-320$ ТВт и энергией $\sim 1.8-2$ МДж [4]. При этом достигнут высокий (~ 1) коэффициент преобразования кинетической энергии сжатия плазмы в энергию МРИ. Далее, после модернизации установки Z в установку ZR (ток до 26 МА) были получены импульсы МРИ мощностью 350-450 ТВт и энергией 2-2.2 МДж [5]. В работах [6-8] экспериментально продемонстрировано, что такой рентгеновский источник с указанными параметрами возможно использовать для непрямого сжатия т/я мишени для ИТС [9, 10]. Получены высокий выход D-D реакции вплоть до 3×10^{11} нейтрон/имп и температура плазмы 1.1-3.0 кэВ.

Достигнутые на установке ZR параметры импульса МРИ близки к параметрам импульса рентгеновского излучения мощной лазерной системы NIF для опытов по зажиганию термоядерного топлива в мишенях непрямого облучения [11]. Это стимулировало дальнейший интерес к исследованиям Z-пинчевого разряда в качестве энергетического драйвера для сжатия мишеней непрямого облучения в различных схемах ИТС (см. рис. 2), так называемых «*Dynamic Hohlraum*», предложенной в 1988 году [7, 8, 12, 13], «*Double Z-Pinch Hohlraum*» (или «*Vacuum Hohlraum*») [14-17], «*Magnetized Liner Inertial Fusion*» (MagLIF) [18, 19] и ее вариации «*AutoMag*» [20]. Упомянутые схемы и их отдельные элементы обрабатываются в настоящее время как в России, так и за рубежом.

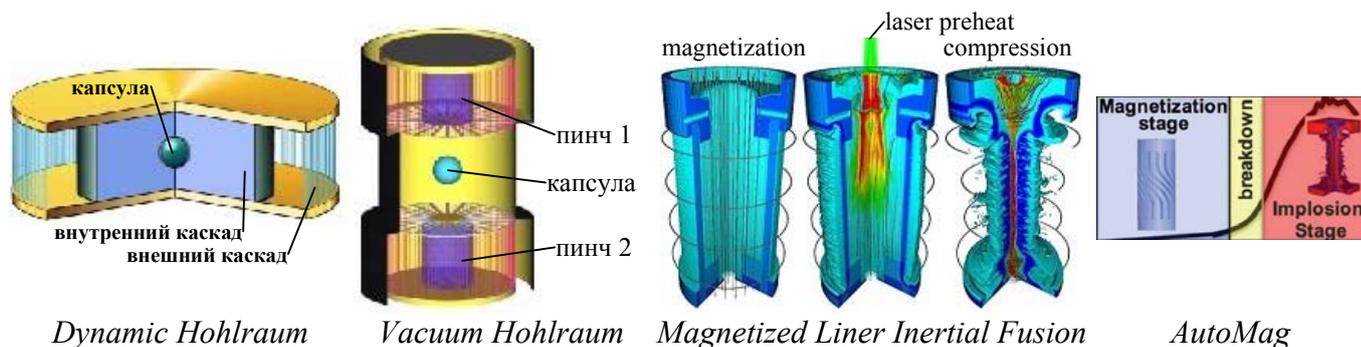


Рис. 2. Некоторые перспективные схемы ИТС (изображения взяты из сети Интернет).

На установке Ангара-5-1 было проведено теоретическое и экспериментальное исследование схемы динамического хольраума, и первые результаты были представлены в работах [12, 21]. В такой схеме используется двухкаскадная конструкция лайнера. В качестве вещества внутреннего каскада динамического хольраума используются смеси веществ из легких и средних элементов с добавкой тяжелых примесей, например, в виде пенного лайнера, внутри которого помещена термоядерная мишень. Внутренний каскад играет роль гидродинамической преграды и, в тоже время, излучателя МРИ. Плазма внешнего каскада при ударе о внутренний каскад помимо функции драйвера кинетической энергии осуществляет функцию изолирующей оболочки, препятствующей выходу излучения наружу, т.е. имеет высокую поглощающую способность. В этом случае может быть осуществлен режим усиления интенсивности и температуры излучения, падающего на мишень, расположенной внутри полости внутреннего каскада. В экспериментах на установке Z в такой схеме была получена интенсивность МРИ выше 287 ТВт/см^2 с длительностью импульса около 4 нс [6]. Яркостная температура излучения на мишень составила примерно 215 эВ.

В ходе многолетних исследований было показано сходство физики сжатия проволочныхборок на других электрофизических установках и самой мощной на сегодняшний день установке ZR, несмотря на существенное различие разрядных токов установок. Так, эксперименты [22, 24] на установке Ангара-5-1 продемонстрировали, что при уровне тока до 4 МА возможно получение импульсов МРИ длительностью около 6 нс, мощностью примерно 5-7 ТВт и энергией выше 30 кДж. Это указывает на сходство таких физических явлений, как «холодный старт» [25-27], затянутае плазмообразование [22, 28, 29], «плазменный ливень» [30], «зиппер-эффект» и др., происходящих на данных установках и присущих сжатию проволочныхборок. Действительно, в экспериментах по имплозии проволочныхборок, плазма готовится самим генератором электрической мощности в результате пространственно неоднородного электрического пробоя изначально неионизованного плазмообразующего вещества проволочек («холодный старт»). Происходит образование гетерогенной структуры - остов взорванной проволоки и окружающая его плазменная корона. Разрядный ток

перераспределяется между плазменной короной и остовом проволоки в пользу первой. Как следствие этого, вещество остовов проволок переходит в плазменное состояние не мгновенно, а в течение почти всего времени имплозии проволочной сборки («затянутое плазмообразование»). При этом интенсивность образования низкоплотной плазмы из высокоплотной $\dot{m}(t)$ [мкг/(см²·с)], приведенная к единице площади проволочного цилиндра, образованного проволоками, является важным параметром, определяющим распределение вещества и магнитного поля при сжатии проволочной сборки. Из-за непрерывного сноса токнесущей плазмы к оси возникает радиальное распределение плазмы с толщиной, заметно большей толщины скин-слоя. Образуется плазма, пропитанная током и магнитным полем. Она может быть и не сплошной (в азимутальном направлении) на начальных этапах сжатия. В этом случае, ускорение такой плазмы к оси системы обеспечивается не действием магнитного поршня на внешнюю границу плазмы проволочной сборки, а объемной силой Ампера $j \times B/c$, действующей по всей толщине плазмы.

Гетерогенность структуры, возникающая при «холодном старте», есть важный фактор, влияющий на развитие различного рода неустойчивостей на стадии окончания плазмообразования ($\dot{m}(t) \rightarrow 0$), например, магнитной Релей-Тейлоровской неустойчивости, что, в свою очередь, влияет на компактность сжатия плазмы на финальной стадии имплозии (явление «плазменный ливень» - несинхронный и пространственно-неоднородный прорыв магнитного потока внутрь лайнера) и приводит к образованию отставшей плазмы с током («*trailing mass*» [31]). Важными являются вопросы о диффузии и скинировании тока на протяжении всего времени имплозии, о соотношении полного тока, протекающего через Z-пинч и через малоплотную отставшую плазму. При этом на стадии окончания плазмообразования происходит опережающее сжатие плазмы, обычно развивающееся в прикатодной области проволочной сборки, что является причиной несинхронного сжатия плазмы по высоте лайнера в приосевой области («зиппер-эффект»). Все эти факторы приводят к ухудшению параметров импульса мощности МРИ (понижению амплитуды и увеличению его длительности). Заметим, что описанные выше явления, возникающие при «холодном старте», также являются общими для таких конструкций, как газовые и пенные лайнеры.

Проблему «холодного старта» могла бы решить предыонизация плазмообразующей среды. При этом важно, чтобы сама предыонизация не породила пространственных неоднородностей плазмы, характерных для холодного старта разряда. Представляет интерес реализация режима «горячего старта» путем ионизации такого типа плазменной нагрузки, как пенный лайнера, например, внешней вспомогательной токовой оболочкой, если она осуществляется достаточно медленно, так что возникшие филаменты успевают расшириться и

слиться с соседними. В таком случае можно создать начальные условия эксперимента, которые могут существенно отличаться от условий экспериментов на быстрых Z-пинчах. При этом важными являются вопросы взаимодействия плазменной оболочки, как драйвера тока, с пенным лайнером. На установке Sphinx с более длинным импульсом основного тока (до 5 МА, $\Delta t \sim 600-700$ нс) было показано, что токовый предимпульс (10 кА, $\Delta t \sim 50$ мкс) уменьшает «зиппер-эффект» в алюминиевых и вольфрамовых сборках. Как следствие этого, мощность МРИ выросла примерно в 6 раз, энергия излучения – примерно в 2.5 раза [32]. Следует заметить, что в последнее время на установке MAGPIE проведены эксперименты по сжатию Al-проволочныхборок в условиях «горячего старта» [33], когда быстрым токовым предимпульсом (5 кА, $\Delta t \sim 25$ нс) за 140 нс до воздействия основного импульса тока установки (до 1.4 МА, $\Delta t \sim 250$ нс) генерировалась плазма с проволок. В этом случае сжатие плазмы во время основного токового импульса установки происходило по типу сжатия плазменной оболочки (“*shell-like implosion*”), минуя фазу длительного плазмообразования (плазмообразование происходило на этапе предимпульса). При этом не наблюдались явления, присущие «холодному старту», такие как гетерогенность структуры плазмообразующей области (остов-корона) и появление плазмы предвестника в области оси проволочной сборки до сжатия основной массы плазмы.

Для реализации мощного источника МРИ на будущих установках необходимо разработать оптимальную конструкцию лайнера, способную обеспечить компактное сжатие плазмы лайнера и получение интенсивности излучения чернотельного излучателя $10^{14}-10^{15}$ Вт/см² с температурой 200-220 эВ, необходимого для сжатия т/я мишени. Хотя эксперименты на установке ZR и демонстрируют некоторый оптимизм по созданию мощного источника рентгеновского излучения и свидетельствуют о возможности осуществления пороговых экспериментов по реализации ИТС при облучении т/я мишени импульсом МРИ Z-пинча, однако, по современным представлениям для зажигания топлива в термоядерной мишени непрямого облучения требуется мощность импульса МРИ выше 1000 ТВт [9, 11]. Для дальнейшего продвижения в этой области и достижения такого уровня мощности при токовой имплозии цилиндрических многопроволочныхборок необходимо увеличение амплитуды разрядного тока импульсной электрофизической установки до уровня ~ 100 МА. Для этого в настоящее время проектируется новое поколение электрофизических установок петаваттной электрической мощности ($\sim 500-1000$ ТВт) - БАЙКАЛ, ЭМИР (в России) и X-1 (в США) с уровнем тока 50-70 МА и временем нарастания $\sim 100-800$ нс [34-38]. Токи такого диапазона в настоящее время находятся на грани технической реализуемости, поэтому актуально понимание физических закономерностей сжатия лайнеров в режиме Z-пинча. Как показывают расчетно-теоретические оценки требований к параметрам Z-пинчевого драйвера,

предназначенного для сжатия термоядерных мишеней непрямого облучения и получения высокого коэффициента усиления мишени по энергии свыше 400–1200 МДж [9], для согласования профиля импульса тока установки с временем имплозии Z пинча потребуются применение излучающих нагрузок (лайнеров) с линейной массой свыше 100 мг/см. На установках будущего поколения большая масса нагрузки и, соответственно, большая масса пинча, образующегося при сжатии плазмы (в процессе имплозии лайнеров), как показывают расчеты [39], ограничивает пиковую мощность МРИ. Это ограничение связано с тем, что при большой массе пинча из веществ с высоким Z пиковая мощность МРИ падает с увеличением оптической толщины пинча, а время выхода излучения из пинча увеличивается. Кроме того, выбор типа термоядерной мишени непрямого облучения налагает жесткие ограничения на временной профиль сжимающего мишень импульса МРИ для достижения требуемой степени сжатия топлива. Для сокращения времени выхода излучения из пинча и увеличения пиковой мощности МРИ предполагается использование плазмообразующих веществ с малым Z , например, таких как бериллий ($Z=4$), углерод ($Z=6$) и др. Также рассматривается применение смешанных Z -пинчевых нагрузок, состоящих из смеси веществ, как с малым Z , так и с высоким Z . Для оптимальной замены плазмообразующего вещества Z -пинчевых нагрузок проводятся исследования по сжатию лайнеров из различных материалов [40, 41]. В наших экспериментах на установке Ангара-5-1 для этих целей использовались лайнеры из веществ с малым Z - полиамидных (капроновых) или лавсановых волокон. Полимерное вещество, из которого изготовлены данные волокна, имеет среднее значение атомного номера $Z_{ср\text{ед}} \approx 3.3-4.5$.

Цели и задачи диссертационной работы

В настоящее время ведутся исследования различных конструкций плазменных лайнеров, использующихся как в схемах ИТС, так и в отдельных частях этих схем. Поэтому для осмысленного конструирования лайнеров для установок нового поколения необходимо понимание физики их сжатия с целью получения максимальных интегральных и удельных параметров импульса рентгеновского излучения. Полученная экспериментальная информация по имплозии плазмы лайнеров различных конструкций также важна для верификации и усовершенствования РМГД кодов, описывающих сжатие таких нагрузок для мультимегаамперных установок нового поколения. Основной целью цикла работ, выполненных автором, было получение экспериментальных данных о сжатии плазменных лайнеров различных конструкций (одиночные проволочные и волоконные сборки, конические сборки, вложенные сборки смешанного состава, квазисферические сборки).

Для достижения поставленной цели предполагалось решение следующих основных задач:

- Исследование интенсивности плазмообразования $\dot{m}(t)$ [в мкг/(см²·нс)] проволочных или волоконных сборок, изготовленных из проволок (волокон) различных веществ. Сравнение полученных величин $\dot{m}(t)$ в экспериментах по сжатию проволочных сборок в вакууме и в условиях плазмофокусного разряда;

- Изучение особенностей токовой имплозии проволочных и волоконных сборок различных конструкций (одиночные, вложенные, конические и квазисферические), сравнение с результатами компьютерного моделирования;

- Измерение распределения магнитного поля (радиального, азимутального и аксиального) и его градиента в сжимающейся плазме сборки, определение плотности тока;

- Исследование прорыва магнитного потока на финальной стадии плазмообразования;

- Получение режимов устойчивого сжатия плазмы проволочных и металлизированных волоконных сборок, профилирование импульса рентгеновского излучения;

- Усовершенствование зондовой диагностики магнитных полей в плазме с высокой плотностью потока мощности и энергии на магнитный зонд (~ 1 ТВт/см² и ~ 10 -20 кДж/см²) и испытание ее работоспособности на мощных электрофизических установках.

Эти задачи решались с помощью модификации имеющихся (магнитные зонды) и применением современных диагностических средств, разработкой новых, нестандартных типов плазменных нагрузок (лайнеры смешанного состава с заданными свойствами плазмообразования и динамикой сжатия).

Научная новизна работы

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 исследовано радиальное, азимутальное и аксиальное распределения магнитного поля в плазме во время имплозии проволочных сборок различных конструкций (одиночные, вложенные, квазисферические).

- Предложен метод определения радиальной скорости потока плазмы с проволочной сборки по данным измерения индукции магнитного поля и его градиента.

- 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 цилиндрического и квазисферического типов.

- 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.

- Впервые реализованы различные режимы течения плазмы между каскадами вложенныхборок (сверхальфвеновский, 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.

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

Научная и практическая значимость работы

- Впервые для экспериментов по имплозии проволочныхборок разработана и усовершенствована магнитозондовая методика, позволяющая проводить надежные измерения магнитного поля в плазме с высокой плотностью потока мощности и энергии на магнитный зонд (~ 1 ТВт/см² и $\sim 10-20$ кДж/см²). Созданы несколько универсальных конструкций миниатюрных магнитных зондов для исследования пространственного распределения магнитного поля в плазме на мощных электрофизических установках в экспериментах по сжатию быстрых Z-пинчей и сжатию токово-плазменной оболочки (ТПО) плазменного фокуса.

- Получены численные данные об интенсивности плазмообразованияборок $\dot{m}(t)$, изготовленных из различных веществ. Экспериментально подтверждена функциональная зависимость величины $\dot{m}(t)$ от тока разряда I и от геометрических размеров сборки (ее начального радиуса R_0) сборки в виде $\dot{m}(t) \propto (I / R_0)^2$.

- Изучены основные аспекты взаимодействия плазменных потоков во вложенныхбороках и реализован режим устойчивого сжатия плазмы такихборок на финальной стадии имплозии.

Показана возможность получения в таких режимах мощных выходов рентгеновского излучения 5-7 ТВт длительностью около 5 нс.

- Продемонстрирована перспективность применения квазисферической сборки в качестве внешнего каскада во вложенных сборках для увеличения потока мощности и энергии МРИ на термоядерную мишень. Показано, что плотность потока мощности и энергии при сжатии такого двухкаскадного лайнера существенно (в 4-9 раз) превосходят соответствующие величины, полученные в экспериментах с одиночными W-квазисферическими лайнерами с подобными параметрами.

- Результаты работы будут использованы для расчета, проектирования крупных установок и плазменных нагрузок (лайнеров) к ним, генерирующих импульс мощного рентгеновского излучения для ИТС и других приложений, проверки расчетных схем, описывающих сжатие проволочныхборок для создания излучателей с большим выходом рентгеновского излучения.

Методология и методы исследования

Методология решения задач диссертационной работы основана на сопоставлении экспериментальных данных с данными численного РМГД моделирования имплозии многопроволочныхборок. Основные особенности имплозии одиночных цилиндрических, коническихборок и вложенныхборок различных конструкций подтверждены результатами компьютерного моделирования, включая моделирование течения плазмы в межкаскадном пространстве вложенныхборок с образованием переходной области – ударной волны, надежно наблюдаемой в эксперименте. Полученные экспериментальные данные позволяют верифицировать компьютерные коды для моделирования имплозии таких типов плазменных нагрузок.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующее:

1. Конструкции магнитных зондов, позволяющие проводить комплексные исследования радиального, азимутального и аксиального распределений магнитного поля внутри плазмы сжимающихся лайнеров на сильноточных ускорителях типа Ангара-5-1 с высокой плотностью потока мощности и энергии на магнитный зонд (~ 1 ТВт/см² и ~ 10 -20 кДж/см²). Результаты экспериментального исследования обтекания оболочек зондов различной формы и сравнение с МГД расчетами. Экспериментально подтверждена работоспособность магнитных зондов на других электрофизических установках, например, плазменный фокус.

2. Количественные данные о физической величине, характеризующей явление затянутого плазмообразования при токовой имплозии лайнеров, - интенсивности плазмообразования \dot{m} [в мкг/(см²·нс)] для различных веществ (капрон, лавсан, Al, нерж. сталь, Cu, In, Sn, W, Bi). Экспериментально подтверждена физическая картина сжатия проволочных лайнеров согласно модели гетерогенного лайнера с затянутым плазмообразованием. В экспериментах на установке Ангара-5-1 и установке ПФ-3 подтверждена зависимость величины \dot{m} от вещества проволок (коэффициент K_m) и от начального радиуса (R_0) расположения источников плазмы согласно функциональной зависимости $\dot{m} \propto K_m (I / R_0)^2$. Полученные количественные данные по \dot{m} для указанных веществ могут использоваться при конструировании Z-пинчевого источника излучения, например, для одной из схем УТС – «динамического хольраума», а также для теоретического описания имплозии смешанных по составу лайнеров и их оптимизации.

3. Измеренное существенное различие величины \dot{m} для пластиковых волокон и металлических проволок ($\dot{m}_{\text{волокна}} < \dot{m}_{\text{проволоки}}$ в 2.5-3 раза) позволило разработать конструкции лайнеров с заданной динамикой сжатия плазмы – металлизированные цилиндрические волоконные сборки, вложенные сборки смешанного состава и квазисферические сборки.

4. Результаты комплексного исследования проникновения магнитного поля внутрь сжимаемой током цилиндрической проволочной сборки. Впервые в мире получены подробные распределения магнитного поля с радиальным, азимутальным и аксиальным пространственным разрешением. Определено радиальное распределение плотности тока как на стадии плазмообразования, так и на стадии ее окончания. Показано, что локальное окончание плазмообразования вдоль длины проволок в сборке приводит к прорыву в этих местах магнитного потока внутрь проволочной сборки и развитию магнитной Релей-Гейлоровской неустойчивости на внешней границе плазмы, характерной для проволочныхборок на финальной стадии имплозии.

5. Метод определения скорости сжатия плазмы по измеренным значениям локального градиента и индукции магнитного поля на различных стадиях имплозии проволочной сборки. Показано, что на стадии плазмообразования скорость движения плазмы медленно возрастает от $0.9 \cdot 10^7$ до $1.3 \cdot 10^7$ см/с, а на финальной стадии наблюдается резкий рост до величины более $2 \cdot 10^7$ см/с.

6. В экспериментах по сжатию вложенных сборок смешанного состава (капрон-вольфрам) и металлизированных волоконных сборок (капрон с напылением веществ Al, In, Sn и Bi) обнаружен новый эффект - наличие отставшей плазмы из вещества пластиковых волокон на периферии сборки создает условия для уменьшения темпа развития магнитной Релей-Тейлоровской неустойчивости при сжатии плазмы внутреннего каскада или плазмы напыленных веществ и образования более устойчивого Z-пинча с малым поперечным размером (до ~1.5 мм). С использованием этих особенностей получены импульсы мощности МРИ с амплитудой 5-7 ТВт и длительностью около 5 нс. Эффект устойчивого сжатия плазмы в лайнерах, указанных конструкций, может быть использован в различных схемах ИТС.

7. Экспериментальная реализация различных режимов течения плазмы в пространстве между каскадами: доальфвеновский ($M_A=V_r/V_A<1$), сверхальфвеновский ($M_A>1$) и режим с формированием переходной области (ударной волны) между каскадами. Путем варьирования вещества проволок или волокон во внешнем каскаде (вольфрам и капрон) была показана зависимость режимов течения плазмы между каскадами от отношения интенсивностей плазмообразования внутреннего и внешнего каскадов $\dot{m}_{in} / \dot{m}_{out}$ и от отношения их радиусов r_{in}/r_{out} . Сравнительный анализ экспериментальных результатов и результатов МГД моделирования определил основные физические условия реализации того или иного режима течения плазмы между каскадами. Наличие ударной волны между лайнерами установлено теоретически и экспериментально.

8. Перемещение области ударной волны в межкаскадном пространстве вложенных сборок является визуальным индикатором характеристик потоков плазмы. Обнаружено, что положение области ударной волны в пространстве между каскадами вложенных сборок меняется во времени, а ее форма позволяет судить о некоторых параметрах плазменного потока с внешнего каскада, а именно: его радиальной скорости движения V_r , кинетическом давлении плазмы ρV_r^2 и характерном пространственном масштабе неустойчивостей в плазменном потоке.

9. Механизм взаимодействия плазменных потоков внешнего каскада с магнитным полем и плазмой внутреннего каскада, основанный на новых экспериментальных данных по сжатию плазмы вложенных сборок смешанного состава и образования ударной волны в пространстве между каскадами.

10. Результаты предварительных экспериментов по сжатию вложенных лайнеров с внешним квазисферическим каскадом. Продемонстрировано значительное увеличение мощности и

энергии МРИ при переходе от одиночной квазисферической сборки к вложенным сборкам, в которых внешний каскад является квазисферическим. Плотность потока мощности (25-40 ТВт/см² для $h\nu > 100$ эВ) и энергии излучения (500-770 кДж/см² для $h\nu > 100$ эВ и 600-940 кДж/см² для $h\nu > 10$ эВ) при сжатии такого двухкаскадного лайнера существенно (в 4-9 раз) превосходят соответствующие величины, полученные в экспериментах с одиночными вольфрамовыми квазисферическими сборками с подобными параметрами, и в 2-6 раз больше, чем в случае сжатия квазисферических волоконныхборок с оптимальным профилированием линейной массы ($m_l(\theta) \propto \sin^{-1}\theta$) волокон веществом с высоким атомным номером (Винапыление).

Степень достоверности и апробация работы

Результаты и выводы диссертации основаны на большой экспериментальной информации, полученной на различных электрофизических установках. Достоверность результатов обеспечивается использованием комплекса современных методов исследований, непротиворечивостью полученных данных и их согласием с результатами других исследователей. Экспериментальные результаты, в основном, согласуются с результатами численного моделирования.

Полученная величина интенсивности плазмообразования проволочныхборок в экспериментах на установке Ангара-5-1 независимо подтверждена в экспериментах по токовой имплозии проволочныхборок в условиях плазмофокусного разряда на установке ПФ-3.

Достоверность представленных результатов работы подтверждена публикацией в виде статей в реферируемых журналах и тезисов докладов, представленных на международных конференциях по физике плазмы и УТС. Некоторые из важных результатов, полученных в работе, были подтверждены результатами других исследовательских лабораторий в России и за рубежом: в США, КНР и Великобритании.

Публикации

Основные результаты, изложенные в диссертации представлялись на ежегодной международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС в 2008-2018 годах, на 34th European Physical Society Conference on Plasma Physics (EPS2007, Warsaw, Poland, 2007), на 17th International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS'08, X'ian, China, 2008), на 13-й Всероссийской конференции ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ (ДВП-13, Звенигород, 2009), на 25th and 26th Symposium on Plasma Physics and Technology (Prague, Czech Republic, 2012, 2014), на 4th Euro-Asian Pulsed Power Conference and the 19th International Conference on High-Power Particle Beams. (Karlsruhe, Germany, 2012), на 19th IEEE

Pulsed Power Conference (PPPS, San Francisco, USA, 2013), на 42nd IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS, Turkey, Belek, Antalya, 2015), а также на семинарах отдела в ГНЦ РФ ТРИНИТИ и НИЦ «Курчатовский институт».

Материал, на основе которого написана диссертация, опубликован в 39 печатных трудах, среди которых:

- 33 статьи в рекомендованных ВАК российских периодических изданиях для диссертаций (журнал «Физика плазмы» - 30 статей, журнал «Приборы и техника эксперимента» - 1 статья, Письма в ЖЭТФ - 1 статья, журнал ВАНТ, Серия Термоядерный синтез - 1 статья);

- 2 статьи в журнале Plasma Physics and Controlled Fusion, 2 статьи в журнале IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE;

- два препринта ГНЦ РФ ТРИНИТИ.

Сделано 19 докладов на Международных и Российских симпозиумах и конференциях.

Цикл статей в журнале «Физика плазмы», в том числе, и по теме, касающейся диссертационной работы, удостоен премии издательства МАИК-Интерпериодика РАН за лучшую публикацию в 2004 и 2014 г.г.

Автор удостоен премии правительства РФ в области науки и техники для молодых ученых в 2008г. за создание методов измерения сильных магнитных полей в излучающей плазме с экстремальными параметрами на мощных электрофизических установках для новых источников энергии, лауреат премии имени И.В. Курчатова НИЦ «Курчатовский институт» за лучшую научную работу в 2012 и 2017 г.г. Внедрение магнитозондовой диагностики на мощных электрофизических установках в России (в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» и НИЦ «Курчатовский институт») и за рубежом (в Институте Физики Плазмы и Лазерного Микросинтеза в Польше и ГНПО СФТИ в Абхазии) позволило получить уникальные экспериментальные данные о сжатии плазмы лайнеров в режиме Z-пинча и токово-плазменной оболочки в плазмфокусном разряде, об испытании различных защитных оболочек магнитных зондов.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены самостоятельно или в составе исследовательской группы при определяющем участии автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке и подготовке экспериментов, в развитии диагностических методик, в анализе и обработке экспериментальных результатов. Автором разработана и, позднее, усовершенствована уникальная диагностика измерений магнитных полей в плазме с высоким энерговыделением - разработана универсальная конструкция миниатюрных зондов, позволяющая проводить измерения полей в плазме различных типов

электрофизических установок (быстрые Z-пинчи и плазменный фокус). Автор разработал алгоритмы для численной обработки магнитозондовых результатов экспериментов с целью построения пространственно-временных характеристик магнитного поля в сжимающихся лайнерах. Автором проведены эксперименты по токовой имплозии проволочных и волоконных сборок различных конструкций (одиночные цилиндрические и конические сборки, пенно-проволочные конструкции, вложенные сборки, квазисферические сборки), выполнена их обработка, анализ и интерпретация полученных результатов. Частично осуществлена постановка задачи по РМГД моделированию особенностей взаимодействия плазмы в двухкаскадных вложенных сборках, выполненного совместно с коллегами из ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объем работы

Структура представленной работы отражает характер экспериментальных исследований. Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и двух Приложений, содержит 19 таблиц, 175 рисунков и список литературы, включающий 250 наименования. Общий объем диссертации составляет 414 страниц.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, представлены цели и задачи, решенные в ходе выполнения исследований; показана научная новизна и практическая значимость работы; приведены основные защищаемые положения.

В первой главе диссертационной работы описаны технические параметры и характеристики электрофизических установок, на которых проводились исследования: термоядерный экспериментальный комплекс Ангара-5-1 (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), плазмодиффузионные установки ПФ-3 (НИЦ «Курчатовский институт»), PF-1000 (ИФПиЛМ, Варшава, Польша) и КПФ-4-Феникс (СФТИ, Абхазия). Представлена часть диагностических методик данных установок (многокадровые рентгеновские и оптические камеры, камера-обскура, ВУФ-спектрограф, детекторы излучения, электротехнические датчики для измерения тока и напряжения и др.), использованных в экспериментах и развиваемых как самим автором, так и его коллегами. Особое внимание уделено магнитозондовой диагностике измерения магнитных полей в сжимающихся многопроволочных лайнерах, разработанной автором для условий эксперимента на указанных установках. Проанализированы факторы, ограничивающие применение данной методики (электронные пучки, разрушение зонда, экранировка плазмой и электростатическими экранами, возмущения плазмы, вносимое зондом и т.п.). Представлены усовершенствованные конструкции миниатюрных магнитных зондов для измерения

распределений магнитных полей в плазме с высоким энерговыделением (см. рис. 3) и результаты их испытаний на мощных электрофизических установках. Экспериментально обоснован выбор формы и размеров оболочки зонда для минимизации возмущения и загрязнения плазмы, вносимых зондом.

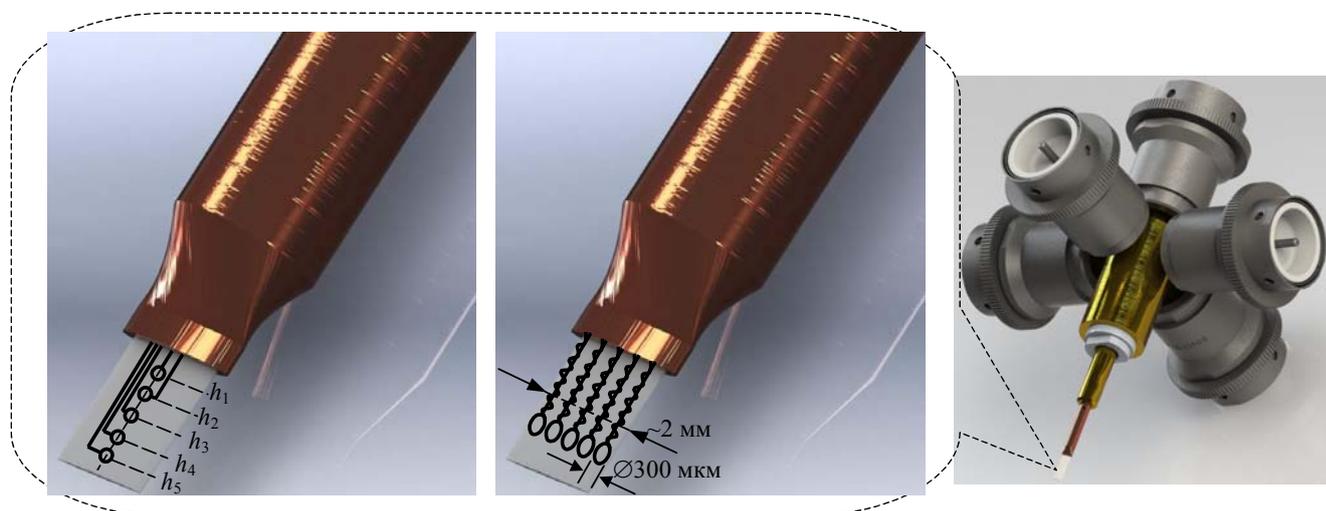


Рис. 3. Общий вид 5-ти канального магнитного зонда с различными вариантами исполнения чувствительного элемента (слева – для измерения аксиального распределения магнитного поля, справа – радиального распределения).

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 указанных веществ (см. табл. 1) для экспериментальных условий установки Ангара-5-1. Проведено количественное сравнение интенсивностей плазмообразования $\dot{m}(t)$ вольфрамовых проволочек при токовой имплозии многопроволочныхборок в вакуумных условиях установки Ангара-5-1 и при сжатии W-борок в условиях плазмофокусного разряда установки ПФ-3. Получено хорошее соответствие друг другу значений $\dot{m}(t)$ [в $\text{мкг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$] для W-проволок в данных экспериментах. В экспериментах с цилиндрическими и коническими проволочными сборками проверена функциональная зависимость интенсивности плазмообразования проволочек от тока разряда I и от геометрических размеров (начального радиуса R_0) сборки согласно модели гетерогенного лайнера с затянутым плазмообразованием в виде $\dot{m}(z, t) \propto (I / R_0(z))^\mu$, где $\mu \approx 1.5-2.0$ (см. рис. 4).

Табл. 1. Зависимость интенсивности плазмообразования цилиндрических сборок от вещества проволок или волокон, а также от вещества металлизации диэлектрических волокон.

Вещество проволок или волокон	Экспериментальное значение \dot{m} , мкг/(см ² ·нс), при $I=1$ МА, $R_0=1$ см
Al-проволока, 15 мкм	≈0.2
нерж. сталь, 10 мкм	0.136-0.138
Си-проволока, 18(20) мкм	0.180±0.018
Мо-проволока, 20 мкм	0.340±0.032
W-проволока, 6 мкм	0.128-0.145
капроновое волокно, 25 мкм	0.125-0.180
лавсановое волокно, 20 мкм	0.040-0.070
Bi-напыление на капроновое волокно	0.095±0.015
In-напыление на капроновое волокно	0.094±0.002
Sn-напыление на капроновое волокно	0.074±0.008
Al-напыление на капроновое волокно	0.070-0.100
Al-напыление на капроновое волокно	0.110-0.120

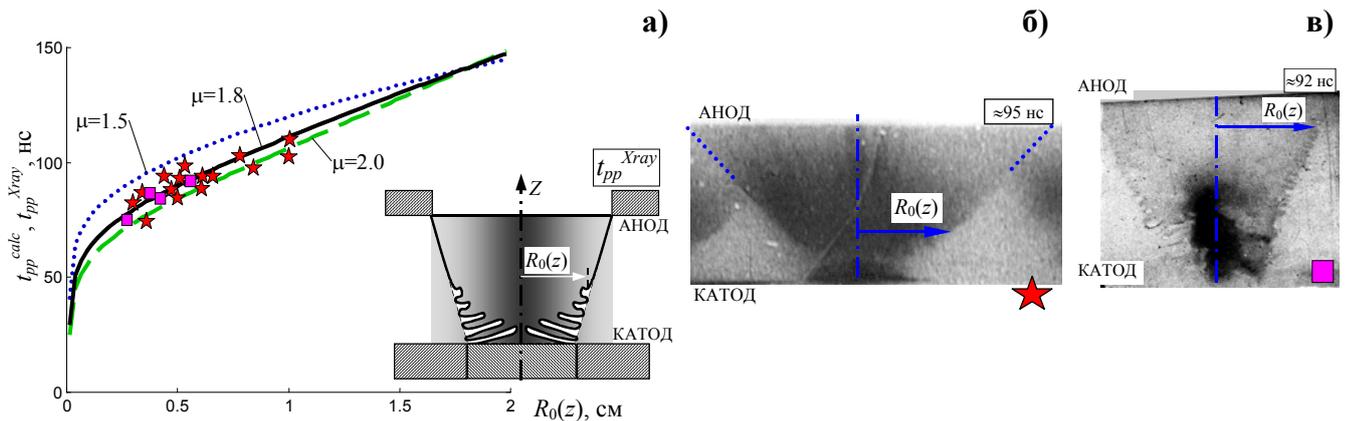


Рис. 4. Затянутое плазмообразование в конических сборках. Рассчитанное по выражениям $\dot{m}(z,t) \propto (I/R_0(z))^{\mu}$ и $2\pi R_0 \int_0^{t_{pp}^{calc}} \dot{m}(t) dt \approx (0.7 \div 0.8) M_0$ время t_{pp}^{calc} и определенное по данным многокадровых рентгеновских камер (СХР4 ■ и РЭОПН) экспериментальное время t_{pp}^{Xray} окончания плазмообразования на некотором локальном радиусе $R_0(z)$ для конических сборок.

В третьей главе представлены результаты исследований особенностей динамики токового сжатия плазмы одиночных проволочных и волоконных сборок, изготовленных из различных веществ. Получены радиальное (см. рис. 5), азимутальное и аксиальное (см. рис. 6) распределения магнитного поля внутри плазмы сборок, восстановлено радиальное распределение плотности тока (см. рис. 5б,г,е). Измерен градиент магнитного поля как в некоторой точке по радиусу сборки (см. рис. 7), так и вблизи зоны плазмообразования (вблизи начального положения проволок в сборке). Показано, что максимальная плотность тока $j_z^{max} \sim 6$ МА/см² на стадии плазмообразования сосредоточена вблизи взорванных проволок. Приведены результаты исследования прорыва магнитного потока на финальной стадии

плазмообразования, когда $\dot{m}_{изм}(t) \rightarrow 0$. Показано, что окончание плазмообразования на проволоках в сборке происходит локально и несинхронно в некоторых местах вдоль длины проволок, что приводит к локальному прорыву магнитного потока внутрь объема проволочной сборки (см. рис. 6). Исследовано влияние несинхронности срабатывания модулей установки Ангара-5-1 (несинхронная подача тока на лайнер) на проникновение магнитного поля внутрь проволочной сборки и, как следствие этого, несимметричное сжатие плазмы в приосевой области установки и понижение выхода рентгеновского излучения.

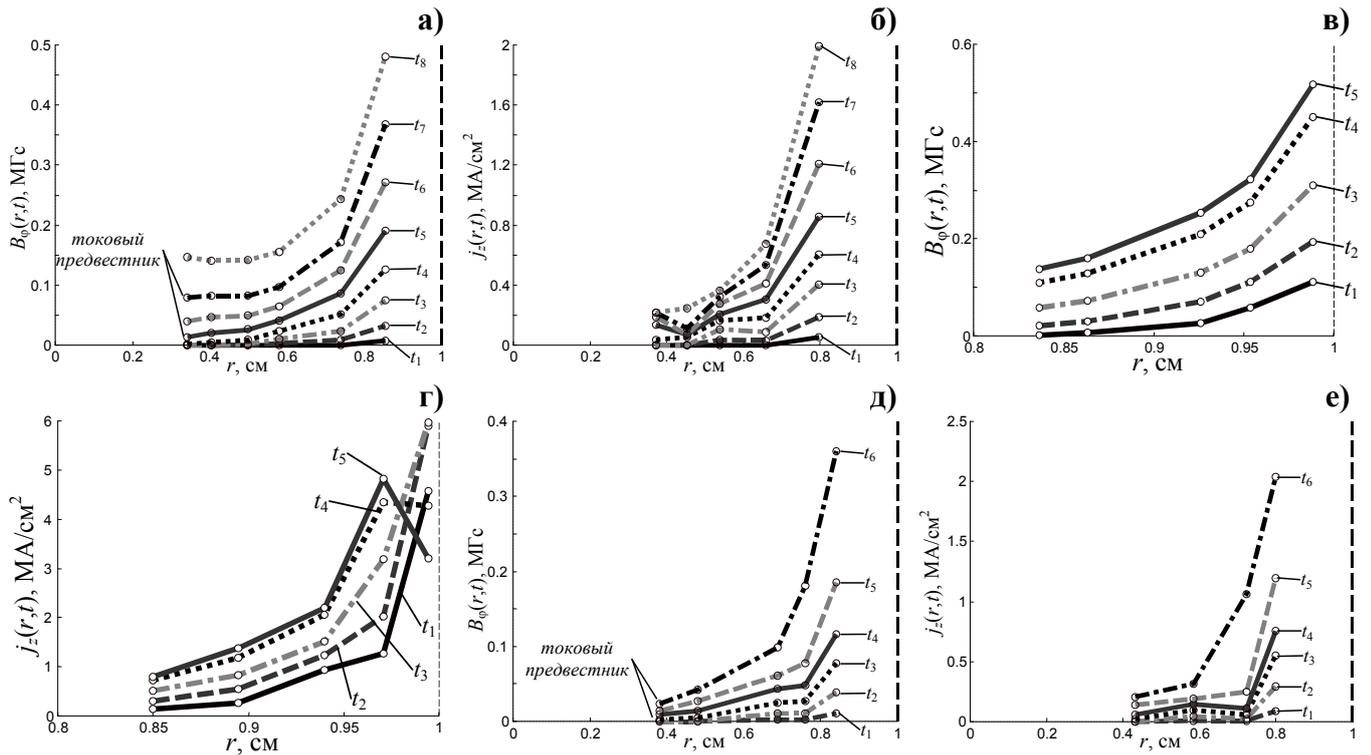
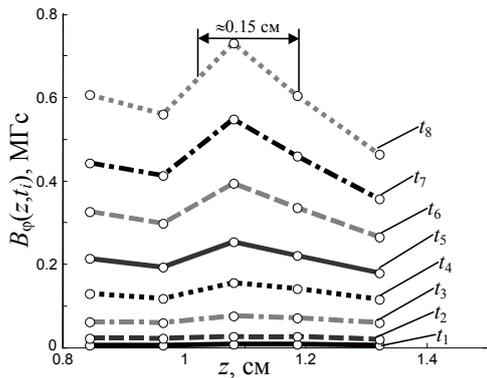
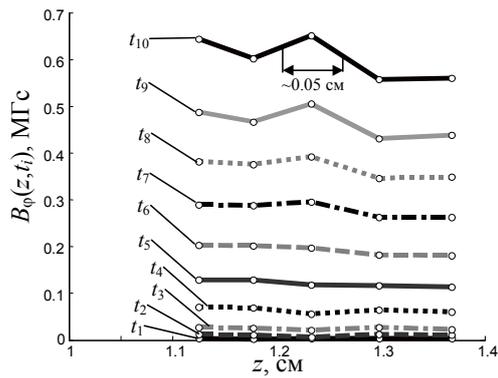
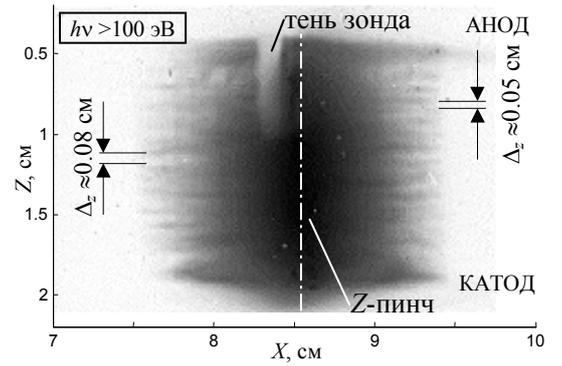


Рис. 5. Измеренные радиальные распределения азимутального магнитного поля $B_\phi(r, t_i)$ в различные моменты времени и расчетные радиальные распределения плотности тока $j_z(r, t_i)$ в те же моменты времени: а)-г) – для проволочной сборки из 40 W 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см, $R_0=10$ мм, $h=16.5$ мм; в), г) – вблизи области плазмообразования (вблизи проволок сборки) д), е) – для Al-сборки с теми же параметрами.

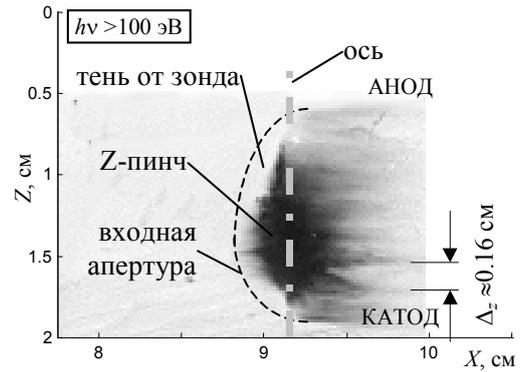


а)



б)

в)



г)

Рис. 6. Аксиальные распределения $B_\phi(z, t_i)$ магнитного поля, измеренные зондом вблизи области плазмообразования (вблизи проволок сборки) в разные моменты времени: а), в) для W-сборки и Al-сборки соответственно; б), г) интегральные по времени обскурограммы ($h\nu > 100$ эВ) для этих же сборок соответственно.

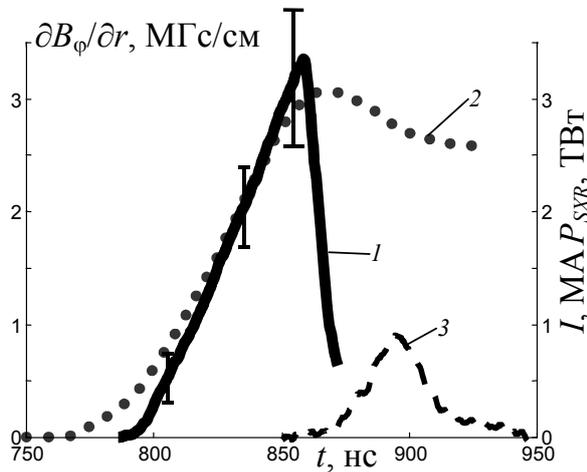


Рис. 7. Временные зависимости: 1 - градиента B_ϕ -поля, измеренный градиентным магнитным зондом на радиусе $0.8R_0$; 2 - полного тока; 3 - импульса мощности МРИ ($h\nu > 100$ эВ) для проволочной сборки из 40 W 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см, $R_0 = 10$ мм, $h = 16.5$ мм.

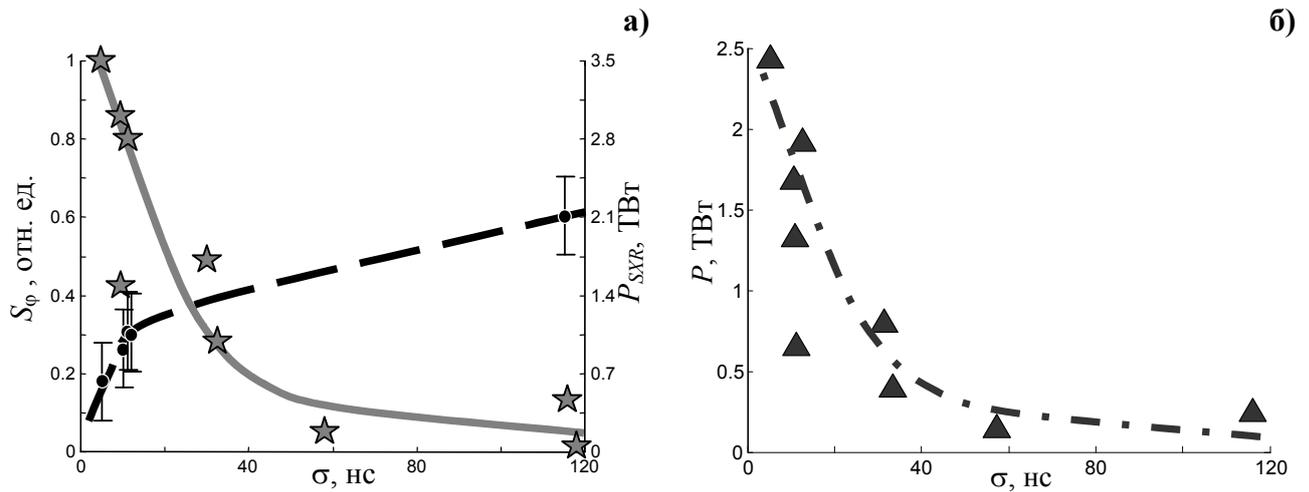


Рис. 8. Зависимости от среднеквадратичного разброса старта модулей σ : а) степени несимметрии $S_\varphi = \frac{\Delta B_\varphi}{\bar{B}_\varphi}$ проникновения азимутального магнитного поля внутрь проволочной сборки (\bullet) и мощности МРИ P_{SXR} ($h\nu > 100$ эВ, Н), где ΔB_φ - абсолютная разница индукции азимутального магнитного поля (максимальная разница по сигналам 3-х зондов) и ее среднее значение \bar{B}_φ , измеренные зондами на одном и том же радиусе, но на разных азимутальных углах внутри проволочной сборки в каждый момент времени; б) электромагнитной мощности P , вложенной в проволочную сборку (\blacktriangle).

В четвертой главе представлены результаты экспериментов и компьютерного моделирования имплозии двухкаскадных вложенныхборок, как одной из перспективных конструкций лайнера для ИТС на основе плазменных лайнеров (схемы «динамический хольраум» и MAGLiF). На основе экспериментальных данных, представленных в Главе 2 диссертационной работы, об интенсивности плазмообразования различных веществ, показано, что в зависимости от выбора отношения $\dot{m}_{in} / \dot{m}_{out}$, в частности, от выбора веществ проволок (или волокон) во внешнем и внутреннем каскадах и отношения их радиусов r_{in}/r_{out} , в пространстве между каскадами реализуется тот или иной режим течения плазмы (режимы сверхальфвеновского или доальфвеновского течения или течение плазмы с образованием области ударной волны УВ, см. лазерные и рентгеновские кадровые изображения на рис. 9). В эксперименте получены все указанные режимы течения плазмы между каскадами. Результаты одномерного и трехмерного моделирования показывают хорошее соответствие динамики сжатия плазмы двухкаскадныхборок с экспериментом (формирование УВ и ее положение в пространстве между каскадами, см. рис. 10). Исследованы особенности взаимодействия плазменного потока с внешнего каскада с магнитным полем и плазмой внутреннего каскада. Показано, что при определенных условиях возможно такое взаимодействие каскадов, при котором на финальной стадии имплозии плазмы внутреннего каскада развитие магнитной Релей-Тейлоровской неустойчивости затруднено, образуется устойчивый пинч и отсутствует отставшая плазма с высоким атомным номером (см. рис. 11). Благодаря этому, получены

короткие мощные импульсы рентгеновского излучения амплитудой ~ 4 ТВт (для $r_{in}/r_{out}=0.5$, см. рис. 12) и 5-7 ТВт [33*] (для $r_{in}/r_{out}=0.5$) с длительностью около 5 нс на половине высоты. Предложен возможный сценарий взаимодействия плазмы внешнего и внутреннего каскадов вложенныхборок (ударно-волновой механизм).

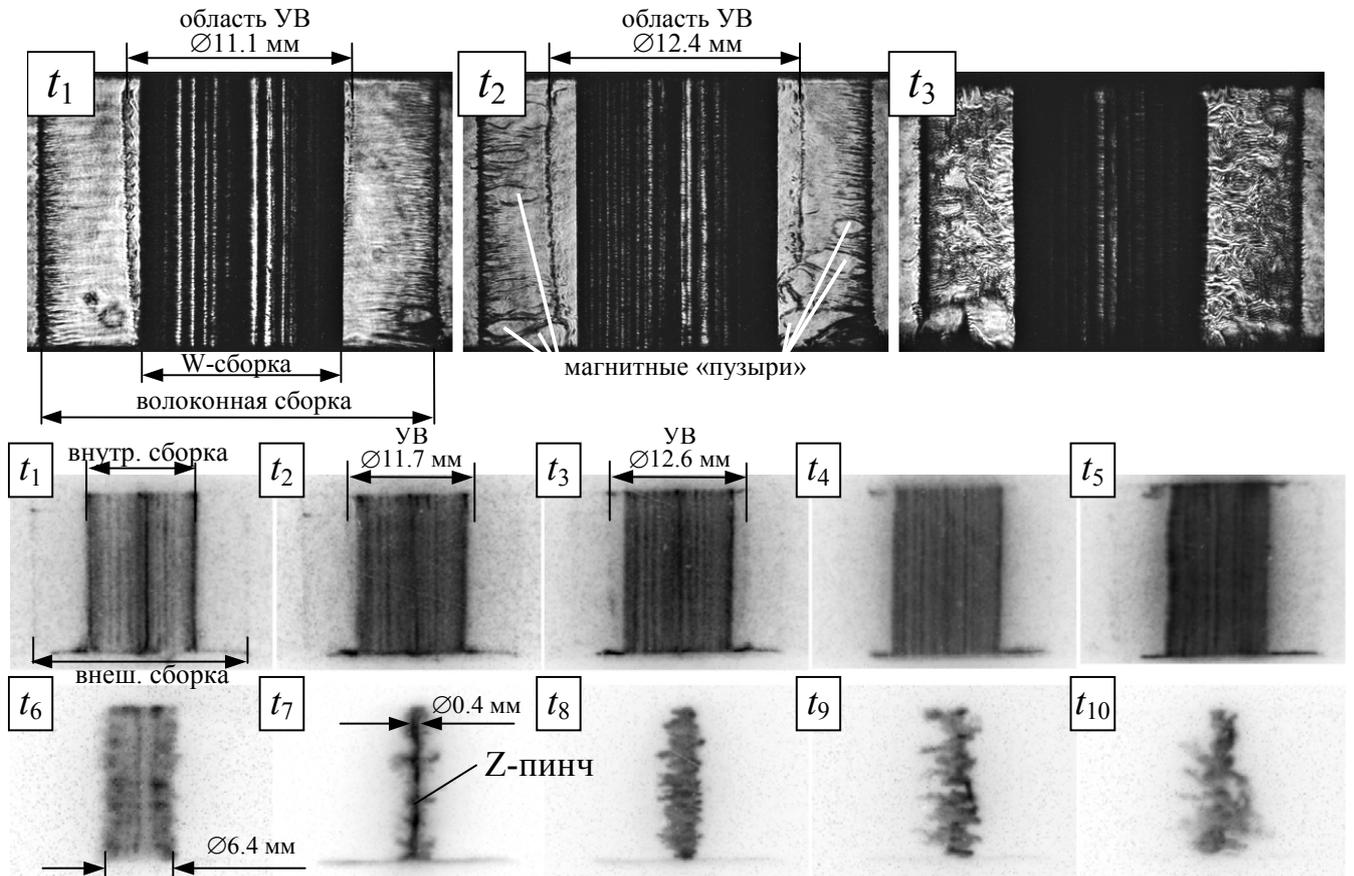


Рис. 9. Наблюдение формирования области УВ и ее разрушения в пространстве между каскадами во вложенныхбороках на кадровых лазерных теневых (вверху) и рентгеновских (внизу) изображениях. Сжатие плазмы внутреннего каскада. Анод – вверху, катод – внизу.

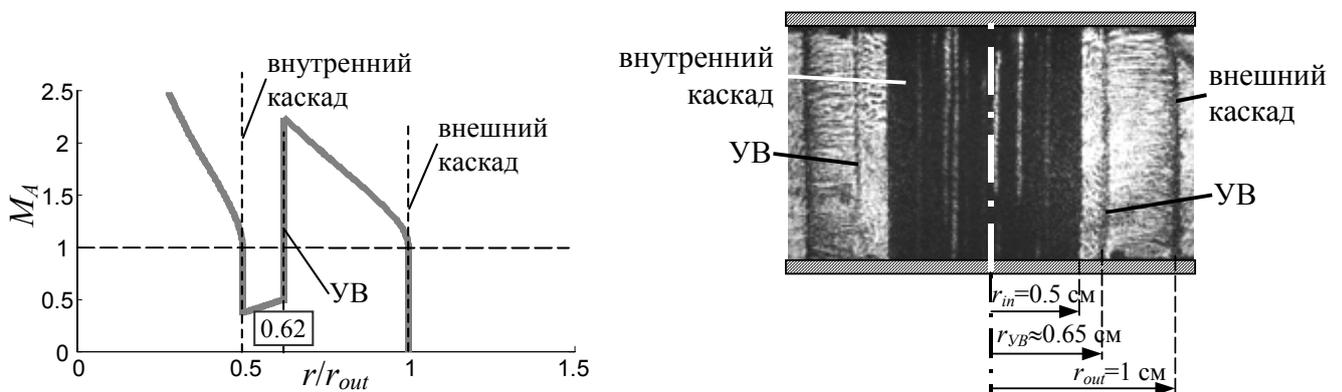


Рис. 10. Слева: полученное из одномерного МГД расчета радиальное распределение скорости плазмы ($M_A=V_r/V_A$), где V_r – скорость плазмы, V_A – локальная альфвеновская скорость. Справа: наблюдение области формирования УВ в пространстве между каскадами во вложенныхбороках на кадровом лазерном теневом изображении. Анод – вверху, катод – внизу.

* приведен порядковый номер ссылки из списка публикаций автора по теме диссертации (в конце автореферата)

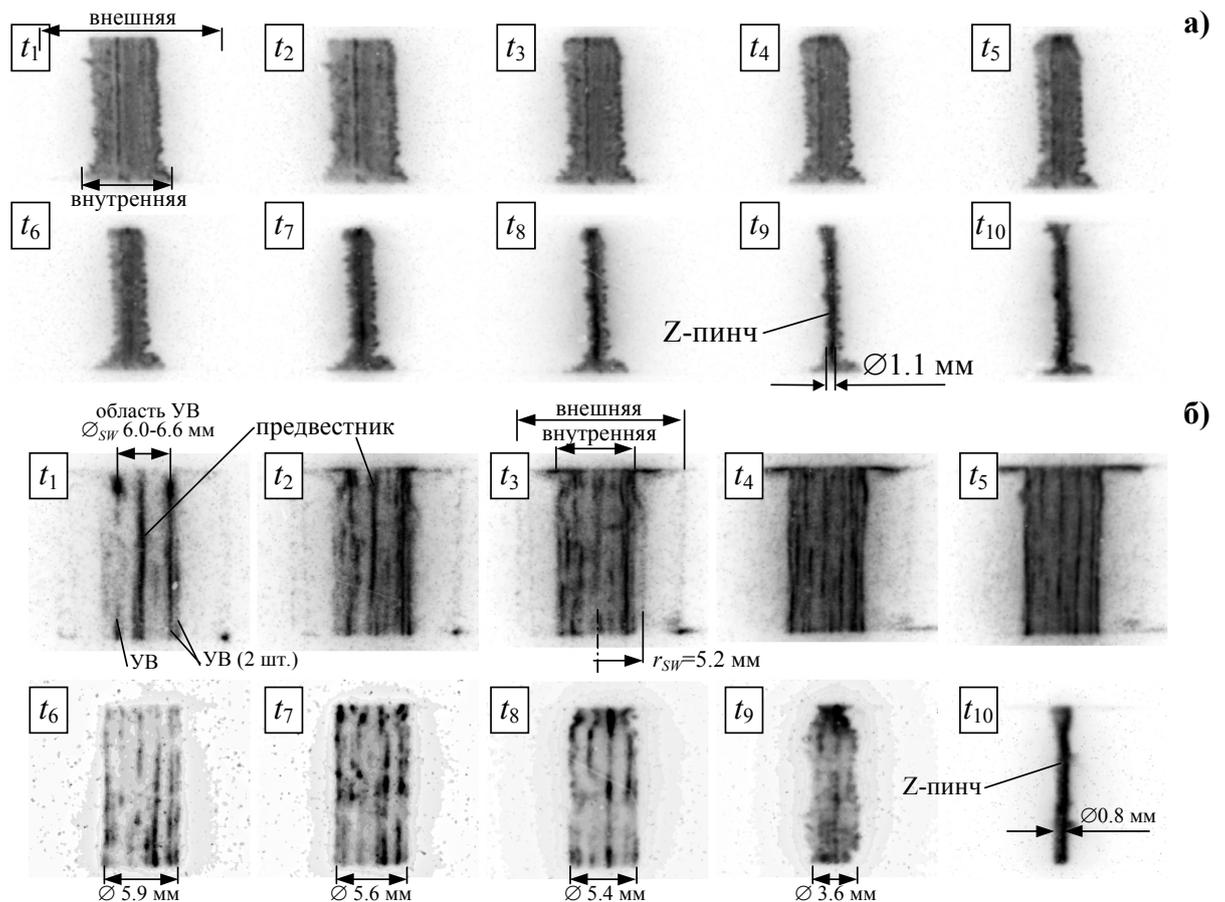


Рис. 11. Примеры устойчивого сжатия внутреннего каскада (W-сборки) во вложенных сборках смешанного состава: а) для W-сборки с $r_{in}=5$ мм из 40 проволок; б) для W-сборки с $r_{in}=3$ мм из 120 проволок. Внешний каскад – волоконная сборка из 16 (а) и 4 (б) капроновых 25 мкм волокон, $r_{out}=10$ мм, $h_{out}=h_{in}=16$ мм.

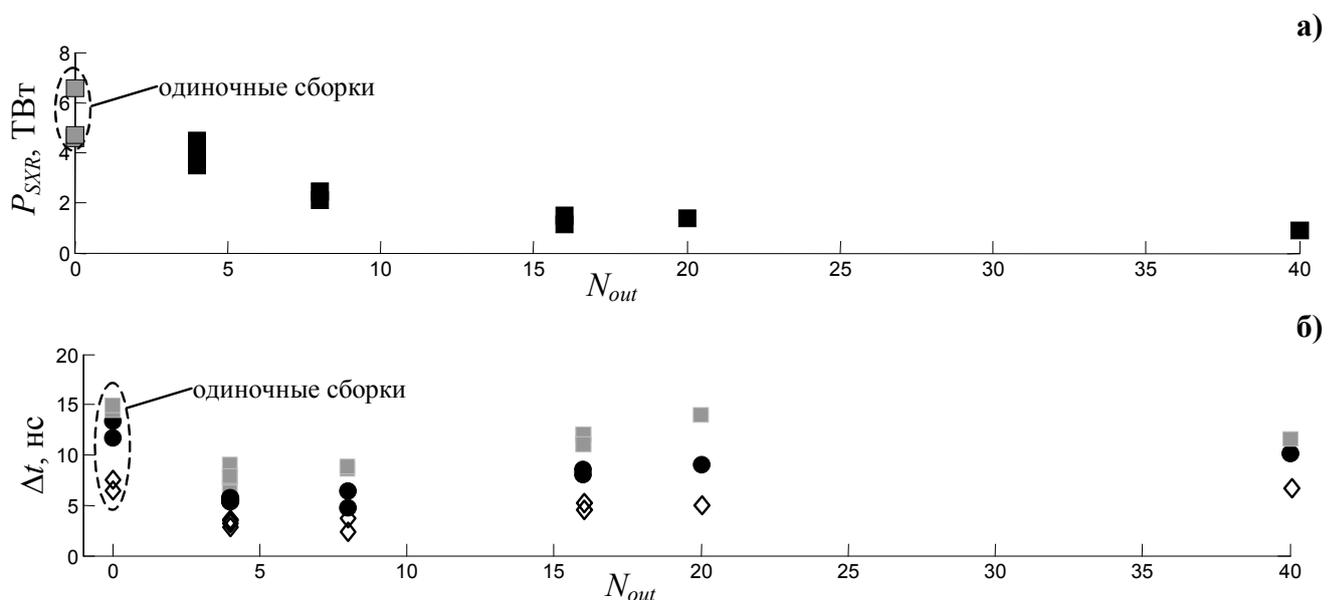


Рис. 12. Профилирование импульса мощности МРИ P_{SXR} ($h\nu > 100$ эВ) при сжатии вложенных капрон-вольфрамовых сборок с отношением радиусов $r_{in}/r_{out}=0.5$: а) зависимость P_{SXR} от количества волокон во внешнем каскаде N_{out} ; б) зависимости от N_{out} : ■ - длительности переднего фронта импульса МРИ; ● - ширины импульса МРИ на его полувысоте (FWHM); ◇ - длительности заднего фронта импульса МРИ.

В пятой главе идет речь о некоторых особенностях имплозии двухкаскадных лайнеров для использования в различных схемах ИТС. Представлены результаты экспериментов по сжатию плазмы пенно-проволочных лайнеров (один из каскадов – пенный лайнер, а другой проволочный), винтовых вложенныхборок и вложенныхборок с внешним каскадом квазисферической формы. Эксперименты со скрученными (винтовыми) вложеннымибороками (“basket arrays”) показали, что такая конструкция лайнера может быть использована в таких схемах ИТС, как MAGLiF или AutoMAG, для создания начального продольного (аксиального) магнитного поля определенной величины и направления (см. рис. 13) и последующего сжатия аксиального магнитного потока. В экспериментах с “basket arrays” и пенно-проволочными конструкциями лайнеров зарегистрировано замедление образования предвестника на оси лайнера в процессе затянутого плазмообразования, что позволит в дальнейшем уменьшить неблагоприятное воздействие плазменных потоков веществ с высоким Z на т/я мишень в двухкаскадных схемах ИТС, указанных выше.

Проведено экспериментальное моделирование 3-х мерного сжатия плазмы при помощи сжатия проволочных лайнеров различных конструкций, как показано на рис. 14. В опытах по имплозии плазмы квазисферическихборок оценена перспективность осуществления трехмерного сжатия плазмы квазисферическойбороки в качестве внешнего каскада вложенныхборок для повышения плотности потока мощности и энергии рентгеновского источника на т/я мишень. Результаты экспериментов с вложеннымибороками с внешним каскадом квазисферической формы представлены на рис. 15. Динамика сжатия плазмы в такихбороках показана на рис. 15б. Вблизи момента максимума рентгеновского излучения – в момент t_7 на рис. 15б между коническими электродами образуется компактный Z -пинч диаметром около 0.9-1.1 мм и высотой, практически равной высоте зазора между коническими электродами - ~3.0-3.5 мм. В это же время в экваториальной плоскости квазисферическойбороки присутствует излучающая отставшая плазма. Спектральные измерения с пространственным разрешением (см. рис. 15а справа) позволили также оценить эффективный диаметр пинча в зависимости от длины волны, среднее значение которого составляет примерно 1.2 мм. Полученные, с учетом размера источника МРИ, плотности потока мощности (25-40 ТВт/см² для $h\nu > 100$ эВ) и энергии излучения (500-770 кДж/см² для $h\nu > 100$ эВ и 600-940 кДж/см² для $h\nu > 10$ эВ) при сжатии такого двухкаскадного лайнера существенно (в 4-9 раз) превосходят соответствующие величины, полученные в экспериментах с одиночными W-квазисферическими лайнерами с подобными параметрами, и в 2-6 раз больше, чем в случае сжатия квазисферических волоконныхборок с оптимальным профилированием линейной массы волокон веществом с высоким атомным номером (Bi-напыление) - $m_l(\theta) \propto \sin^{-1}\theta$.

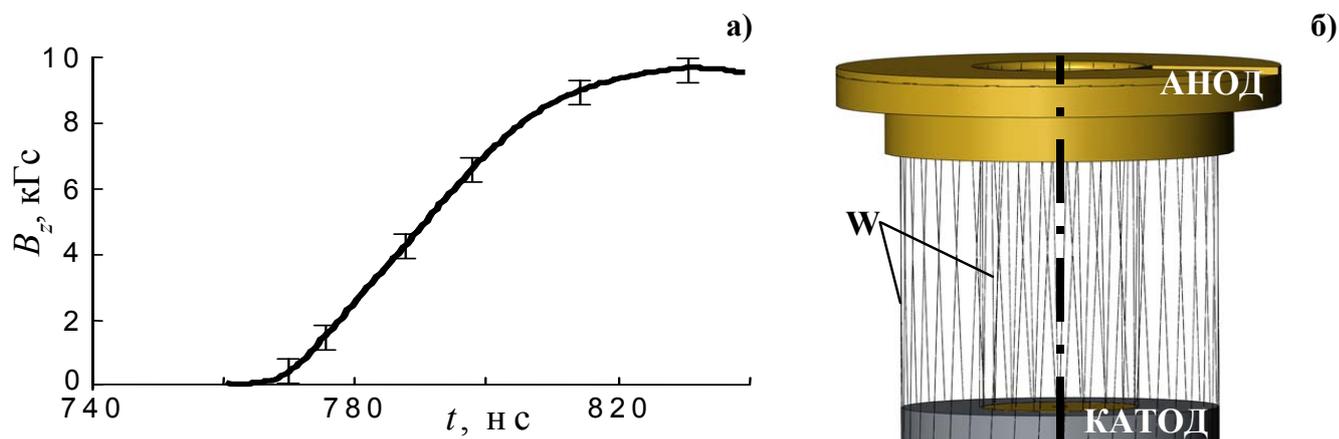


Рис. 13. Результаты измерения B_z -поля во вложенных сборках со встречной закруткой проволок (“basket arrays”): а) временная зависимость магнитного поля в случае винтовых вложенныхборок при $\alpha_{out} = -\alpha_{in} \approx 15^\circ$; б) внешний вид “basket arrays”.

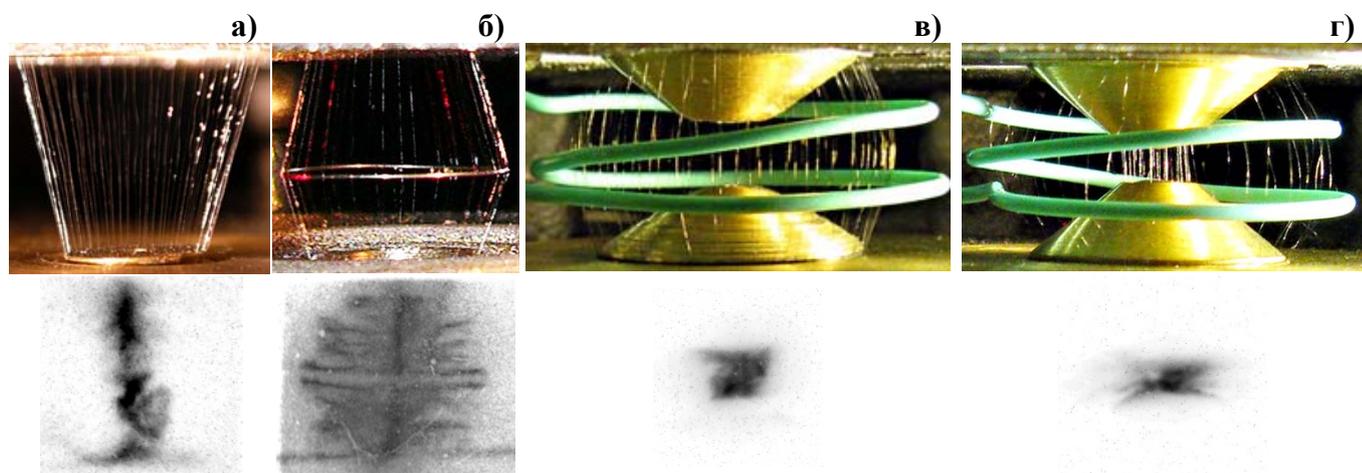


Рис. 14. Различные типы проволочныхборок для экспериментального моделирования трехмерного сжатия плазмы: а) конусная сборка; б) сборка формы «китайского фонарика» (встречные конусные сборки); в) одиночная квазисферическая сборка; г) двухкаскадная вложенная сборка, внешний каскад – квазисферическая сборка, внутренний каскад – цилиндрическая сборка. Внизу показано рентгеновское изображение сжатого состояния плазмы (в момент пиковой мощности МРИ), соответствующее данному типу лайнера.

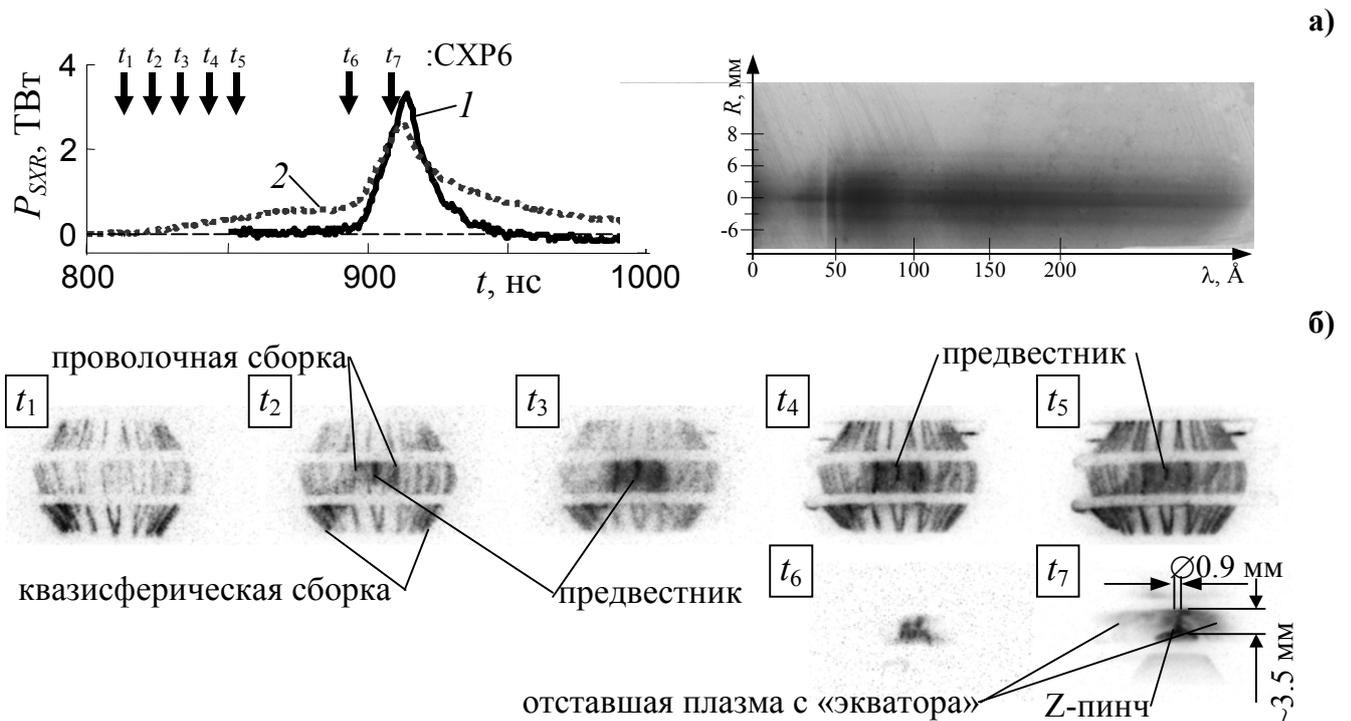


Рис. 15. Результаты эксперимента с вложенными сборками. Внешний каскад: квазисферическая проволочная сборка из 40 W 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см без профилирования. Параметры сборки до растяжки проволок: $r_{out}=6$ мм, $L_{wires}=18.5$ мм, $H_{ac}=16$ мм. Внутренний каскад: цилиндрическая проволочная сборка из 40 W 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см, $r_{in}=2.5$ мм, $h_{in}=4$ мм. а) *Слева*: временные зависимости: 1,2 - импульса мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100$ эВ) в абс. ед. и ($h\nu > 20$ эВ) в отн. ед.; *справа*: изображение спектра МРИ с радиальным пространственным разрешением; б) Рентгеновские кадровые изображения (негатив), синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми, где указаны времена регистрации кадров t_1-t_7 вертикальными стрелками (\downarrow СХР6). Анод – вверху, катод – внизу.

В Заключение 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 (Ангара-5-1 в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», ПФ-3 в НИЦ «Курчатовский институт», КПФ-4-Феникс в ГНПО «СФТИ», Абхазия и PF-1000 в ИФПиЛМ, Польша).

Основные результаты работы

В диссертационной работе приведены результаты экспериментальных исследований, полученные на четырех крупнейших в мире сильноточных электрофизических установках (Ангара-5-1 в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», ПФ-3 в НИЦ «Курчатовский институт», PF-1000 в

IFPiLM Польша и КПФ-4-Феникс в ГНПО СФТИ Абхазия). Экспериментальные исследования по теме диссертационной работы проводились автором в период 2006-2018 г.г.

Представленная диссертационная работа отражает тот уровень понимания исследуемого объекта (плазменные лайнеры различных конструкций), которого удалось достичь автору к настоящему моменту. Наиболее существенными результатами проделанной работы являются следующие:

1. Усовершенствована зондовая методика измерения магнитных полей внутри плазмы с высокой плотностью потока мощности и энергии на магнитный зонд (~ 1 ТВт/см² и ~ 10 -20 кДж/см²). Разработаны различные конструкции магнитных зондов, позволяющие проводить комплексные исследования радиального, азимутального и аксиального распределений магнитного поля внутри плазмы сжимающихся лайнеров. Универсальность конструкции чувствительного элемента зонда позволяет проводить исследования магнитных полей на других электрофизических установках, например, плазменный фокус.

2. Исследована одна из основных физических величин, характеризующая явление затянутого плазмообразования при токовой имплозии лайнеров, - интенсивность плазмообразования \dot{m} [в мкг/(см²·нс)]. Экспериментально подтверждена зависимость \dot{m} от вещества проволок и от начального радиуса расположения источников плазмы согласно функциональной зависимости $\dot{m} \propto K_m (I / R_0)^2$. В экспериментах на установке Ангара-5-1 определены величины \dot{m} для различных веществ (капрон, лавсан, Al, нерж. сталь, Cu, In, Sn, W, Bi), проведено их количественное сравнение. Эксперименты по сжатию W-проволочныхборок на плазмфокусной установке ПФ-3 при переключении на них тока плазменной оболочки подтвердили, ранее полученное в экспериментах на установке Ангара-5-1, значение \dot{m} для W-проволок. Полученные количественные данные по \dot{m} для указанных веществ могут использоваться при конструировании Z-пинчевого источника излучения, например, для одной из схем УТС – «динамического хольраума». Обнаруженное существенное различие величины интенсивности плазмообразования для пластиковых волокон (капрон, лавсан) и металлических проволок ($\dot{m}_{\text{волокна}} < \dot{m}_{\text{проволоки}}$ в 2.5-3 раза), при прочих равных условиях, позволило разработать различные конструкции лайнеров с заданной динамикой сжатия плазмы – металлизированные цилиндрические волоконные сборки, вложенные сборки смешанного состава и квазисферические сборки.

3. Результаты экспериментов по сжатию плазмы волоконныхборок с Al-напылением позволили количественно сравнить интенсивности плазмообразования металлизированных волоконныхборок иборок, изготовленных из проволок того же металла. Обнаружено, что полученные значения \dot{m} сопоставимы по величине для этих двух типов лайнеров. Таким

образом, полученные значения интенсивности плазмообразования для различных веществ в металлизированных сборках можно использовать для описания имплозии смешанных по составу лайнеров.

4. Комплексное исследование проникновения магнитного поля внутрь сжимаемой током цилиндрической проволочной сборки позволило впервые получить подробные распределения магнитного поля с радиальным, азимутальным и аксиальным пространственным разрешением. Определено радиальное распределение плотности тока как на стадии плазмообразования, так и на стадии ее окончания. Показано, что локальное окончание плазмообразования вдоль длины проволок в сборке приводит к прорыву в этих местах магнитного потока внутрь проволочной сборки и развитию магнитной Релей-Тейлоровской неустойчивости внешней границы плазмы, характерной для проволочныхборок на финальной стадии имплозии.

5. В соавторстве с к.ф.м.н. А.А. Самохиным предложен численный метод определения радиальной скорости движения плазмы по измеренным значениям локального градиента и индукции магнитного поля на различных стадиях имплозии проволочной сборки.

6. В экспериментах с металлизированными волоконными сборками обнаружено, что наличие отставшей плазмы из вещества пластиковых волокон на периферии сборки создает условия для уменьшения различного рода неустойчивостей при сжатии плазмы напыления, например, магнитной Релей-Тейлоровской неустойчивости. При этом развитие неустойчивостей Z-пинча затруднено. Следствием устойчивого и компактного сжатия плазмы из вещества слоя напыления являются уменьшение поперечного размера Z-пинча и сокращение длительности импульса МРИ. Устойчивое сжатие плазмы из вещества напыления и формирование устойчивого предвестника на оси сборки, за которым следует формирование устойчивого Z-пинча, наблюдалось для всех исследованных веществ (Al, In, Sn и Bi) и, по-видимому, носит общий характер.

7. Экспериментально обнаружено, что в зависимости от отношения радиусов r_{in}/r_{out} каскадов вложенныхборок реализуются различные режимы течения плазмы в пространстве между каскадами: доальфвеновский ($M_A < 1$), сверхальфвеновский ($M_A > 1$) и режим с формированием переходной области (ударной волны) между каскадами. Путем варьирования вещества проволок или волокон во внешнем каскаде (вольфрам и капрон) была показана зависимость реализации режимов течения плазмы между каскадами от отношения интенсивностей плазмообразования внутреннего и внешнего каскадов $\dot{m}_{in} / \dot{m}_{out}$. Сравнительный анализ экспериментальных результатов и результатов одномерного и двумерного МГД моделирования определил основные физические условия реализации того или иного режима течения плазмы между каскадами.

8. Обнаружено, что положение области УВ в пространстве между каскадами вложенныхборок меняется во времени, а ее форма позволяет судить о некоторых параметрах плазменного потока с внешнего каскада, а именно: его радиальной скорости движения, кинетическом давлении плазмы и характерном пространственном масштабе неустойчивостей в плазменном потоке. Это может являться визуальным индикатором плазменных потоков в любых двухкаскадных типах лайнеров. Например, во вложенных квазисферических сборках по форме УВ можно судить о степени самоподобного сжатия плазмы при трехмерной имплозии плазмы.

9. В экспериментах по сжатию вложенныхборок смешанного состава (капрон-вольфрам) обнаружено устойчивое и компактное сжатие плазмы внутреннего каскада (W-сборки) в случае использования во внешнем каскаде волоконной сборки. Присутствие на периферии вложенныхборок вещества с низким темпом плазмообразования приводит к подавлению развития магнитной Релей-Тейлоровской неустойчивости на внутреннем каскаде.

10. Предложен механизм взаимодействия плазменных потоков внешнего каскада с магнитным полем и плазмой внутреннего каскада. От характера такого взаимодействия зависит устойчивость сжатия плазмы внутреннего каскада на финальной стадии его сжатия. При определенных параметрах вложенныхборок вокруг внутреннего каскада образуется квазизамкнутая в азимутальном направлении оболочка. При этом плазма с внешнего каскада окружает внутренний каскад и стабилизирует его сжатие. Как следствие этого, темп развития МРТ неустойчивости на поверхности сжимающейся плазмы внутреннего каскада (W-сборки) падает за счет созданного таким образом распределения плотности плазмы и магнитного поля снаружи этого каскада.

11. В результате предварительных экспериментов продемонстрировано значительное увеличение мощности и энергии МРИ при переходе от одиночной квазисферической сборки к вложеннымборкам, в которых внешний каскад является квазисферическим. Плотность потока мощности и энергии излучения при сжатии такого двухкаскадного лайнера существенно (в 4-9 раз) превосходят соответствующие величины, полученные в экспериментах с одиночными W-квазисферическими лайнерами с подобными параметрами, и в 2-6 раз больше, чем в случае сжатия квазисферических волоконныхборок с оптимальным профилированием линейной массы волокон веществом с высоким атомным номером (Vi-напыление) - $m_l(\theta) \propto \sin^{-1}\theta$. Более перспективной выглядит разработка технологии создания вложенных квазисферических лайнеров с профилированным по массе внешним и внутренним каскадом, что и станет целью дальнейших исследований.

Цитируемая литература

1. Stalling C., Nielsen K. and Schneider R. Multiplexed array load for highpower pulsed generators. // *Appl. Phys. Lett.* 1976. V. 29. N. 7. P. 404-406.
2. Sangster T.C., McCrory R.L., Goncharov V.N., Harding D.R., Loucks S.J., McKenty P.W., Meyerhofer D.D., Skupsky S., Yaakobi B., MacGowan B.J., Atherton L.J., Hammel B.A., Lindl J.D., Moses E.I., Porter J.L., Cuneo M.E., Matzen M.K., Barnes C.W., Fernandez J.C., Wilson D.C., Kilkenny J.D., Bernat T.P., Nikroo A., Logan B.G., Yu S., Petrasso R.D., Sethian J.D., Obenschain S. Overview of inertial fusion research in the United States. // *Nuclear Fusion.* 2007. V. 47. N. 10. P. S686–S695.
3. Olson C., Rochau G., Slutz S., Morrow C., Olson R., Cuneo M., Hanson D., Bennett G., Sanford T., Bailey J., Stygar W., Vesey R., Mehlhorn T., Struve K., Mazarakis M., Savage M., Pointon T., Kiefer M., Rosenthal S., Cochrane K., Schneider L., Glover S., Reed K., Schroen D., Farnum C., Modesto M., Oscar D., Chhabildas L., Boyes J., Vigil V., Keith R., Turgeon M., Cipiti M., Lindgren E., Dandini V., Tran H., Smith D., McDaniel D., Quintenz J., Matzen M.K., VanDevender J.P., Gauster W., Shephard L., Walck M., Renk T., Tanaka T., Ulrickson M., Meier W., Latkowski J., Moir R., Schmitt R., Reyes S., Abbott R., Peterson R., Pollock G., Ottinger P., Schumer J., Peterson P., Kammer D., Kulcinski G., El-Guebaly L., Moses G., Sviatoslavsky I., Sawan M., Anderson M., Bonazza R., Oakley J., Meekunasombat P., De Groot J., Jensen N., Abdou M., Ying A., Calderoni P., Morley N., Abdel-Khalik S., Dillon C., Lascar C., Sadowski D., Curry R., McDonald K., Barkey M., Szaroletta W., Gallix R., Alexander N., Rickman W., Charman C., Shatoff H., Welch D., Rose D., Panchuk P., Louie D., Dean S., Kim A., Nedoseev S., Grabovsky E., Kingsep A., Smirnov V. Development Path for Z-Pinch IFE. // *Fusion Science and Technology.* 2005. V. 47. N. 3. P. 633-640.
4. Spielman R.B., Deeney C., Chandler G.A., Douglas M.R., Fehl D.L., Matzen M.K., McDaniel D.H., Nash T.J., Porter J.L., Sanford T.W.L., Seaman J.F., Stygar W.A., Struve K.W., Breeze S.P., McGurn J.S., Torres J.A., Zagar D.M., Gilliland T.L., Jobe D.O., McKenney J.L., Mock R.C., Vargas M., Wagoner T. Tungsten wire-array Z-pinch experiments at 200 TW and 2 MJ // *Phys. Plasmas.* 1998. V. 5. N. 5. P. 2105-2111.
5. Jones M.C., Ampleford D.J., Cuneo M.E., Hohlfelder R., Jennings C.A., Johnson D.W., Jones B., Lopez M.R., MacArthur J., Mills J.A., Preston T., Rochau G.A., Savage M., Spencer D., Sinars D.B., Porter J.L. X-ray power and yield measurements at the refurbished Z machine. // *Rev. Scien. Instr.* 2014. V. 85. P. 083501-1-083501-11.
6. Nash T.J., Derzon M.S., Chandler G.A., Leeper R., Fehl D., Lash J., Ruiz C., Cooper G., Seaman J.F., McGurn J., Lazier S., Torres J., Jobe D., Gilliland T., Hurst M., Mock R., Ryan P., Nielsen D., Armijo J., McKenney J., Hawn R., Hebron D., MacFarlane J.J., Petersen D., Bowers R., Matuska

- W., Ryutov D.D. High-temperature dynamic hohlraums on the pulsed power driver Z // *Phys. Plasmas*. 1999. V. 6. N.5. P. 2023-2029.
7. Ruiz C.L., Cooper G.W., Slutz S.A., Bailey J.E., Chandler G.A., Nash T.J., Mehlhorn T.A., Leeper R.J., Fehl D., Nelson A.J., Franklin J., Ziegler L. Production of Thermonuclear Neutrons from Deuterium-Filled Capsule Implosions Driven by Z-Pinch Dynamic Hohlraums // *Phys.Rev.Lett.* 2004. V. 93. P. 015001-1-015001-4.
 8. Leeper R.J., Ruiz C.L., Cooper G.W., Slutz S.A., Bailey J.E., Chandler G.A., Nash T.J., Mehlhorn T.A., Fehl D.L., Peterson K., Rochau G.A., Varnum W.A., Bell K.S., Casey D.T., Nelson A.J., Franklin J., Ziegler L. Production of thermonuclear neutrons from deuterium-filled capsule implosion experiments driven by Z-Pinch dynamic hohlraums at Sandia National Laboratories' Z facility // *J. Phys. IV France*. 2006. V. 133. P. 775-778.
 9. Hammer J.H., Tabak M., Wilks S.C., Lindl J.D., Bailey D.S., Rambo P.W., Toor A., Zimmerman G.B. High yield inertial confinement fusion target design for a z-pinch-driven hohlraum. // *Phys. Plasmas*. 1999. V. 6. N. 5. P. 2129-2136.
 10. Matzen M.K., Sweeney M.A., Adams R.G., Asay J.R., Bailey J.E., Bennett G.R., Bliss D.E., Bloomquist D.D., Brunner T.A., Campbell R.B., Chandler G.A., Coverdale C.A., Cuneo M.E., Davis J.P., Deeney C., Desjarlais M.P., Donovan G.L., Garasi C.J., Hail T.A., Hall C.A., Hanson D.L., Hurst M.J., Jones B., Knudson M.D., Leeper R.J., Lemke R.W., Mazarakis M.G., McDaniel D.H., Mehlhorn T.A., Nash T.J., Olson C.L., Porter J.L., Rambo P.K., Rosenthal S.E., Rochau G.A., Ruggles L.E., Ruiz C.L., Sanford T.W.L., Seamen J.F., Sinars D.B., Slutz S.A., Smith I.C., Struve K.W., Stygar W.A., Vesey R.A., Weinbrecht E.A., Wenger D.F., Yu E.P. Pulsed-power-driven high energy density physics and inertial confinement fusion research. // *Phys.Plas.* 2005. V. 12. P. 055503-1-055503-16.
 11. Lindl J.D., Amendt P., Berger R.L., Glendinning S.G., Glenzer S.H., Haan S.W., Kauffman R.L., Landen O.L., Suter L.J. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility. // *Phys. Plasmas*. 2004. V. 11. N. 2. P. 339-491.
 12. Smirnov V.P. Fast liners for inertial fusion. // *Plasma Phys. Contr. Fusion*. 1991. V. 33. P. 1697-1714.
 13. Смирнов В.П., Захаров С.В., Грабовский Е.В. Увеличение интенсивности излучения в квазисферической системе “двойной лайнер”/”dynamic-hohlraum”. // *Письма в ЖЭТФ*. 2005. Т. 81. Вып. 9. С. 556-562.
 14. Cuneo M.E., Vesey R.A., Porter J.L., Bennett G.R., Hanson D.L., Ruggles L.E., Simpson W.W., Idzorek G.C., Stygar W.A., Hammer J.H., Seamen J.J., Torres J.A., McGurn J.S., Green R.M. Double Z-Pinch Hohlraum Drive with Excellent Temperature Balance for Symmetric Inertial

- Confinement Fusion Capsule Implosions. // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. N. 21. P. 215004-1-215004-4.
15. Bennett G.R., Cuneo M.E., Vesey R.A., Porter J.L., Adams R.G., Aragon R.A., Caird J.A., Landen O.L., Rambo P.K., Rovang D.C., Ruggles L.E., Simpson W.W., Smith I.C., Wenger D.F. Symmetric Inertial-Confinement-Fusion-Capsule Implosions in a Double-Z-Pinch-Driven Hohlraum. // *Phys.Rev.Lett.* 2002. V. 89. N. 24. P. 245002-1-245002-4.
 16. Sanford T.W.L., Nash T.J., Olson R.E., Bliss D.E., Lemke R.W., Olson C.L., Ruiz C.L., Mock R.C., Bailey J.E., Chandler G.A., Cuneo M. E., Leeper R.J., Matzen M.K., Mehlhorn T.A., Slutz S.A., Stygar W.A., Peterson D.L., Chrien R.E., Watt R.G., Roderick N.F., Cooper G.W., Apruzese J.P., Sarkisov G.S., Chittenden J.P., Haines M.G. Progress in Z-pinch driven dynamic-hohlraums for high-temperature radiation-flow and ICF experiments at Sandia National Laboratories. // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2004. V. 46. N. 12B. P. B423–B433.
 17. Cuneo M.E., Vesey R.A., Bennett G.R., Sinars D.B., Stygar W.A., Waisman E.M., Porter J.L., Rambo P.K., Smith I.C., Lebedev S.V., Chittenden J.P., Bliss D.E., Nash T.J., Chandler G.A., Afeyan B.B., Yu E.P., Campbell R.B., Adams R.G., Hanson D.L., Mehlhorn T.A., Matzen M.K. Progress in symmetric ICF capsule implosions and wire-array z-pinch source physics for double-pinch-driven hohlraums. // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2006. V. 48. P. R1–R35.
 18. Slutz S.A., Herrmann M.C., Vesey R.A., Sefkow A.B., Sinars D.B., Rovang D.C., Peterson K.J., Cuneo M.E. Pulsed-power-driven cylindrical liner implosions of laser preheated fuel magnetized with an axial field. // *Phys. Plasmas.* 2010. V. 17. N. 5. P. 056303-1-056303-15.
 19. McBride R.D., Martin M.R., Lemke R.W., Greenly J.B., Jennings C.A., Rovang D.C., Sinars D.B., Cuneo M.E., Herrmann M.C., Slutz S.A., Nakhleh C.W., Ryutov D.D., Davis J.-P., Flicker D.G., Blue B.E., Tomlinson K., Schroen D., Stamm R.M., Smith G.E., Moore J.K., Rogers T.J., Robertson G.K., Kamm R.J., Smith I.C., Savage M., Stygar W.A., Rochau G.A., Jones M., Lopez M.R., Porter J.L., Matzen M.K. Beryllium liner implosion experiments on the Z accelerator in preparation for magnetized liner inertial fusion. // *Phys. Plasmas.* 2013. V. 20, N. 5. P. 056309-1-056309-10.
 20. Slutz S.A., Jennings C.A., Awe T.J., Shipley G.A., Hutsel B.T., Lamma D.C. Auto-magnetizing liners for magnetized inertial fusion. // *Phys. Plasmas.* 2017. V. 24. N. 1. P. 012704-1-012704-8.
 21. Грабовский Е.В., Смирнов В.П., Захаров С.В., Воробьев О.Ю., Дябилин К.С., Лебедев М.Е., Фортвов В.Е., Фролов А.А. Теоретическое и экспериментальное исследование плазмы z-пинча как источника мощного импульса мягкого рентгеновского излучения для генерации ударных волн в конденсированных мишенях. // *ЖЭТФ.* 1996. Т. 109, Вып. 3. P. 827-838.
 22. Александров В.В., Браницкий А.В., Волков Г.С., Грабовский Е.В., Зурин М.В., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Самохин А.А., Сасоров П.В., Смирнов В.П., Федулов М.В., Фролов И.Н.

- Динамика гетерогенного лайнера с затянутым плазмообразованием. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 2. С. 99-120.
23. Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю. Рентгенографическое исследование динамики и пространственной структуры Z-пинчей многопроволочных сборок. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 1. С. 33-40.
 24. Грабовский Е.В., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю. Исследование распределения энергетической яркости Z-пинча при токовой имплозии многопроволочныхборок на установке Ангара-5-1. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 6. С. 517-521.
 25. Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Заживихин В.В., Зурин М.В., Медовщиков С.Ф., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Смирнов В.П., Фролов И.Н., Федулов М.В. Эффекты "холодного старта" при сжатии плазменных лайнеров на установке "Ангара-5-1". // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 12. С. 1060-1078.
 26. Александров В.В., Грабовский Е.В., Зурин М.В., Красовский И.В., Митрофанов К.Н., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю., Самохин А.А., Сасоров П.В., Смирнов В.П., Федулов М.В., Фролов И.Н. Свойства самосжатого излучающего разряда высокой мощности с холодным стартом. // ЖЭТФ. 2004. Т. 126. № 6. С. 1317-1343.
 27. Shelkovenko T.A., Pikuz S.A., Douglass J.D., Blesener I.C., Greenly J.B., McBride R.D., Hammer D.A., Kusse B.R. Wire core and coronal plasma expansion in wire-array Z pinches with small numbers of wires. // Phys. Plas. 2007. V. 14. P. 102702-1-102702-10.
 28. Alexandrov V.V., Frolov I.N., Fedulov M.V., Grabovsky E.V., Mitrofanov K.N., Nedoseev S.L., Oleinik G.M., Porofeev I.Yu., Samokhin A.A., Sasorov P.V., Smirnov V.P., Volkov G.S., Zurin M.V., Zukakishvili G.G. Prolonged plasma production at current-driven implosion of wire arrays on Angara-5-1 facility. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2002. V. 30. N. 2. P. 559-566.
 29. Yu E.P., Oliver B.V., Sinars D.B., Mehlhorn T.A., Cuneo M.E., Sasorov P.V., Haines M.G., Lebedev S.V. Steady-state radiation ablation in the wire-array Z pinch. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 022705-1-022705-15.
 30. Александров В.В., Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Зурин М.В., Комаров Н.Н., Красовский И.В., Митрофанов К.Н., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю., Самохин А.А., Сасоров П.В., Смирнов В.П., Федулов М.В., Фролов И.Н., Чернов А.А. Токовое самосжатие многопроволочной сборки как радиальный плазменный ливень. // ЖЭТФ. 2003. Т. 124. Вып. 4(10). С. 829-839.
 31. Cuneo M.E., Waisman E.M., Lebedev S.V., Chittenden J. P., Stygar W.A., Chandler G.A., Vesey R.A., Yu E.P., Nash T.J., Bliss D.E., Sarkisov G.S., Wagoner T.C., Bennett G.R., Sinars D.B., Porter J.L., Simpson W.W., Ruggles L.E., Wenger D.F., Garasi C.J., Oliver B.V., Aragon R.A., Fowler W.E., Hettrick M.C., Idzorek G.C., Johnson D., Keller K., Lazier S.E., McGurn J.S.,

- Mehlhorn T.A., Moore T., Nielsen D.S., Pyle J., Speas S., Struve K.W., Torres J.A. Characteristics and scaling of tungsten-wire-array z-pinch implosion dynamics at 20 MA. // *Phys. Rev. E*. 2005. V. 71. P. 046406-1-046406-43.
32. Calamy H., Lassalle F., Loyer A., Zucchini F., Chittenden J.P., Hamann F., Maury P., Georges A., Bedoch J.P., Morell A. Use of microsecond current prepulse for dramatic improvements of wire array Z-pinch implosion. // *Phys. Plasmas*. 2008. V. 15. P. 012701-1-012701-11.
33. Harvey-Thompson A.J., Lebedev S.V., Burdiak G., Waisman E.M., Hall G.N., Suzuki-Vidal F., Bland S.N., Chittenden J.P., De Grouchy P., Khoory E., Pickworth L., Skidmore J., Swadling G. Suppression of the Ablation Phase in Wire Array Z Pinches Using a Tailored Current Prepulse. // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 106. N. 20. P. 205002-1-205002-1-4.
34. Grabovsky E.V., Azizov E.A., Alikhanov S.G., Bakhtin V., Gribov A.N., Halimullin Yu.A., Levashov V., Lototsky A.P., Zhitlukhin A.M., Krilov M.K., Pismenni V.D., Velikhov E.P., Kalinin Yu.G., Kingsep A.S., Dolgachev G.I., Smirnov V. P., Glukhikh V.A., Kuchinsky V.C., Pechersky O.P., Kormilitsyn A.I., Rikovanov G.V. THE IMPROVEMENT OF PULSE POWER SCHEME FOR «BAIKAL» PROJECT. // 14th IEEE International Pulsed Power Conference (PPC-2003). 2003, Dallas, Texas, USA, June 15-18, V. 2. P. 921-924.
35. Большаков Е.П., Василевский М.А., Водовозов В.М., Глухих В.А., Демидов В.Л., Еремкин В.В., Энгелько В.И., Янкин Е.Г., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Смирнов В.П. Проект генератора тока термоядерного комплекса «Байкал». // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2013. № 4. С. 3-11.
36. Selemir V.D., Demidov V.A., Ivanovsky A.V., Yermolovich V.F., Komilov V.G., Chelpanov V.I., Kazakov S.A., Vlasov Yu.V., Orlov A.P. Explosive complex for generation of pulsed fluxes of soft x-ray radiation. // In proc. of 12th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. BEAMS. Haifa, Israel. 1998. V. 1. P. 83-88.
37. Don Cook Z, ZX, and X-1: A Realistic Path to High Fusion Yield. // 12th IEEE International Pulsed Power Conference (PPC-1999). 1999, Monterey, California, USA, June 27-30, P. 33-37.
38. Stygar W.A., Cuneo M.E., Headley D.I., Ives H.C., Leeper R.J., Mazarakis M.G., Olson C.L., Porter J.L., Wagoner T.C., Woodworth J.R. Architecture of petawatt-class z-pinch drivers. // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*. 2007. V. 10. P. 030401-1-030401-24.
39. Lemke R.W., Vesey R.A., Cuneo M.E., Desjarlais M.P., Mehlhorn T.A. Z-pinch requirements for achieving high yield fusion via a z-pinch driven, double ended hohlraum concept. // IEEE International conference on “Megagauss magnetic generation and related topics”. 2006 (Santa Fe, NM, USA, November 5-10, 2006) Eds.: G.F. Kiuttu, P.J. Turchi, R. Reinovsky. P. 507-512.
40. Александров В.В., Барсук В.А., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Зукакишвили Г.Г., Медовщиков С.Ф., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Сасоров П.В. Исследование

проникновения магнитного поля внутрь сжимаемого током лайнера на установке Ангара-5-1.
// Физика плазмы. 2009. № 3. С. 229-250.

41. Ivanov V.V., Sotnikov V.I., Sarkisov G.S., Cowan T.E., Bland S.N., Jones B., Coverdale C.A., Deeney C., Laca P.J., Astanovitskiy A.L., Haboub A. Dynamics of Mass Transport and Magnetic Fields in Low-Wire-Number-Array Z Pinches. // Phys.Rev.Lett. 2006. V. 97. P. 125001-1-125001-4.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Alexandrov V.V., Frolov I.N., Fedulov M.V., Grabovsky E.V., Mitrofanov K.N., Nedoseev S.L., Oleinik G.M., Porofeev I.Yu., Samokhin A.A., Sasorov P.V., Smirnov V.P., Volkov G.S., Zurin M.V., Zukakishvili G.G. Prolonged plasma production at current-driven implosion of wire arrays on Angara-5-1 facility. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2002. V. 30. N. 2. P. 559-566.
2. * Александров В.В., Барсук В.А., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Зукакишвили Г.Г., Медовщиков С.Ф., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Сасоров П.В. Исследование проникновения магнитного поля внутрь сжимаемого током лайнера на установке Ангара-5-1. // Физика плазмы. 2009. № 3. С. 229-250.
3. * Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Фролов И.Н., Браницкий А.В., Лаухин Я.Н. Исследование динамики разлета плазмы тонкой алюминиевой фольги под воздействием мягкого рентгеновского излучения. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 4. С. 367-382.
4. * Митрофанов К.Н., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Лаухин Я.Н., Александров В.В., Олейник Г.М., Медовщиков С.Ф., Шевелько А.П. Особенности структуры излучающей области при токовом сжатии пено-проволочных сборок на установке Ангара-5-1. // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 1. С. 71-96.
5. * Александров В.В., Гасилов В.А., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Лаухин Я.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Ольховская О.Г., Сасоров П.В., Смирнов В.П., Фролов И.Н., Шевелько А.П. Об увеличении плотности энергии в плазме пинча при трехмерном сжатии квазисферических проволочных лайнеров. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 12. С. 1057-1073.
6. * Глазырин И.В., Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Карпеев А.В., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Самохин А.А. Измерение магнитных полей в плазме сжимающихся лайнеров при потоках мощности ~ 1 ТВт/см². // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер. Термоядерный синтез. 2009. Вып. 2. С. 67-82.

7. * Митрофанов К.Н., Крауз В.И., Грабовский Е.В., Мялтон В.В., Падух М., Грицук А.Н. Об особенностях применения магнитозондового метода диагностики высокотемпературной плазмы. // Приборы и техника эксперимента (ПТЭ). 2018. Т. 61. № 2. С. 78-99.
8. Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Самохин А.А., Смирнов В.П. Быстродействующие зонды для измерения магнитных полей в сжимающихся многопроволочных лайнерах. // Препринт ТРИНИТИ № 0091-А, Минатоминформ, 2002, - 39с.
9. * Митрофанов К.Н., Грабовский Е.В., Олейник Г.М., Александров В.В., Грицук А.Н., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н., Сасоров П.В., Самохин А.А. Исследование радиального распределения магнитного поля в плазме многопроволочныхборок на установке Ангара-5-1. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 10. С. 866-889.
10. Грабовский Е.В., Митрофанов К.Н., Кошелев А.Ю., Олейник Г.М. Влияние несинхронности срабатывания модулей установки Ангара-5-1 на проникновение магнитного поля внутрь проволочной сборки. // Препринт ТРИНИТИ № 143-А. Троицк, 2010. -27с.
11. * Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н., Самохин А.А. Влияние несинхронности срабатывания модулей установки Ангара-5-1 на проникновение магнитного поля внутрь проволочной сборки. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 5. С. 395-408.
12. * Грабовский Е.В., Митрофанов К.Н., Кошелев А.Ю., Самохин А.А., Александров В.В., Грицук А.Н., Лаухин Я.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н. Определение скорости плазмы внутри сжимающегося лайнера по измерению магнитного поля градиентным зондом. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 7. С. 631-647.
13. * Митрофанов К.Н., Крауз В.И., Грабовский Е.В., Мялтон В.В., Виноградов В.П., Падух М., Шольц М. Исследование взаимосвязи электротехнических параметров цепи плазмодиффузионного разряда с динамикой сжатия плазмы на установках ПФ-3 и PF-1000. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 5. С. 413-433.
14. * Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Птичкина Е.А., Грицук Е.А., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н. Исследование фазы окончания плазмообразования и формирования прорывов магнитного потока при имплозии проволочной сборки. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 9. С. 779-806.
15. * Крауз В.И., Митрофанов К.Н., Мялтон В.В., Виноградов В.П., Виноградова Ю.В., Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Койдан В.С., Мокеев А.Н. Магнитозондовые исследования токовой оболочки на установке ПФ-3. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 11. С. 997-1012.

16. * Крауз В.И., Митрофанов К.Н., Мьялтон В.В., Виноградов В.П., Виноградова Ю.В., Грабовский Е.В., Койдан В.С. Динамика структуры токнесущей плазменной оболочки плазмофокусного разряда. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 9. С. 797-810.
17. Krauz V., Mitrofanov K., Scholz M., Paduch M., Karpinski L., Zielinska E. and Kubes P. Experimental study of the structure of the plasma current sheath on the PF-1000 facility. // Plas. Phys. Contr. Fus. 2012. V. 54. N. 2. P. 025010-1-025010-14.
18. * Крауз В.И., Митрофанов К.Н., Войтенко Д.А., Матвеев Ю.В., Астапенко Г.И. Исследование азимутальных магнитных полей и скейлинговых закономерностей на установке КПФ-4-Феникс. // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 11. С.993-1005.
19. * Митрофанов К.Н., Крауз В.И., Кубеш П., Шольц М., Падух М., Зелинска Е. Исследование особенностей тонкой структуры ТПО и магнитных полей в приосевой области установки PF-1000 // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 8. С.721-737.
20. * Митрофанов К.Н., Крауз В.И., Мьялтон В.В., Виноградов В.П., Виноградова Ю.В., Грабовский Е.В., Данько С.А., Зеленин А.А., Медовщиков С.Ф., Мокеев А.Н. Исследование имплозии многопроволочных сборок на установке ПФ-3. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 2. С. 134-159.
21. * Данько С.А., Митрофанов К.Н., Крауз В.И., Мьялтон В.В., Жужунашвили А.И., Виноградов В.П., Харрасов А.М., Ананьев С.С., Виноградова Ю.В., Калинин Ю.Г. Исследование мягкого рентгеновского излучения при имплозии многопроволочных сборок в условиях плазмофокусного разряда на установке ПФ-3. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 11. С. 955-968.
22. Krauz V.I., Mitrofanov K.N., Myalton V.V., Grabovski E.V., Koidan V.S., Vinogradov V.P., Vinogradova Yu.V., Zukakishvili G.G. Dynamics of the current distribution in a discharge of the PF-3 plasma focus facility. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2010. V. 38. N. 2. P. 92-99.
23. * Зукакишвили Г.Г., Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю., Сасоров П.В., Фролов И.Н. Измерение распределения азимутальных магнитных полей в сжимающихся многопроволочных сборках на установке «Ангара-5-1». // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 978-988.
24. * Грабовский Е.В., Александров В.В., Волков Г.С., Гасилов В.А., Грибов А.Н., Грицук А.Н., Дьяченко С.В., Зайцев В.И., Медовщиков С.Ф., Митрофанов К.Н., Лаухин Я.Н., Олейник Г.М., Ольховская О.Г., Самохин А.А., Сасоров П.В., Фролов И.Н. Использование конусных проволочных сборок для моделирования трехмерных эффектов МГД-сжатия. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 10. С. 885-900.

25. * Зукакишвили Г.Г., Митрофанов К.Н., Грабовский Е.В., Олейник Г.М. Измерение аксиальных магнитных полей во время имплозии многопроволочных сборок на установке «Ангара-5-1». // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 8. С. 707-720.
26. * Александров В.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Лаухин Я.Н., Медовщиков С.Ф., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Сасоров П.В., Федулов М.В., Фролов И.Н. Исследование имплозии волоконных лайнеров на установке Ангара-5-1. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 6. С. 520-547.
27. * Александров В.В., Митрофанов К.Н., Грицук А.Н., Фролов И.Н., Грабовский Е.В., Лаухин Я.Н. Влияние интенсивности плазмообразования на динамику имплозии цилиндрических проволочныхборок с профилированной линейной массой. // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 10. С. 905-918.
28. * Александров В.В., Волков Г.С., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Грицук А.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Барсук В.А., Медовщиков С.Ф., Сасоров П.В. Исследование характеристик имплозии квазисферических проволочных лайнеров на установке Ангара-5-1 при токе до 4 МА. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 4. С. 345-369.
29. * Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грицук А.Н., Грабовский Е.В., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н., Брешков С.С. Особенности сжатия металлизированных волоконныхборок. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 2. С. 134-157.
30. * Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Сасоров П.В. Исследование магнитных полей и излучения в Z-пинчах из двойных многопроволочныхборок. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 1. С. 33-48.
31. * Митрофанов К.Н., Грабовский Е.В., Александров В.В., Фролов И.Н., Олейник Г.М., Лаухин Я.Н., Грицук А.Н., Сасоров П.В., Медовщиков С.Ф. Исследование имплозии пенно-проволочныхборок на установке Ангара-5-1. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 12. С. 1022-1041.
32. * Александров В.В., Волков Г.С., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Лаухин Я.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Шевелько А.П., Барсук В.А. Исследование формирования, устойчивости и рентгеновского излучения Z-пинча при имплозии волоконныхборок на установке Ангара-5-1. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 11. С. 978-992.
33. * Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грицук А.Н., Браницкий А.В., Фролов И.Н., Грабовский Е.В., Сасоров П.В., Ольховская О.Г., Зайцев В.И. Исследование режимов течения плазмы при токовой имплозии двухкаскадных вложенныхборок. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 2. С. 157-192.

34. * Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Сасоров П.В., Браницкий А.В., Грицук А.Н., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н. Исследование сжатия смешанных по составу вложенных сборок. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 12. С. 983-1009.
35. * Митрофанов К.Н., Зукакишвили Г.Г., Александров В.В., Грабовский Е.В., Фролов И.Н., Грибов А.Н. Исследование сжатия винтовых вложенныхборок на установке Ангара-5-1. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 1. С. 61-88.
36. * Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Браницкий А.В., Грицук А.Н., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н. Об устойчивости сжатия плазмы внутреннего каскада вложенныхборок. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 9. С. 751-764.
37. Aleksandrov V.V., Branitski A.V., Gasilov V.A., Grabovskiy E.V., Gritsuk A.N., Mitrofanov K.N., Olkhovskaya O.G., Sasorov P.V., Frolov I.N. Study of interaction between plasma flows and the magnetic field at the implosion of nested wire arrays. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2019. V. 61. N. 3. P. 035009-1-035009-16.
38. * Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грицук А.Н., Грабовский Е.В., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н., Олейник Г.М., Ольховская О.Г. Динамика сжатия квазисферических проволочныхборок с различным профилированием линейной массы. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 9. С. 813-840.
39. * Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Смирнов В.П., Александров В.В., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н., Грибов А.Н., Самохин А.А., Сасоров П.В., Митрофанов К.Н., Медовщиков С.Ф. Токовая имплозия квазисферических проволочных лайнеров. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89. Вып. 7. С. 371-374.

* - российские издания, рекомендованные ВАК для публикации результатов докторских диссертаций.

Митрофанов Константин Николаевич

Экспериментальное исследование особенностей плазмообразования и токового сжатия
плазмы лайнеров различных конструкций

Автореф. дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук

Подписано в печать __. __. 2019. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 2.4. Тираж ___ экз.

Типография _____