

Государственный Научный Центр Российской Федерации  
Акционерное общество «Троицкий Институт Инновационных и  
Термоядерных Исследований»

На правах рукописи

ВОЛКОВ ГЕОРГИЙ СТЕПАНОВИЧ

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ИЗЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЯДОВ  
НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА ДЛИТЕЛЬНОСТИ.

Специальность 1.3.9 – физика плазмы

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Москва – 2024

## Общая характеристика работы.

Изучение фундаментальных свойств материи при высокой плотности энергии обусловлено как стремлением к достижению в лабораторных условиях управляемого инерционного термоядерного синтеза, так и возможностью моделирования в лабораторных условиях процессов происходящих в звездах и космическом пространстве.

В настоящее время для создания в веществе высокой плотности энергии, наряду с мощными импульсными лазерами, используется пространственная и временная концентрация потоков энергии, генерируемых мощными источниками энергии – импульсными высоковольтными и сильноточными электрическими генераторами. Мощные импульсные высоковольтные электрические генераторы, создаваемые в 70-е годы прошлого века, проектировались для работы с сильноточными релятивистскими электронными пучками (РЭП), у которых ток пучка  $I_b$  значительно превышал ток Альфвена  $I_A$  ( $I_b \gg I_A = 17\gamma\beta$  кА,  $\beta = v/c$ ,  $\gamma = 1 + Ue/m_e c^2$ ,  $U$  – ускоряющее напряжение на диоде,  $m_e$  и  $e$  – масса и заряд электрона,  $v$  – скорость электрона, ускоренного напряжением  $U$ ). Эквивалентное сопротивление таких диодов  $\rho$  оказывается порядка  $\rho \sim U/I_b = U/(v \cdot I_A)$  и, соответственно,  $\rho \sim (\gamma - 1)m_e c^2 / 17v\gamma\beta e$ , где  $v = I_b/I_A$ . Для типичных значений  $U \sim 1$  МВ ( $\gamma = 3$ ,  $v \sim 20$ ) имеем эквивалентное сопротивление сильноточного генератора  $\rho \sim 1$  Ом.

Как правило, в разрабатываемых сильноточных генераторах короткий электрический импульс напряжения получался при высоковольтной коммутации водяных формирующих линий и подводился к диоду по вакуумной линии с магнитной самоизоляцией. Полученные мощные электронные пучки предполагалось использовать для зажигания термоядерной мишени. Однако эти проекты не получили должного развития из-за сложности транспортировки и вложения энергии РЭП в мишень. Поэтому в середине 90-х годов 20 века в СССР и США на основе развития технологии электрических генераторов высокой импульсной мощности была высказана идея создание мощного источника мягкого рентгеновского излучения на базе Z-пинчевого разряда с применением многомодульных сильноточных высоковольтных электромагнитных генераторов. Одной из целей этого направления является создание источников мягкого рентгеновского излучения с мощностью излучения свыше 1000 ТВт и длительностью импульса порядка 10 нс, которые можно было бы использовать в схемах непрямого обжатия сферических термоядерных мишеней. Требуемая плотность потока мягкого рентгеновского

излучения на термоядерную мишень диаметром 2-4 мм составляет величину  $\geq 1000$  ТВт/см<sup>2</sup>. В настоящее время необходимые потоки мягкого рентгеновского излучения на термоядерные мишени были обеспечены только в экспериментах с подземными ядерными взрывами [1].

Для создания импульсного термоядерного реактора с использованием излучения Z - пинчей в схемах непрямого обжатия сферических термоядерных мишеней необходимо не только разработать генераторы с током длительностью порядка 100 нс, амплитудой тока свыше 50 МА и электрической мощностью порядка 150-200 ТВт, но и обеспечить эффективную передачу энергии в нагрузку. Генераторы такого диапазона находятся на грани возможностей существующих технологий, поэтому существенное значение имеет понимание зависимости энергии и мощности получаемого рентгеновского излучения, как от тока генератора, так и от выбора характеристик используемых нагрузок для схем непрямого обжатия мишеней. В настоящее время реализация разработанных проектов импульсных термоядерных реакторов на основе сильноточных генераторов («Байкал» Россия и «ZR800» США) сдерживается из-за их высокой стоимости и сложности концентрации сверхвысокой электрической мощности на низкоиндуктивную нагрузку (Z-пинч).

Наиболее существенным фактором, стимулирующим данные исследования, является возможность получения мощности мягкого рентгеновского излучения при токовом сжатии, например, многопроволочных цилиндрических сборок, в несколько раз превышающую электрическую мощность используемых электрических сильноточных генераторов тока. При этом за время порядка 100 нс электрическая энергия генератора вкладывалась в кинетическую энергию ускоренной магнитным полем плазменной оболочки, а термализация оболочки с образованием высокотемпературного Z – пинча происходила за время порядка 10 нс. Следует отметить принципиальную возможность передачи высокой плотности потока электромагнитной энергии от генератора к низкоиндуктивной нагрузке по вакуумным передающим линиям с магнитной самоизоляцией [2].

Одним из перспективных направлений реализации импульсного термоядерного синтеза является использование мягкого рентгеновского излучения для обжатия сферических термоядерных мишеней (далее, мишеней). В настоящее время наибольший прогресс достигнут в схеме непрямого обжатия мишеней с использованием мягкого рентгеновского излучения высокой мощности. Мягкое рентгеновское излучение генерируется при взаимодействии мощного импульсного лазера с поверхностью

“хольраума” [3] или  $Z$  – пинчами, создаваемыми импульсными сильноточными электрическими генераторами наносекундного диапазона длительности.

Представленная работа исследует излучение и плазменную динамику сильноточных разрядов наносекундного диапазона длительности. Рассмотрены задачи, связанные с повышением эффективности схем непрямого обжатия сферических мишеней мягким рентгеновским излучением сильноточных  $Z$  – пинчей. Исследованы спектрально-энергетические характеристики излучающих  $Z$  – пинчей, получаемых при имплозии различных нагрузок сильноточными генераторами и энергия переносимая ионной компонентой разлетающейся плазмы пинча. Эксперименты проводились при разрядах с токами 3 – 4 МА и длительностью порядка 100 нс (сильноточный генератор «Ангара - 5 - 1”).

В работе предложены и изучены новые типы нагрузок сильноточных генераторов для схем непрямого обжатия сферических мишеней мягким рентгеновским излучением.

С целью моделирования генерации мощных потоков излучения при взаимодействии внешней ускоренной токовой оболочки с внутренней пенной оболочкой в схеме динамического «хольраума» исследовано излучение пинчей, получаемых при сжатии одно и двухкаскадных многопроволочных сборок со сложным атомным составом.

В работе исследована эффективность схемы композитного  $Z$  – пинча, с точки зрения передачи энергии от ускоренной током внешней цилиндрической оболочки в расположенный на оси оболочки сплошной цилиндр (fiber). Рассмотрены случаи, когда атомный номер вещества «файбера» был сравним или выше, чем атомный номер вещества внешней оболочки.

Как для задач инерциального термоядерного синтеза, так и для прикладных задач с использованием в качестве источника излучения  $Z$  - пинчей, получаемых при сжатии газовых струй, рассмотрены способы создания газовых оболочек в качестве нагрузок импульсных генераторов тока. Реализованы методики рентгеновского просвечивания для бесконтактного измерения параметров таких оболочек.

Экспериментально исследовано влияние предыонизации током на процессы сжатия и излучения  $Z$ –пинчей, создаваемых сжатием многопроволочных цилиндрическихборок.

Существенное внимание уделено вопросам метрологического обеспечения измерений потоков мягкого рентгеновского излучения. Наряду с разработкой методик и аппаратуры для обеспечения физического эксперимента, реализован набор источников импульсного рентгеновского излучения, перекрывающий спектральный интервал 0.05 – 100 кэВ и предназначенный для тестирования и калибровки рентгеновских приборов. Разработанные методы регистрации потоков мягкого рентгеновского излучения с

временным и спектральным разрешениями успешно использованы для исследования спектральных и энергетических характеристик сильноточных Z - пинчей.

### **Актуальность проблемы.**

Среди схем непрямого обжата сферических мишеней наиболее перспективными являются схема динамического “хольраума” предложенная в работе [4] и схема статического “хольраума” с двумя отдельными пинчами, предложенная в работе [5]. В обеих схемах одним из ключевых моментов является генерация мощного импульса мягкого рентгеновского излучения, или при сжатии двух Z - пинчей (статический “хольраум”), или при соударении внешней ускоренной током плазменной оболочки с внутренней полый оболочкой или сплошным цилиндром, внутри которой находится облучаемая мишень (динамический “хольраум”).

В качестве внешней оболочки могут использоваться многопроволочная сборка, сплошная металлическая фольга или газовая струя. Внутренняя цилиндрическая оболочка («хольраум») изготавливается из материала низкой плотности (например, агар-агар или полиэтилен) с добавлением мелкодисперсного порошка тяжелых элементов (W, Mo).

В схеме динамического “хольраума” (ДХ) сложно реализовывать высокую степень однородности облучения мишени. Схема статического «хольраума» требует генерации существенно больших потоков МР излучения сильноточных Z –пинчей, чем ДХ. Поэтому исследование новых вариантов нагрузок сильноточных Z-пинчей для схем непрямого обжата сферических мишеней является актуальной задачей.

Эффективная генерация излучения в схеме ДХ требует, как быстрой передачи энергии от ионов, нагреваемых в ударной волне, к электронам, так и высокой излучательной способности материала внутреннего цилиндра («хольраума»). Для выполнения этих требований, а также для прозрачности к собственному излучению, внутренний цилиндр должен содержать наряду с элементами с высоким атомным номером, имеющими высокую излучательную способность, и элементы с относительно невысоким атомным номером. Проверка эффективности генерации МР излучения в ударной волне плазмы, состоящей в основном из элементов с относительно невысоким атомным номером, с добавкой элементов с высоким атомным номером, является актуальной задачей.

В схеме статического «хольраума» при облучении мишени от двух пинчей, существенным моментом является повышение эффективности энергоклада генератора в пинч. Для повышения эффективности энергоклада и выхода излучения пинча,

исследована схема композитного  $Z$  - пинча, в которой внешняя оболочка сжимается на компактный плотный цилиндр (fiber), установленный на оси системы. В данной схеме существенным моментом является возможность быстрой передачи энергии или тока с внешней оболочки, имеющей низкую начальную индуктивную, на внутренний плотный и компактный «fiber», который и выступает в роли эффективного излучателя мягкого рентгеновского излучения. Чтобы «файбер» выступал в роли основного излучателя энергии, он должны содержать элементы с высокой излучательной способностью, а средний заряд ионов «файбера» должен превышать средний заряд ионов внешней оболочки. Исследование эффективности передачи энергии или тока с внешней оболочки на «fiber» в условиях, когда средний заряд ионов «файбера» превышает средний заряд ионов внешней оболочки, является актуальной задачей.

По сравнению со сжатием одиночных цилиндрических многопроволочных сборок, применение двойных многопроволочных сборок позволяет получать на конечной стадии сжатия, как более однородные пинчи, так и более высокую мощность излучения. Актуальным является исследование режимов излучения при переходе от каскадной нагрузки к композитному  $Z$  – пинчу, в которых роль «файбера» играет внутренняя многопроволочная сборка с диаметром порядка диаметра пинча. Отметим, что использование материалов с различными атомными номерами во внешнем и внутреннем каскадах сборок позволяет существенно влиять на излучательные характеристики получаемых  $Z$  – пинчей.

Принципиально важно проводить абсолютные измерения энергии излучения и потоков плазмы, генерируемые сильноточными  $Z$  -пинчами. Поэтому актуальным является разработка абсолютно калиброванных методик измерений для измерения выхода излучения и энергии плазменных потоков.

Существенный интерес представляет исследование спектров излучения используемых  $Z$  – пинчей в спектральном диапазоне энергий квантов от 0.1 до 5 кэВ. Самостоятельной задачей является получения высокого выхода линейчатого излучения многозарядных ионов элементов от азота до никеля, с соответствующей энергией квантов от 0.4 до 10 кэВ. Как показывают эксперименты, на величину выхода такого излучения существенное влияние оказывают начальные условия формирования внешней токовой оболочки. Существенное влияние на формирование оболочки оказывает процесс ее предыонизации. Поэтому для пинчей, получаемых при сжатии многопроволочных сборок, актуальным является исследование влияния предыонизации проволочек, например, импульсом тока от отдельного источника, на генерируемое МР излучение.

Отметим важную роль современных методов рентгеновской диагностики обладающих высокими временными, пространственными и спектральными разрешениями для исследования излучающих пинчей. Эффективное использование методик в экспериментах на мощной импульсной установке, требует предварительных отработок и калибровок аппаратуры на более простых установках меньшей мощности, но обеспечивающих подобные размеры источника излучения, широкий спектр излучения и соответствующую длительность импульса излучения. При этом спектр излучения источников должен охватывать широкий интервал от десятков эВ до сотен кэВ, поскольку именно такой широкий спектр излучения реализуется при работе мощных импульсных генераторов тераваттного диапазона мощности.

### **Цель работы и задачи исследований**

В исследованиях рассматриваются задачи, связанные с применением сильноточных излучающих газовых и многопроволочных  $Z$  – пинчей, как драйверов для управляемого инерциального термоядерного синтеза. Целью работы является исследование физических процессов, существенных для эффективной генерации мощных потоков мягкого рентгеновского излучения применяемых в схемах непрямого обжатия сферических мишеней.

В работе решались следующие задачи:

- разработка и исследование новых типов нагрузок сильноточных генераторов для схем непрямого обжатия сферических мишеней мягким рентгеновским излучением;
- исследование эффективности передачи энергии сильноточного генератора в нагрузку в схеме композитного  $Z$  - пинча;
- проверка эффективности генерации мягкого рентгеновского излучения в ударной волне в плазме, состоящей из смеси легких и тяжелых элементов;
- исследование влияние предыонизации нагрузки сильноточных импульсных генераторов на излучательные характеристики получаемого  $Z$  - пинча;
- измерение абсолютных потоков мягкого рентгеновского излучения плазмы сильноточного  $Z$ -пинча и энергии переносимой плазменными потоками распадающегося пинча;
- исследование эффективности источников ВУФ излучения на основе поверхностного пробоя по поверхности изолятора в вакууме для предыонизации нагрузок сильноточных генераторов;
- разработка методов создания газовых нагрузок для сильноточных импульсных разрядов и исследование параметров таких нагрузок;

- разработка стендовой базы для проведения тестирования и калибровок рентгеновских приборов в спектральном интервале энергий квантов от 0.05 до 100 кэВ.

**Научная новизна работы заключается в том, что**

1. Предложен и экспериментально исследован новый вариант цилиндрической лайнерной нагрузки с высокой начальной аксиальной неоднородностью распределения погонной массы для схем непрямого облучения термоядерных мишеней излучением сильноточных  $Z$  – пинчей. Доказано, что в зависимости от степени неоднородности начального распределения погонной массы нагрузки (10-30%) моделируются режимы, применимые для схем динамического и статического «хольраумов» и переходные режимы с возможностью повышения однородности облучения мишени.
2. Доказано, что при сжатии каскадных цилиндрических многопроволочных вольфрамовыхборок, имеющих уменьшенную индуктивность на конечной стадии сжатия, полученные полная и удельная мощности излучения пинча длиной 1 см (~10-11 ТВт и 10-11 ТВт/см) превышают полную и удельную мощности излучения пинча, полученного при сжатии «стандартной сборки» длиной 1.6 см (~ 7-8 ТВт и 5 ТВт/см) с теми же параметрами. Эффект достигается за счет увеличения роли во взаимодействии каскадов магнитного поля тока, протекающего по внутреннему каскаду.
3. Впервые предложен и экспериментально обоснован вариант каскадной нагрузки сильноточных  $Z$  – пинчей с использованием эффекта усиления взаимодействия каскадов сборки через магнитное поле тока внутреннего каскада применительно к схеме статического «хольраума». В схеме возможен захват части тока внутренней сборкой, удерживающей статический «хольраум». При взаимодействии каскадов практически вся кинетическая энергия внешней ускоренной оболочки может быть преобразована в мягкое рентгеновское излучение двух приэлектродных пинчей, используемых для облучения мишени в «хольрауме».
4. Впервые показана возможность эффективной (свыше 30%) передачи энергии с внешней оболочки композитного  $Z$  – пинча во внутренний плотный излучающий «fiber», состоящий из вещества с атомным номером, сравнимым с атомным номером вещества оболочки или превышающим его. Эффективная передача энергии от внешней оболочки на «файббер» объясняется высокой электронной теплопроводностью в отсутствие замагниченности электронов.

5. Впервые количественно измерены параметры плазмы пинчей, образующихся при сжатии многопроволочных сборок со сложным атомным составом (Al –W), в зависимости от массовой доли вольфрама в сборке. Экспериментально показано, что при увеличении доли W в сборке электронная плотность растет, а интенсивность линейчатого излучения [H]- и [He]- ионов Al существенно падает. Когда массовая доля вольфрама в сборке превышает 14%, линейчатое излучение Al регистрируется лишь из небольших, плотных и сильно нагретых областей с электронной температурой порядка 700 эВ.
6. Впервые экспериментально был обнаружен эффект влияния уменьшения времени передачи энергии от ионов, нагреваемых в ударной волне, к электронам на излучательную способность плазмы пинчей, образующихся при сжатии многопроволочных сборок со сложным атомным составом (Al –W). При содержании по массе вольфрама в сборке на уровне 25-30% достигается практически такая же мощность излучения и его длительность, как и при сжатии чисто вольфрамовых сборок с теми же параметрами. Эффект объясняется уменьшением времени передачи энергии от ионов к электронам для сборки сложного атомного состава (Al-W) за счет наличия в плазме высокой концентрации более легких ионов алюминия. Использование сборок со сложным атомным составом обеспечивает большую прозрачность плазмы для собственного излучения, что существенно для облучения мишени в схеме динамического «хольраума».
7. Впервые экспериментально измерена анизотропия плотности потоков энергии разлетающейся плазмы мегаамперных Z – пинчей. Показано, что в направлении перпендикулярном оси пинча, энергия переносимая плазменными потоками составляет менее 5% от энергии излучения, а в направлении вдоль оси они сравнимы.
8. Впервые обнаружен эффект увеличения вдвое выхода линейчатого излучения многозарядных ионов алюминия в спектральном интервале 1.5 - 2.3 кэВ при токовой предыонизации многопроволочных алюминиевых сборок за 110-130 нс до основного импульса тока. Эффект связывается с тем, что за счет токовой предыонизации проволочек лайнера к началу основного импульса тока реализуется более однородное распределение плотности плазмы по длине проволочек, что уменьшает влияние начальной аксиальной неоднородности распределения плотности плазмы на развитие неустойчивости Рэля–Тейлора.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Новый тип нагрузки с высокой начальной аксиальной неоднородностью распределения массы сжимаемого вещества для схем непрямого обжатия термоядерных мишеней с использованием сильноточных  $Z$  – пинчей, с моделированием в эксперименте, в зависимости от степени неоднородности распределения погонной массы нагрузки (10-30%), как режимов динамического и статического «хольраумов», так переходных режимов, позволяющих повысить однородность облучения мишени.
2. Получение полной и удельной мощности излучения пинча (9.5-11ТВт и 9.5-11ТВт/см) при сжатии каскадной нагрузки с уменьшенной индуктивностью внутреннего каскада, превышающей полную и удельную мощности излучения пинча, полученного при сжатии «стандартной» сборки длиной 1.6 см с теми же параметрами (7-8 ТВт и 5 ТВт/см).
3. Вариант каскадной нагрузки с использованием эффекта увеличения роли магнитного поля тока внутреннего каскада во взаимодействии оболочек каскадной сборки применительно к схеме статического «хольраума».
4. Получение в переходном режиме от сжатия алюминиевых многопроволочныхборок к сжатию вольфрамовых многопроволочныхборок, при содержании по массе вольфрама в сборке на уровне 25-30%, практически такой же мощности излучения, как и при сжатии чисто вольфрамовыхборок с теми же параметрами.
5. Эффективность генерации сильноточными  $Z$  – пинчами высокой мощности излучения в переходном режиме сжатия от каскадной сборки к композитному  $Z$ -пинчу с внешней сборкой из материала с относительно невысоким атомным номером (Al), обеспечивающей высокую плотность потока кинетической энергии, и внутренней сборкой малого диаметра из материала с высоким атомным номером (W) обеспечивающей высокую излучательную способность.
6. Обнаружение высокой эффективности вложения энергии внешней газовой цилиндрической плазменной оболочки во внутренний пенный “fiber” в геометрии композитного  $Z$ – пинча при использовании материала «файбера», имеющего атомный номер сравнимый или больше, чем атомным номером внешней газовой оболочки.
7. Разработка импульсного радиационного фольгового калориметра со встроенной системой абсолютной калибровки и дифференциальной системы регистрации сигнала для реализации низкого уровня электромагнитных наводок.

8. Обнаружение существенной анизотропии энергии ионных потоков разлетающейся плазмы сильноточного  $Z$  – пинча, а именно в направлении перпендикулярном оси пинча, энергия ионных потоков разлетающейся плазмы не превышает 5% от энергии излучения, а в направлении вдоль оси пинча они сравнимы.
9. Обнаружение эффекта увеличения выхода линейчатого излучения [H]- и [He]-ионов алюминия вдвое с 7 до 14 кДж при токовой предыонизации многопроволочной алюминиевой сборки за 110-130 нс до основного импульса тока.
10. Независимость эффективной «температура» ВУФ излучения разрядов микросекундной длительности по поверхности изолятора в вакууме 6 - 8 эВ от геометрии электродов (коаксиальный разряд, многоканальный коаксиальный разряд, разряд типа «флэшбод»), а сопротивления разряда от величины тока разряда при КПД преобразования запасенной в конденсаторе энергии в энергию ВУФ излучения для «флэшбода» 3%, коаксиального разряд 1% и шестнадцатиканальный коаксиального разряда 0.1%.

### **Научная и практическая значимость работы**

Полученные в проведенных исследованиях результаты привели к появлению: новых перспективных вариантов нагрузок сильноточных генераторов для схем непрямого обжата сферических мишеней; новых данных об излучательных способностях высокотемпературной плотной плазмы сложного атомного состава; новых представлений о степени анизотропии энергии плазменных потоков сильноточных  $Z$  - пинчей.

Разработанные научные приборы (рентгеновские спектрографы и полихроматоры) и экспериментальные методики использованы в исследованиях плотной высокотемпературной плазмы на лазерно-плазменных источниках тяжелых ионов (ЦЕРН, Швейцария, ТИР-1 ГНЦ РФ «ТРИНИТИ»), в исследованиях по физике взрывающихся проводников на мощных импульсных наносекундных сильноточных генераторах (Ecole Polytechnique, Франция),

Полученные экспериментальные данные стимулировали развитие детальных РМГД методов расчета спектральных характеристик излучения плотной высокотемпературной плазмы  $Z$  – пинчей.

### **Достоверность и обоснованность результатов,**

полученных в диссертационной работе, основаны на комплексном подходе к исследованиям, использованию большого количества различных перекрестных и взаимно дополняющих методов диагностики и статистике измерений. Результаты получены в экспериментах на различных экспериментальных установках. Полученные автором экспериментальные данные в пределах погрешностей измерений совпадают с результатами, полученными другими методиками.

Полученные результаты согласуются с данными работ других экспериментальных групп и исследователей. Результаты проведенных исследований опубликованы в российских и зарубежных реферируемых журналах с высокими рейтингами и полностью отражают содержание работы.

### **Личный вклад автора**

Постановка и проведение всех представленных в диссертации экспериментов, их обработка и интерпретация сделаны автором лично или при его определяющем участии. Автором предложены новые варианты каскадных нагрузок сильноточных Z-пинчей, перспективных для схем непрямого облучения термоядерных мишеней: вариант нагрузки, отличающийся высокой аксиальной неоднородностью распределения погонной массы и вариант нагрузки с использованием эффекта взаимодействия каскадов многопроволочной сборки через магнитное поле внутреннего каскада. Автором обнаружена существенная анизотропия энергии переносимой ионными потоками в сильноточных импульсных разрядах. Автором предложен вариант импульсного радиационного калориметра со встроенной системой абсолютной калибровки и дифференциальной системой регистрации сигнала.

### **Апробация работы и публикации:**

Результаты работы докладывались на:

1. Международных конференциях по физике высокотемпературной плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород 2003-2022 г.)
2. 4-ой научно-технической конференции с международным участием «Приборы с зарядовой связью и системы на их основе», Геленджик, Россия, 1992 г.
3. Международной конференции по экстремальному состоянию вещества (Эльбрус, Россия, 2007 г.)

4. Рабочем совещании по физике многопроволочных  $Z$  – пинчей (Питлохри, Великобритания, 2000 г.)
5. Международных конференциях по мощным импульсным пучкам заряженных частиц (BEAMs, Новосибирск, 1990; Хайфа, Израиль 1998г., Санкт-Петербург, 2004)
6. Всероссийских семинарах по  $Z$  – пинчам (Москва, ИАЭ им. И.В. Курчатова 2004, 2006).
7. Всероссийских конференциях по диагностике высокотемпературной плазмы (Звенигород, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015-2019).

Результаты исследований изложены в 30 статьях, в том числе в 29 статьях в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов докторских диссертаций и 30 докладах на Международных и Российских симпозиумах и конференциях. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

#### **Структура и объем работы.**

**Диссертация состоит из Введения, восьми глав, списка литературы и Заключения.**

**Объем диссертации составляет 251 стр., включая 138 рисунков, 33 таблиц и список литературы из 155 наименований.**

#### **Содержание диссертационной работы.**

##### **Введение.**

Во введении приведен обзор экспериментальных исследований по сильноточным разрядам высокой мощности. Рассмотрены актуальные вопросы исследования динамики сжатия и излучения высокотемпературной плотной плазмы  $Z$  – пинчевых разрядов. Приведена постановка задач.

##### **Первая глава.**

Существенную роль в исследованиях физических процессов в плотной высокотемпературной плазме с температурой 50-1000 эВ приобретают методики измерения мягкого рентгеновского излучения плазмы. Основные радиационные потери плазмы приходятся на спектральный интервал от 100 до 3000 эВ. Поскольку характерное время существования такой плазмы составляет 5-50 нс, используемые методики

измерений должны обладать высоким временным разрешением. Качество таких методик особенно ценно, если они обладают и высоким спектральным разрешением.

Для измерения спектральных потоков излучения с высоким временным разрешением (~1 нс) использовались вакуумные рентгеновские фотодиоды или полупроводниковые p-i-n детекторы с соответствующими фильтрами. Для измерения излучения плазмы со спектральным разрешением использовались полихроматоры на основе многослойных рентгеновских зеркал. В зависимости от конструкции прибора количество каналов изменялось от 1 до 10. Спектральное разрешение прибора обеспечивалось многослойным рентгеновским зеркалом в сочетании со спектральным пропусканием входного рентгеновского фильтра и характеристикой приемника излучения. Полихроматор обеспечивал измерения в спектральном интервале от 50 до 2000 эВ с временным разрешением 1-2 нс и спектральным 5 - 20%. Чувствительность каналов определялась по известным характеристикам зеркал, пропусканием входных рентгеновских фильтров и чувствительности приемников излучения [6].

Измерения спектров излучения плазмы с высоким спектральным разрешением проводились с использованием кристаллических спектрографов с регистрацией спектров излучения на пленку и линейные ПЗС структуры [7]. Данная методика наряду со спектральным разрешением позволяла в геометрии с входной щелью получать одномерное изображение плазменного объекта. Для получения спектров излучения с умеренным спектральным разрешением в диапазоне энергий квантов менее 1000 эВ использовался спектрограф с пропускающей решеткой. Регистрация спектров излучения осуществлялась как на рентгеновскую фотопленку, так и на кадровые рентгеновские ЭОПы.

Для измерения формы светящегося объекта использовались камеры-обскуры. При этом в ряде случаев использовались щелевые камеры обскуры с одномерным разрешением. Регистрация изображения осуществлялась на фотопленку, ПЗС линейки и рентгеновские электронно-оптические преобразователи.

Полные энергетические потери плазмы пинча (энергия излучения и энергия ионных потоков разлетающейся плазмы) измерялись термодинамическими калориметрами. Для измерения радиационных потерь плазмы пинча и энергии разлетающейся ионной компоненты использовался фольговый радиационный калориметр, имеющий временное разрешение ~ 1 мкс [8].

Измерения потоков мягкого рентгеновского излучения при наличии высокого фона жесткого рентгеновского излучения проводились сцинтилляционными детекторами с регистрацией излучения на фотоэлектронные умножители. Наряду с рентгеновскими

пленками, такая методика обеспечивает эффективную дискриминацию фона жесткого рентгеновского излучения за счет использования тонких сцинтилляторов.

Дополнительно к методикам измерения рентгеновского излучения реализованы методики измерения потоков плазмы разлетающегося пинча. Все разрабатываемые методики были адаптированы к проведению измерений в условиях высокого уровня электромагнитных наводок и фона жесткого рентгеновского излучения.

Указанные методики были успешно использованы для измерения спектрально-временных характеристик излучения различных импульсных плазменных объектов (сильноточные наносекундные Z - пинчи с токами от 3 до 7 МА, излучение плазмы при поверхностном пробое изолятора в вакууме, излучение лазерной плазмы [9], излучение микросекундных газовых Z – пинчей с токами ~ 200 кА).

## **Вторая глава.**

Объектом исследований значительной части проводящихся и планируемых экспериментов на установке "Ангара - 5 -1" и на импульсных генераторах меньшей мощности является плазма с электронной температурой  $T_e \sim 50-1000$  эВ. Так как значительная часть методик исследования параметров плазмы основана на измерениях ее собственного излучения, то необходимость метрологии МРИ в диапазоне энергии квантов  $30 \div 3000$  эВ, где содержится основная часть излученной энергии, представляется важной частью физических исследований. Процессы при самосжатых разрядах часто сопровождаются генерацией электронных пучков в плазме с энергией от десятков до сотен килоэлектронвольт. Генерация электронных пучков сопровождается тормозным и характеристическим излучением материала плазмы и электродов, поэтому спектральный интервал излучения пинчевых разрядов составляют кванты с энергиями от десятков эВ до сотен кэВ.

При проведении исследований на мощных импульсных источниках постоянно возникают задачи, связанные с метрологией как МРИ, так и рентгеновского излучения с энергией квантов от 10 до 100 кэВ. В качестве актуальных задач, возникающих при подготовке физического эксперимента, можно привести следующие задачи:

- абсолютная калибровка чувствительности детекторов мягкого рентгеновского излучения (кремниевые p-i-n диоды, алмазные диоды с p-i-n и без p-i-n структур, сцинтилляционные детекторы, детекторы на основе МКП);
- проверка линейности и временного разрешения детекторов;
- относительная калибровка элементов рентгеновской оптики;

- обработка рентгеновских методик (МКП-ЭОПы, болометры, термодатчики, калориметры, ВУФ спектрографы на пропускающих и отражающих решетках);
- рентгеновское просвечивание плазмы и газовых струй.

Для решения этих задач был разработан стенд, состоящий из различного вида источников РИ и соответствующего метрологического обеспечения.

Для тестирования методик в области энергий квантов свыше 1 кэВ использован источник рентгеновского излучения на основе взрывоэмиссионного вакуумного диода, запитываемого от многоступенчатого низкоиндуктивного генератора импульсного напряжения (ГИНа) с газовой изоляцией. Параметры ГИНа: рабочее напряжение 30 – 240 кВ, ток 0.5 - 2 кА с длительностью 80 нс. Спектр излучения - характеристическое и тормозное излучение материала сменных анодов. В качестве монитора рентгеновского излучения использовался детектор с известной спектральной чувствительностью.

Стенд использовался для калибровок кремниевых и алмазных детекторов, сцинтилляционных детекторов, определения контраста рентгеновских пленок, просвечивания газовых сверхзвуковых струй, калибровки ПЗС-матриц и ПЗС-линеек различных типов. Калибровки проводились в спектральном интервале от 1 - 100 кэВ. Основные применяемые методики: метод фильтров для тормозного рентгеновского излучения и метод фильтров Росса для характеристического рентгеновского излучения. При рабочем напряжении ГИНа ~ 120 кВ на линии  $K_{\alpha}$  Al 0.5 кэВ и на расстоянии  $L = 35$  см сигнал с полупроводникового детектора мягкого рентгеновского излучения имеющего чувствительность  $S \sim 10^{-2}$  А·см<sup>2</sup>/Вт (СППД-11-04 или AXUV-5) составляет величину порядка 3 В. Вклад тормозного непрерывного излучения составляет 75% от амплитуды сигнала. В тех же условиях для алмазных детекторов с чувствительностью  $\sim 10^{-3}$  А·см<sup>2</sup>/Вт получен сигнал амплитудой  $\sim 0.3$  В и вкладом тормозного излучения  $\sim 60$  %. При калибровках на характеристических линиях с энергиями свыше 4.5 кэВ вклад характеристического излучения в регистрируемый сигнал становится определяющим.

Поскольку эффективность генерации тормозного и линейчатого излучения электронного пучка существенно падает в области энергий квантов ниже 1кэВ, в качестве источника мягкого рентгеновского излучения в этой области спектра использовано излучение газового Z – пинча [10]. Главное преимущество такого источника - высокая эффективность преобразования запасенной электрической энергии в МР излучение ( $\sim 3 - 10\%$ ). Пинч образовывался при сжатии газовой струи током от конденсаторной батареи с емкостью 8 мкФ и энергозапасом до 2.5 кДж. При полной индуктивности цепи  $L \sim 50$  нГ и емкости батареи  $C = 8$  мкФ максимальная амплитуда тока составила  $I_0 = 300$  кА, что превосходит ток Брагинского-Пиза для вещества с  $Z \geq 10$ . Радиусу газовой струи

$R_0 = 1$  см и времени ее сжатия порядка 1 мкс соответствует оптимальная погонная масса струи  $m_{п} = 10^{-4}$  г/см. На рис.1 приведена схема установки с газовым (азот) пинчом.

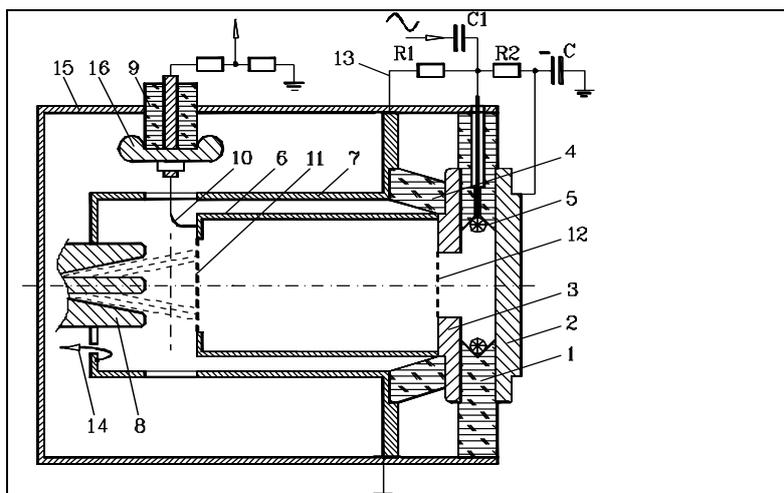


Рис.1 Схема установки. 1- корпус разрядника батареи; 2,3- электроды разрядника; 4-входной вакуумный изолятор; 5-поджигающий электрод разрядника; 6 -катодный коаксиал; 7 - анодный коаксиал; 8 – газовое сопло; 9-высоковольтный омический делитель напряжения; 10- вывод напряжения с катодного коаксиала; 11,12 – металлические сетки; 13- высоковольтный делитель; 14 - магнитная петля; 15-корпус вакуумной камеры; 16- экранирующий электрод высоковольтного делителя напряжения.

В качестве метрологического оснащения стенда для селекции излучения использованы монохроматоры на основе многослойных рентгеновских зеркал. Для калибровки детекторов использованы два идентичных канала полихроматора. В одном из каналов устанавливался калибруемый датчик, в другом устанавливался опорный датчик с известной спектральной чувствительностью. В качестве опорного детектора использован детектор типа AXUV-5. В главе приведены результаты калибровки чувствительности полупроводникового p-i-n детектора типа СПД-11-04 и детекторов на основе МКП пластин. Спектр излучения азотного Z –пинча исследован с использованием спектрографа с пропускающей дифракционной решетки и монохроматора с многослойными рентгеновскими зеркалами [10].

### Третья глава.

В главе приведены результаты исследования излучения композитных Z – пинчей на установке «Ангара-5-1». Впервые композитный Z - пинч был предложен как альтернатива

традиционному Z - пинчу в работах [11,12] для получения более стабильного и однородного плазменного образования и увеличения выхода мягкого рентгеновского излучения. В этих экспериментах Z - пинч создавался комбинацией тонкой проволоочки (“fiber”) (Al, Cu, W, SiO<sub>2</sub>) и коаксиальной плазменной струи. Эксперименты проводились на уровне тока в нагрузку до 250 кА с временем нарастания тока  $\approx 50$  нс. В экспериментах удалось получить как более стабильный и однородный Z - пинч, так и увеличить выход мягкого рентгеновского излучения. В экспериментах по композитным Z - пинчам на генераторе ГИТ - 4 при токе в нагрузку до 1.5 МА и временем нарастания  $\approx 150$  нс продемонстрирована эффективность передачи энергии от внешней оболочки на “fiber” [13,14].

Одномерные расчеты [11] показывают, что при схлопывании плазменной оболочки, состоящей из вещества с большим атомным номером, на “fiber” из вещества с малым атомным номером, например оболочка из Хе на CD<sub>2</sub>, возможен переброс почти всего тока с оболочки на плазменную корону “файбера” за время  $\tau = \Delta / V$ , где  $\Delta$  - толщина оболочки, а  $V$  – ее скорость в момент соударения. Эффективный переброс тока связан с тем, что проводимость “файбера” из вещества с небольшим атомным номером оказывается существенно выше (из-за ее более высокой температуры) проводимости внешней оболочки из вещества с высоким атомным номером. При типичных значениях  $V = 5 \cdot 10^7$  см/с и  $\Delta = 0.1$  см время переключения тока составляет  $\tau = 2$  нс.

В данной главе обсуждаются результаты исследований композитного Z-пинча, состоящего из внешней газовой оболочки (аргон, пропан) и внутреннего цилиндра («fiber»), изготовленного из пенистого материала (агар-агар с добавлением солей KCl или NaCl) с начальной плотностью  $\sim 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>. В этих экспериментах средний заряд ядер у ионов «файбера» был либо близким, либо превышал средний заряд ядер у ионов внешней оболочки, поэтому переключение тока на “файбер” затруднено. Эксперименты проводились на установке «Ангара-5-1» при токах в нагрузку до 3 МА. Внешней оболочкой нагрузки служила полая газовая струя. Под давлением магнитного поля тока, протекающего через ионизованный газ, оболочка ускорялась и сжималась на “файбер”, который располагался на оси газовой струи. Погонная масса газовой струи из аргона или пропана изменялась от 3 до 60 мкг/см. Близкие значения молекулярного веса аргона и пропана позволяли реализовать примерно одинаковые массы газовых струй, используя одну и ту же геометрию сверхзвукового сопла. Погонная масса «файбера» варьировалась от 55 до 80 мкг/см, а весовое содержание добавок KCl или NaCl изменялась от 30 до 57 %.

Для измерения параметров плазмы внешней оболочки и плазмы “файбера” использовались методы рентгеновской спектроскопии. Спектры снимались двумя

кристаллическими спектрографами. Первым спектрографом с направления составляющего угол  $30^0$  с осью пинча, спектр снимался с пространственным разрешением, а вторым спектрографом с направления перпендикулярном оси пинча спектр снимался без пространственного разрешения. Для определения электронной температуры использовались отношения интенсивностей линий H - и He - подобных ионов. Кроме того, наличие в “файбере” одновременно K и Cl (с равными атомными концентрациями), позволяет использовать другой способ оценки  $T_e$ , по отношению интенсивностей резонансных линий гелиеподобных ионов калия и хлора [15].

Совместное использование двух разных отношений линий позволило оценить значения электронной плотности и температуры, которые для “файбера” оказались равными  $(1 \div 2) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$  и  $0.8 \div 1.4 \text{ кэВ}$ . Электронная плотность в аргонной оболочке оказалась в тех же пределах, что и в “файбере”, а электронная температура - в пределах  $1.1 \div 1.2 \text{ кэВ}$ .

Анализ полученных результатов для различных выстрелов показывает, что бóльшие значения температуры “файбера” соответствуют бóльшим значениям погонной массы оболочки  $M_s$ . Вместе с тем величина  $M_s$  не влияла сколько-нибудь заметно на значения электронной плотности ни в оболочке, ни в “файбере”. Погонная масса “файбера”  $M_f$  и весовое содержание KCl были практически не изменными для всех выстрелов.

Спектрограммы, снятые спектрографом со щелью, показывают существенную неоднородность свечения линейчатого излучения вдоль пинча. Вблизи электродов излучение в линиях гелие - и водородоподобных ионов аргона, калия и хлора отсутствует. В линиях аргона излучает часть пинча длиной около 5 мм. Излучение в линиях калия и хлора занимает несколько меньший размер вдоль оси пинча (от 3 до 4 мм). Отметим, что в тех случаях, когда газовое сопло было изготовлено из дюралюминия, непосредственно вблизи катода наблюдалось свечение H - и He - подобных ионов Al. Размер области свечения H - и He - подобных ионов Al по высоте пинча варьировался от 1 до 3 мм. Оценка температуры и плотности электронов по линиям ионов алюминия приводит к существенно более низким значениям параметров плазмы вблизи катода, чем в центральной области пинча:  $T_e \approx 0.5 \text{ кэВ}$ ,  $n_e \approx (1 \div 2) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$

Экспериментальные результаты по интегральным выходам энергии в каждой линии гелие- и водородоподобных ионов K, Cl и Ar в сочетании с информацией о длительности свечения  $\tau_f$  позволяют (используя расчётные данные по мощности излучения) оценить абсолютное количество вещества, в котором электронная температура  $T_e$  в течение периода  $\tau_f$  близка к 1 кэВ. Величина  $\tau_f$  оценивалась по длительности более мягкого излучения ( $h\nu \sim 525 \text{ эВ}$ ), что должно приводить к занижению оценочной величины

мощности и, следовательно, к занижению оценочной доли вещества с  $T_e \cong 1$  кэВ. Спектроскопические измерения показывают, что в экспериментах с внешней аргоновой оболочкой, значительная доля вещества “файбера”, содержащего калий и хлор, имеет температуру, сравнимую с температурой оболочки.

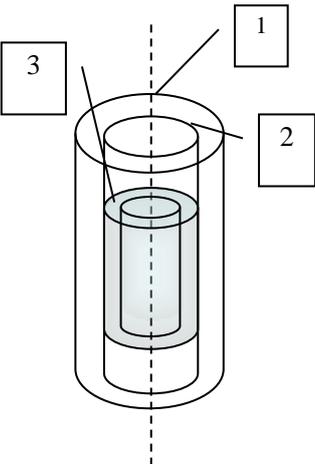
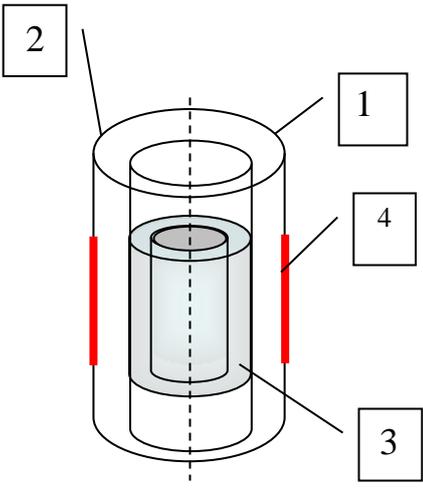
При оценке доли пены с высокой температурой разумно относить её не ко всему пинчу, а только к 3÷4 мм вдоль оси (центральная часть пинча). Нагревание пены вдали от её поверхности возможно как вследствие теплопроводности, так и за счёт джоулева тепловыделения при проникновении магнитного поля внутрь пены. При классической электропроводности  $\sigma$  глубина проникновения поля  $\delta_m = (D_m \tau_r)^{1/2}$ , где  $D_m = c^2 / 4\pi\sigma$ , за  $\tau_r$  слишком мало по сравнению с поперечным размером пинча ( $\sim 3$  мм). Действительно, при  $\zeta = \langle z_i^2 \rangle / \langle z_i \rangle \approx 10$ , где  $z_i$  - заряд ионов в агар-агаре с примесями, при  $T_e = 1$  кэВ получим, что за  $\tau_r \approx 30$  нс,  $\delta_m$  не превышает 0.1 мм. При возникновении неустойчивости в плазме оболочки возможно уменьшение  $\sigma$ , что экспериментально подтверждается резким увеличением сопротивления плазмы [16]. При этом возрастание скорости диффузии магнитного поля должно привести к частичному проникновению тока в пену и её нагреванию.

Из других механизмов нагревания “файбера” следует отметить ударную волну и электронную теплопроводность. Механизм прогрева пены электронной теплопроводностью эффективен только в отсутствие замагниченности электронов. Тогда при  $T_e = 1$  кэВ,  $n_e = 1.5 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup> и  $\zeta \cong 10$  получим, что коэффициент температуропроводности  $\chi_e \cong 1.4 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/с и глубина проникновения  $\delta_e = (\chi_e \tau_r)^{1/2} = 0.7$  мм, что сравнимо с поперечным размером пинча ( $\sim 3$  мм) [15].

Таким образом, пространственно - разрешающая спектроскопия показала, что размер источника линейчатого излучения гелие - и водородо-подобных ионов К, Сl и Ag имеет вдоль оси композитного пинча близкие значения  $\square 5$  мм для аргоновой оболочки и  $3 \square 4$  мм для “файбера”, содержащего КСl. Вблизи электродов такое излучение отсутствует, однако в области с указанными размерами не менее половины вещества нагревается до температуры  $\square 1$  кэВ. Такая температура достигается как в оболочке, так и в “файбере”, что, возможно, свидетельствует о достаточно хорошей теплопроводности. Непосредственный джоулев нагрев “файбера” возможен только при значительном снижении электропроводности, так как коэффициент диффузии магнитного поля при классической электропроводности слишком мал. Поэтому наиболее вероятно, что прогрева «файбера» происходит за счет прохождения ударной волны и механизма электронной теплопроводности.

#### Четвертая глава.

В главе описан новый вариант нагрузки сильноточного Z -пинча для схем непрямого обжатия мишеней. Особенностью нагрузки является высокая начальная аксиальная неоднородность распределения массы сжимаемого вещества. В экспериментах в качестве нагрузки сильноточного генератора “Ангара-5-1” [17] использовалась каскадная сборка, состоящая из двойной многопроволочной сборки из вольфрамовых проволочек и внутренней, соосной с ней, пенной цилиндрической оболочкой низкой плотности, расположенной симметрично относительно высоковольтных электродов концентратора. Длина пенной цилиндрической оболочки составляла половину от величины межэлектродного зазора катод-анод, а ее диаметр был равен диаметру внутренней многопроволочной сборки (рис.2а). Технология изготовления пены низкой плотности из агар-агара и методы внесения в нее мелкодисперсных порошков тяжелых металлов подробно описаны в работе [18].

	
<p>Рис.2.а. 1 - Сборка внешняя – 40 W-проволок <math>\varnothing 6</math> мкм, 220мкг/см, диаметр 12мм; 2 - Сборка внутренняя – 20 W -проволок <math>\varnothing 6</math> мкм,, 110мкг/см, диаметр 5мм; 3 – Пенный цилиндр (агар-агар), 170мкг/см, диаметр 5мм×0.2мм.</p>	<p>Рис.2б. 1 - Сборка внешняя – 40 W-проволок <math>\varnothing 6</math> мкм, 220мкг/см, диаметр 12мм; 2 - Сборка внутренняя – 20 W -проволок <math>\varnothing 6</math> мкм,, 110мкг/см, диаметр 5мм; 3 – Пенный цилиндр (агар-агар), 170мкг/см, диаметр 5мм×0.2мм; 4 - Напыление Вi <math>\delta=0.4</math> мкм на длине 7 мм (~ 30мкг/см).</p>

Экспериментально показано, что для динамики сжатия такой нагрузки характерны две стадии: сжатие многопроволочной нагрузки у катода и анода, с образованием двух отдельных пинчей и сжатие, с задержкой, центральной части нагрузки, включающей пенную цилиндрическую оболочку [19].

Как показывает рентгеновское просвечивание к моменту соударения оболочек в схеме динамического «хольраума» в экспериментах на установке «Ангара-5-1», мелкодисперсный порошок  $W$  добавленный в пену, в основном находится в твердотельном состоянии [20]. В предлагаемой схеме можно реализовать интенсивное облучение пены мягким рентгеновским излучением приэлектродных пинчей, переводящим ее из твердотельного состояния в парообразное или плазменное еще до начала процесса взаимодействия ускоренной внешней плазменной оболочки с пенным цилиндром. Необходимое условие реализуется при использовании дополнительного, неоднородного по длине сборки, напыления металлических покрытий ( $Vi$ ) на проволоки внешней сборки на длине, соответствующей длине внутреннего пенного цилиндра (рис.2б). Задержка сжатия центральной (по длине) части нагрузки составляет 4-6 нс при добавленной погонной массе  $\sim 30$  мкг/см и увеличивается до 15-18 нс при напыленной массе  $Vi$  70-80 мкг/см. Показано, что энергия излучения приэлектродных пинчей позволяет предыонизовывать пенную оболочку из агар-агара с мелкодисперсной добавкой порошка вольфрама до ее взаимодействия с внешней ускоренной оболочкой [19]. При этом полная масса внутренней оболочки может достигать 500 мкг и содержанием порошка вольфрама до 50% от веса оболочки.

Изменяя погонную массу дополнительного покрытия проволок, можно подобрать момент соударения внешней оболочки с пенным цилиндром, совпадающим с моментом сжатия приэлектродных пинчей. В этом случае мягкое рентгеновское излучение приэлектродных пинчей может быть использовано для повышения однородности облучения мишени в схеме динамического «хольраума». При дальнейшем увеличении массы дополнительного напыления на проволоки внешней сборки реализуется схема статического «хольраума» непрямого облучения мишеней.

## **Пятая глава.**

При сжатии газовых оболочек, цилиндрических лайнеров изготовленных из пены низкой плотности на начальной стадии процесса нагрузка сильноточного импульсного генератора является непроводящей. Процесс образования проводимости таких нагрузок носит статистический характер, и определяется как скоростью нарастания напряжения, так и величиной пробивного напряжения. Использование начальной предыонизации

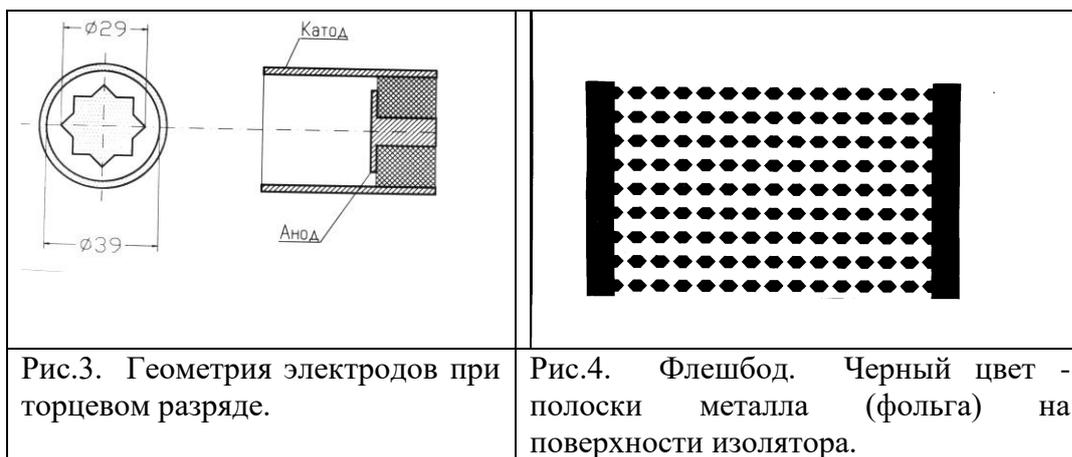
таких нагрузок позволяет получить более однородное распределение тока на стадии формирования плазменной оболочки [21]. В качестве источников предыонизации нагрузок сильноточных генераторов используются электронные пучки, ультрафиолетовое или мягкое рентгеновское излучение, возникающее при пробое диэлектрика по поверхности в вакууме или токовая предыонизация с паузой тока.

В главе рассмотрены способы предыонизации нагрузок сильноточных генераторов на основе ВУФ источника при вакуумном пробое по поверхности диэлектрика, а также влияние токовой предыонизации на сжатие многопроволочных проводящих цилиндрических сборок.

Явление пробоя диэлектрических поверхностей - традиционный источник неприятностей высоковольтного эксперимента, сопровождается тепловым излучением в области вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) диапазона, с тенденцией перехода в более коротковолновую ультрафиолетовую (УФ) и область мягкого рентгена (МР) при увеличении амплитуды прикладываемых напряжений и укорочении фронта тока. Известны варианты такого источника для предыонизации анодных поверхностей сильноточного ускорителя легких ионов "РВФА-2" [22].

Изучение процессов формирования сильноточных плазодинамических разрядов магнитоплазменного компрессора (МПК) эрозионного типа в газах привело к созданию высокояркостных источников теплового ВУФ - излучения, имеющих ряд преимуществ перед другими источниками излучения [23,24]. Источники на основе МПК имеют существенно выше к.п.д. преобразования энергии заряженной конденсаторной батареи в излучение по сравнению с разрядом в вакууме [22] за счет торможения эрозионного плазменного потока на газовой преграде. В условиях эксперимента на установке "АНГАРА – 5 - 1" они перспективны для ионизации газовых, дисперсных или конденсированных лайнеров.

В главе приведены результаты исследования разрядов микросекундной длительности с токами порядка 100 кА по поверхности диэлектрика с различной геометрией электродов, как в вакууме, так и в воздухе при атмосферном давлении. Исследовались геометрии коаксиального торцевого разряда и разряда по многоэлектродной поверхности типа «flashboard» (рис.3 и рис.4).



Показано, что энергия, вложенная в разряд, организованный в воздухе, независимо от геометрии электродов, в основном, преобразуется в энергию ударной волны, и только ~ 15 % преобразуется в энергию оптического и длинноволнового ультрафиолетового излучения.

Применение геометрии электродов типа “flashboard” позволяет увеличить сопротивление одного разрядного промежутка в 3 раза по сравнению с сопротивлением торцевого разряда. Кроме того, дополнительное увеличение сопротивления разряда по “флешбоду” достигается за счет последовательного включения разрядных промежутков. Многократное увеличение сопротивления позволило вложить до 50 % запасенной в конденсаторе энергии в разряд по поверхности «флэшбода» в воздухе, и получить источник оптического и длинноволнового ультрафиолетового излучения в 5 раз более мощный, чем при торцевом разряде. Измеренная энергия излучения разряда в геометрии «флешбод» составила ~ 40 Дж при энергозапасе батареи 530 Дж, что соответствует к.п.д. преобразования запасенной энергии в энергию излучения ~ 8 %. Соответственно у торцевого разряда энергия излучения составила ~ 6 Дж при энергозапасе батареи 440 Дж, что соответствует к.п.д. ~ 1.4 %. Длительность импульса излучения соответствует первому полупериоду разряда батареи.

Яркостная температура плазмы при высоковольтном вакуумном пробое поверхности диэлектриков составляет, как правило, 5 – 15 эВ и сопровождается ультрафиолетовым излучением в спектральном интервале от 5 до 60 эВ [22]. Известно, что поверхностный пробой диэлектриков является еще и источником плазмы со скоростями ~ 10<sup>7</sup> см/с. Поэтому для измерения ультрафиолетового излучения использовались вакуумные фотодиоды, позволяющие регистрировать не только излучение, но и плазменные потоки. Для определения "жесткости" излучения использовался метод фильтров. При этом на оси системы располагался двойной ВУФ датчик. Один из каналов датчика регистрировал не фильтрованное излучение с энергией выше порога фото выхода алюминиевого

фотокаатода ( $\sim 6$  эВ). Другой канал регистрировал излучение через различные фильтры из нитроцеллюлозы с массовой толщиной от 5 до 15 мкг/см<sup>2</sup>.

Для оценок энергии излучения использовались два крайних представления спектра излучения, «чернотельный» спектр и спектр линейчатый, с энергией излучения соответствующий степени ослабления излучения фильтрованным датчиком. Оценки выхода излучения, полученные обоими способами отличались не более, чем на 20 %. В дальнейшем при определении "температуры" плазмы спектр излучения предполагался "чернотельным". Измеренная «температура» ВУФ излучения разрядов в вакууме составила 6 - 8 эВ независимо от геометрии электродов. Пробой сопровождается образованием плазмы, движущейся со скоростью  $(1-2) \cdot 10^7$  см/с. Наиболее мощным источником ВУФ излучения является разряд по «флешбоду» (энергия излучения  $\sim 17$  Дж). Энергия ВУФ излучения торцевого разряда составила  $\sim 6$  Дж. Полученные к.п.д. преобразования запасенной энергии в энергию излучения составили: «флешбод»  $\sim 3$  % и торцевой разряд  $\sim 1$  %.

Вариант системы предыонизации газовых (ксенон) струй был реализован на установке «Ангара - 5 - 1». Элементы предыонизации были размещены на дисковом концентраторе (ДК) в вакуумной камере установки "АНГАРА-5-1". Разряд осуществлялся по торцевой поверхности изоляторов 16 - ти кабелей типа РК-50-9-13 включенных параллельно. Емкостной накопитель энергии состоял из двух конденсаторов типа КМК - 2 - 60 с низкоиндуктивной ошиновкой. Для коммутации использовался вакуумный разрядник, встроенный в стенку вакуумной камеры. На рис.5 приведена схема эксперимента по исследованию излучения источника на основе торцевого разряда 16-ти кабелей включенных параллельно.

На рис.6 приведены осциллограммы сигналов ВУФ датчиков при разряде по поверхности кабелей с энергозапасом в конденсаторной батарее 800 Дж. Сравнение осциллограмм открытого ВУФ датчика расположенного на оси перед системой предыонизации и такого же датчика расположенного на оси с обратной стороны системы предыонизации показывает, что первый максимум на сигналах, совпадающий с первым периодом тока, связан с излучением. Второй максимум на сигналах открытых датчиков регистрирует плазму, которая летит как вперед, так и назад вдоль оси системы.

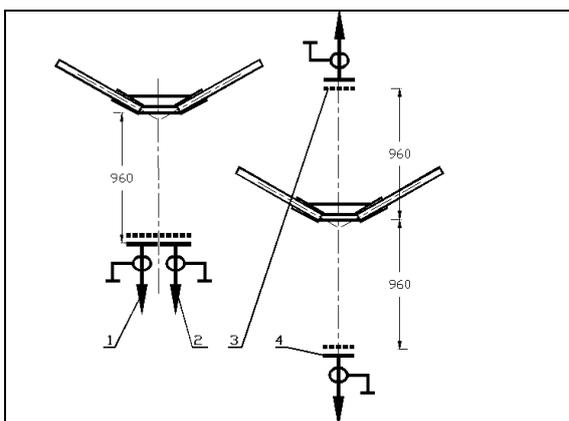


Рис.5. Схема экспериментов по исследованию излучения 16-ти канального разряда с помощью ВУФ датчиков. 1 – фильтрованный датчик, фильтр - цапонлак 7.8 мкг/см<sup>2</sup>. 2,3,4 – открытые ВУФ датчики.

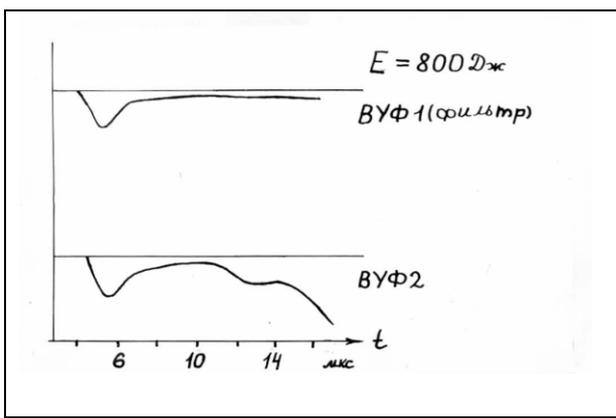


Рис.6. Многоканальный разряд в вакууме. Энергозапас батареи 800 Дж. ВУФ1 – ток фильтрованного фотодиода, фильтр цапонлак 7.8 мкг/см<sup>2</sup>. ВУФ2 – ток открытого фотодиода.

Длительность импульса излучения соответствует длительности первого периода тока, и составляет  $\tau_{1/2} \approx 1.5$  мкс. «Температура» плазмы, определенная методом фильтров составила  $T \sim 6 - 8$  эВ. Считая, что максимум спектрального распределения приходится на  $E \approx 3T$  можно оценить полное количество излученной энергии в телесный угол  $2\pi$ , которое составляет  $W \approx 1$  Дж. При измеренной скорости движения плазмы  $V_{пл.} \sim 2 \cdot 10^7$  см/сек и расстоянии от источника предыонизации до нагрузки  $L > 30$  см, можно использовать практически все излучение для предыонизации еще до подхода плазмы к нагрузке. С учетом того, что только часть излучения имеет энергию выше потенциала

ионизации ксенона (11 эВ), получаем количество образующихся ионов на погонный сантиметр в струе  $N_i \sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1}$ . При погонном числе атомов в струе  $N_a = 0.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-1}$  можно оценить степень ионизации, как  $N_i/N_a \sim 3 \cdot 10^{-5}$ . Ионизация происходит излучением с энергией 15 -30 эВ, которое при погонном числе атомов ксенона  $N_a = 0.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-1}$  полностью поглощается струей. Хотя энергия ВУФ излучения 16 - ти канальной системы не превышает 0.1 % энергии запасенной в батарее, она обеспечивает высокую степень однородности предыонизации цилиндрических нагрузок.

Таким образом, описанная выше система предыонизации позволяет получить степень ионизации  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  в струе ксенона с погонным числом атомов  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-1}$ . Указанная степень предыонизации достигается в конце первого полупериода тока разряда. При степени ионизации сформированной ксеноновой струи  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  ее проводимость определяется процессами столкновением электронов с нейтральными молекулами. Для того, чтобы в формировании проводимости преобладали соударения между заряженными частицами и среду можно было считать высокоионизованной, степень ионизации должна превышать 1% [25]. При использовании в качестве источника ВУФ излучения систему типа «флэшбод» степень ионизации можно увеличить приблизительно в 30 раз до 0.1%, без увеличения энергозапаса электрической батареи. Увеличение, дополнительно, энергетики конденсаторной батареи на порядок ( $\sim 10$  кДж) позволит получить степень ионизации уже на уровне 1% и, соответственно, среду с высокой плазменной проводимостью.

Роль токовой предыонизации на процесс сжатия и излучения многопроволочных сборок, составленных из тонких металлических проволочек, сводится к частичному или полному переходу проволочек из твердотельной фазы в плазменное состояние до прихода основного импульса тока. Эффективность предыонизации такой нагрузки сильноточных генераторов излучением малоэффективна, из-за микронных начальных размеров используемых проволочек. Поэтому была исследована зависимость излучательных потерь пинча, образующегося при сжатии многопроволочных сборок, от токовой предыонизации. Эффект предыонизации в этом случае может проявляться, как в увеличении доли начальной массы проволочек эффективно ускоряемой током генератора, так и в увеличении плотности пинча на стадии термализации плазмы и, возможно, получении более однородного плазменного образования.

На установке «Ангара - 5 - 1» была проведена серия экспериментов с многопроволочными алюминиевыми сборками (количество проволочек  $N = 8$ , начальный диаметр сборки 8 мм, погонная масса 144 мкг/см, высота сборки 15 мм). Для внешней многопроволочной сборки использован материал с невысокой температурой плавления

(Al), что позволяет избежать шунтирования проволочек плазмой паров адсорбированных газов и легких примесей на начальной стадии металлической проводимости. Длительность импульса излучения в квантах с энергией от 1 до 3 кэВ измерялась вакуумным ультрафиолетовым фотодиодом (ВУФ), а полный выход излучения с энергией квантов свыше 1 кэВ термометром с соответствующим фильтром. Токовая предыонизация проволочек сборки осуществлялась током одного из 8 - ми модулей установки, срабатывающего раньше остальных модулей на 110 – 130 нс.

При отсутствии токовой предыонизации, когда все 8 модулей установки срабатывали синхронно (среднеквадратичный разброс  $\sim 10$  нс), выход излучения в К - линиях многозарядных ионов алюминия составил величину  $\sim 7$  кДж. Длительность сигналов ВУФ излучения составляла 30 - 35 нс с крутым передним фронтом. В тех случаях, когда один из модулей срабатывал раньше остальных на время порядка 110 - 130 нс, были получены наибольшие выходы излучения для диапазона энергий квантов  $h\nu > 1$  кэВ (от 7.5 до 13.5 кДж). Таким образом, наличие токовой предыонизации с паузой тока приводит к заметному увеличению выхода излучения водородо - и гелиоподобных линий алюминия, хотя сжатия пинча происходит током меньшей амплитуды. Наиболее вероятное объяснение этого эффекта заключается в том, что к началу основного импульса тока материал проволочек частично перешел из твердотельного состояния в плазменное. В этом случае реализуется более однородное распределение плотности плазмы по длине проволочек, что уменьшает влияние начальной аксиальной неоднородности распределения плотности плазмы на развитие неустойчивости Рэля–Тейлора. Отметим, что в тех экспериментах, где наблюдалось существенное отставание одного из модулей по времени срабатывания, излучение из нагрузки практически отсутствовало. Результаты описанных экспериментов качественно согласуются с результатами расчетов [26], в которых исследовалось влияние разброса срабатывания отдельных модулей установки на эффективность передачи электрической энергии из передающих линий в лайнерную нагрузку.

## **Шестая глава.**

При сжатии цилиндрических многопроволочных сборок мегаамперными токами получена мощность мягкого рентгеновского излучения (МРИ) в несколько раз превышающая электрическую мощность сильноточных импульсных генераторов тераваттного диапазона мощности [27,28]. Весьма успешно Z – пинчи используются для

генерации излучения К – серий многозарядных ионов высокотемпературной плазмы с энергией квантов превышающей 1 кэВ [29,30].

К наиболее важным параметрам пинча, получаемого при сжатии многопроволочных цилиндрических сборок, относятся его излучательные характеристики (полный выход МРИ, мощность импульса излучения и спектр рентгеновской эмиссии). Эти характеристики, в свою очередь, определяются температурой и плотностью плазмы, размером излучающей области, степенью ионизации плазмы.

В главе приведены результаты измерений спектров излучения вольфрамовой плазмы Z - пинчей, образующихся при сжатии цилиндрических многопроволочных сборок током  $\sim 3$  МА с погонной массой 200 – 400 мкг/см и начальным диаметром 12 – 20 мм в экспериментах на сильноточной установке «Ангара-5-1». Зависимость интенсивности излучения от энергии квантов в интервале 50 – 900 эВ получена спектрографом с пропускающей решеткой и регистрацией излучения на рентгеновскую фотопленку УФ - 4. В интервале энергий квантов 1 – 3 кэВ спектр излучения был получен кристаллическим обзорным спектрографом. Для защиты пропускающей решетки от быстрых микрочастиц, возникающих при эрозии высоковольтных электродов, использован электромагнитный шторный затвор.

Показано, что основная доля энергии излучения вольфрамовой плазмы находится в интервале энергии квантов 80 – 300 эВ (рис 7).

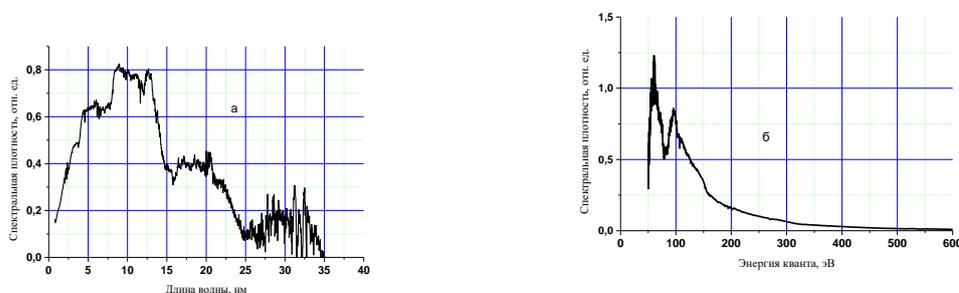


Рис.7. Спектр излучения вольфрамовой сборки: а – зависимость спектральной плотности излучения от длины волны; б – зависимость спектральной плотности излучения от энергии квантов. Ширина горизонтальной щели 700 мкм. Сборка – 80 проволочек, диаметром 6мкм, расположенных на диаметре 12 мм. Погонная масса сборки 440 мкг/см. Эксперимент № 4844.

Измерения спектральной интенсивности излучения с пространственным разрешением по радиусу пинча показали, что эффективный поперечный диаметр пинча не превышает 2 мм, что совпадает с независимыми измерениями токового радиуса пинча.

Проведено сравнение результатов измерений спектральной интенсивности излучения с расчётами, выполненными с использованием столкновительно-излучательной модели стационарной и однородной плазмы. Показано, что в рамках столкновительно-излучательной модели стационарной и однородной плазмы не удастся одновременно добиться совпадения формы расчетного спектра излучения с измеренным спектром, с получением в расчетах мощности излучательных потерь плазмы соответствующей результатам измерений. Если учесть, что спектр излучения измерен интегрально по времени и является наложением спектров плазмы с различными температурами, то совпадение расчетов с экспериментом будет удовлетворительным [31].

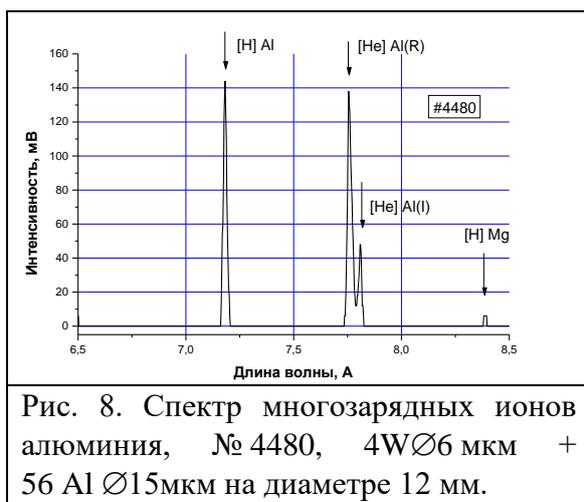
Спектроскопия пинчей, составленных из материалов с сильно различающимися атомными номерами (например, Al и W) позволяет определять параметры плазмы по спектру излучения элемента с относительно не высоким  $Z$ . Увеличивая долю элемента с большим  $Z$  в сборке, состоящей, в основном, из элемента с малым  $Z$ , можно существенно уменьшить электронную температуру и интенсивность излучения K - серий [H] и [He] ионов плазмы легкого элемента. Таким образом, используя элемент с высоким  $Z$ , можно за счёт снижения температуры регулировать “жесткость” спектра излучения.

Эксперименты с многопроволочными цилиндрическими лайнерами, составленными из материалов с сильно различающимися атомными номерами (Al и W) проводились на генераторе С -300 в ИАЭ им. И.В. Курчатова [32]. В работе [32] показано, что, при сжатии одиночной Al - W сборки, линейчатое излучение K – серии ионов алюминия практически отсутствует, если относительное количество W по массе в сборке превышает 50 %. В то же время, в экспериментах с двухкаскадными сборками из внешнего алюминиевого лайнера диаметром 12 мм ( $N = 30$  проволок диаметром 15 мкм), и внутреннего W лайнера диаметром 4 мм ( $N = 20$  проволок диаметром 6 мкм), спектр излучения пинча в области свыше 1 кэВ по интенсивности практически совпадал с интенсивностью спектра излучения одиночной внешней сборки из Al с той же погонной массой. Температура плазмы, определенная по непрерывному спектру излучения алюминия, составила  $\sim 400 - 500$  эВ. Однако, в экспериментах на установке С - 300 не были получены количественные соотношения по влиянию добавки вольфрама в сборку на излучательные характеристики пинча в целом и на изменение интенсивности спектра излучения алюминия в области свыше 1 кэВ.

В данной главе описаны эксперименты по изучению влияния небольшого количества вещества с высоким  $Z$  (вольфрам) на излучение пинча, образованного при сжатии многопроволочной сборки из материала с относительно невысоким  $Z$  (алюминий). Эксперименты проводились на цилиндрических сборках с фиксированными начальным

числом проволок ( $N = 60$ ), начальным диаметром (12 мм) и погонной массой (330 мкг/см). Добавка вольфрама в сборку проводилась заменой части алюминиевых проволок на вольфрамовые, с сохранением симметрии расположения последних. Проведено сравнение излучения таких смешанных Al - W многопроволочных лайнеров с излучением пинча, получаемого при сжатии W лайнеров, имеющих те же параметры (начальный диаметр, погонная масса, число проволок). Результаты экспериментов по сжатию Al - W сборок использованы при исследовании динамики сжатия и излучения пинча, образующегося при сжатии двухкаскадных сборок, с близкими значениями масс каскадов и отношением радиусов равным 2. При этом внешняя сборка состояла из алюминиевых проволок, а внутренняя сборка из вольфрамовых [33].

В случае использования одинарных многопроволочных сборок, состоящих из Al и W, даже 7 % добавка вольфрама (по массе), снижает интенсивность линейчатого излучения [H] и [He] ионов Al на порядок. При этом длительность импульса излучения сокращается. Спектрограмма снятая кристаллическим спектрографом в эксперименте, где масса вольфрама в сборке составляет 7%, приведена на рис. 8.



Падение интенсивности линейчатого излучения Al при добавке вольфрама в сборку связано с уменьшением температуры плазмы с 560 эВ для чисто алюминиевой сборки до 430 эВ (массовая доля вольфрама в сборке 7%). С увеличением доли W в сборке, при сохранении её погонной массы, электронная плотность растёт. Вместе с тем, температура зависит от доли вольфрама немонотонно. При массовой доле вольфрама в сборке свыше 14%, линейчатое излучение Al происходит лишь из небольших, плотных и сильно нагретых областей с электронной температурой порядка 700 эВ [33].

На рис.9 приведена зависимость выхода линейчатого излучения [H] и [He] ионов алюминия от процентного содержания вольфрама в сборке.

Следует отметить, что на одинарных сборках из вольфрама с такими же параметрами (диаметр сборки 12 мм, диаметр проволочек 6 мкм,  $N = 60$ , высота сборки 15 мм, погонная масса  $\sim 330$  мкг/см) получены значения длительности импульса МРИ от 9 до 11нс. Полные выходы излучения при сжатии чисто вольфрамовыхборок практически такие же, как и при сжатии Al - Wборок с теми же суммарными погонными массами и содержанием вольфрама в сборке (по массе) 25-30 %. Таким образом, при 25-30 % содержании вольфрама в сборке достигается практически такая же мощность излучения, как и при сжатииборок из вольфрама с теми же удельными параметрами.

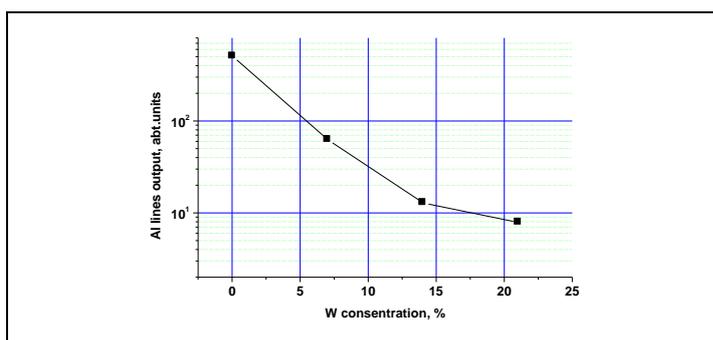


Рис.9 Зависимость выхода линейчатого излучения многозарядных ионов Al от массового содержания вольфрама в одинарной Al - W сборке.

При электродинамическом ускорении плазмы многопроволочныхборок основная кинетическая энергия плазмы связана с движением ионов. Поэтому при термализации плазмы вблизи оси сборки в начальный момент температура ионов существенно превышает электронную температуру. При термализации Al - Wборок, уменьшение времени передачи энергии от ионов к электронам обеспечивается ионами Al, поскольку они имеют меньшую массу и более высокую концентрацию, даже при массовой доли вольфрама в сборке  $\sim 50$  %. Указанное обстоятельство имеет существенное значение для экспериментов, в которых необходима высокая скорость передачи энергии от ионов к электронам. К таким экспериментам относиться генерация излучения в ударной волне в схеме динамического «хольраума» при столкновении внешней ускоренной токовой оболочки с пенной оболочкой низкой плотности, изготовленной из агар-агара с добавлением мелкодисперсного порошка вольфрама или молибдена. Так как масса добавки мелкодисперсного порошка вольфрама во внутренний пенный цилиндр из агар-агара (углерод, кислород) не превышает массу пены, то существенным становится излучательная способность плазмы состоящей по массе в основном из легких элементов с добавками тяжелых элементов. Существенно, что при этом одновременно повышается прозрачность плазмы внутреннего цилиндра к собственному излучению.

Степень сжатия плазмы пинча, его температура, полный выход излучения и мощность излучения существенно зависят от массовой доли вольфрама в сборке. Относительно небольшая доля вольфрамовых проволочек в сборке из алюминиевых проволочек, приводит к созданию более компактного пинча и увеличению, как мощности, так и полного выхода мягкого рентгеновского излучения.

Экспериментально исследованы переходные режимы излучения (переход от каскадной нагрузки к композитному  $Z$  –пинчу) в условиях, когда атомный номер материала внутренней сборки ( $W$ ) существенно превышал атомный номер материала внешней сборки ( $Al$ ), а диаметр внутренней многопроволочной сборки  $W$  (4мм) был порядка диаметра пинча (2.5-3мм), получаемого при сжатии одиночной внешней многопроволочной сборки  $Al$  диаметром 12мм. Погонные массыборок в эксперименте были сравнимы (330-350мкг/см).

Показано, что внутренняя  $W$  сборка механически практически не взаимодействует с оболочкой внешней сборки, как и в работе [32], но играет существенную роль в динамике сжатия. По сравнению со сжатием одиночной многопроволочной сборки увеличен выход мягкого рентгеновского излучения в 1.5 раза (с 50 до 75 кДж) с сокращением длительности мягкого рентгеновского излучения более чем в 2 раза (с 20 до 7-10нс). Таким образом, в переходном режиме сжатия от каскадной сборки к композитному  $Z$  – пинчу, внешняя сборка из материала с относительно невысоким атомным номером ( $Al$ ) обеспечивает высокую плотность потока кинетической энергии ( $\sim 5$  ТВт/см<sup>2</sup>), а внутренняя сборка малого диаметра из материала с высоким атомным номером ( $W$ ) высокую излучательную способность [33].

Наличие достаточно интенсивного линейчатого излучения многозарядных ионов алюминия свидетельствует о том, что это излучение возникает в начале сжатия пинча, на переднем фронте импульса мягкого рентгеновского излучения. Существует небольшая задержка по времени прихода внутренней вольфрамовой оболочки на ось, по сравнению с началом термализации алюминиевой плазмы от внешней сборки. В этом случае на переднем фронте излучения пинча на излучение алюминия практически не влияет плазма вольфрама. Этот факт подтверждается и тем, что измеренная электронная плотность близка к электронной плотности, полученной при сжатии чисто алюминиевой сборки.

## **Седьмая глава.**

В главе приведены результаты измерений анизотропии энергетических потерь сильноточных многопроволочных  $Z$  – пинчей, проведенных на установке “Ангара - 5 -1”

при токах в нагрузку до 4 МА. Измерения энергетических потерь проводились в направлениях перпендикулярно и вдоль оси пинча, с направления анодного электрода. В качестве основных методик измерения использовались термопарные калориметры без временного разрешения, наносекундные вакуумные рентгеновские фотодиоды (ВРД) за различными фильтрами и фольговый радиационный калориметр с временным разрешением 2 мкс. С учетом расстояния ( $\sim 2$  м) от пинча до радиационного фольгового калориметра его временное разрешение позволяло проводить измерения полного выхода излучения без вклада энергии переносимой плазменными потоками.

Для различных геометрий лайнерных сборок и геометрий подводящих высоковольтных электродов проведены измерения азимутальной анизотропии энергетических потерь. Наличие сильной начальной азимутальной неоднородности распределения массы проволочек (секционные сборки), а также использование конусных электродов вместо плоских не приводят к заметной азимутальной неоднородности полных энергетических потерь [34].

Для геометрии цилиндрических многопроволочных сборок проведено сравнение энергетических потерь в боковом направлении и по направлению оси пинча. По данным измерений ВРД детекторами и радиационным калориметром, выход излучения в единицу телесного угла в направлении вдоль оси пинча в 2-3 меньше, чем выход излучения в направлении перпендикулярно его оси. В осевом направлении плотность потока энергии разлетающейся плазмы превышает плотность потока энергии излучения в 2 - 3 раза. Измеренный выход излучения в направлении перпендикулярно оси пинча составил от 40-60 кДж/4 $\pi$  за импульс (табл.1), а в направлении вдоль оси от 10 до 25 Дж/4 $\pi$  (табл.2). В пределах погрешности измерений показания ВРД методики и болометра хорошо соответствуют друг другу (табл.1).

Таблица 1. Данные по интегральному выходу излучения измеренного различными методиками. Измерения под углом  $90^0$  к оси пинча

№ Выстрела	Термопарный калориметр, кДж	Радиационный калориметр, кДж	ВРД, кДж
5048	77	52	61
5052	58	25	41
5059	32	19	23
5060	73	54	50

Таблица 2. Данные по интегральному выходу излучения измеренного радиационным калориметром и ВРД методикой. Измерения под углом  $7^{\circ}$  к оси пинча (результаты измерений в узкий телесный угол формально пересчитаны на полный телесный угол).

Номер выстрела	Энергия излучения, кДж (радиационный калориметр)	Энергия излучения, кДж (ВРД)
5269	26	36
5270	10	13
5276	51	41
5280	51	53

Проведенные измерения радиационным калориметром показали, что плотность потоков энергии разлетающейся плазмы в направлении перпендикулярном оси пинча не превышает 5 % от плотности потока энергии мягкого рентгеновского излучения (рис.10). В осевом направлении плотность потоков энергии разлетающейся плазмы пинча сравнимы или превышают плотность потока энергии мягкого рентгеновского излучения (рис.11).

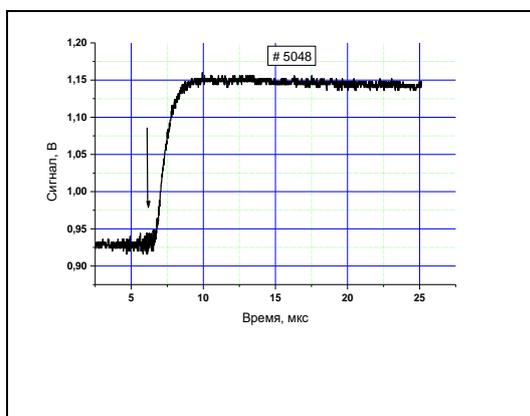


Рис.10 Сигнал радиационного калориметра. Направление измерений – сбоку по отношению к оси лайнера. Нагрузка 40 W диаметром 6 мкм, 220 мкг/см, диаметр сборки 12 мм. Расстояние от пинча до чувствительного элемента болометра 2.24 м. Стрелка указывает на момент излучения пинча.

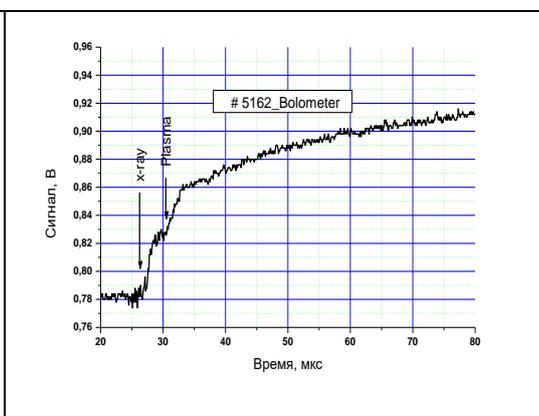


Рис.11. Сигнал радиационного калориметра при измерениях по направлению вдоль оси. Нагрузка 30 W проволочек диаметром 6 мкм на диаметре 20 мм. На аноде коллиматор диаметром 5 мм. Расстояние от пинча до фольги болометра 2.24 м. Стрелка указывает на момент излучения пинча.

Как следует из структуры изображения интегральной по времени камеры-обскуры и временных профилей радиальных и аксиальных ВРД, излучение центральной, более высокотемпературной части пинча в радиальном направлении частично заперто

окружающей её относительно малоплотной плазмой “гало”. В аксиальном направлении спектр излучения можно представить как наложение излучения центральной плотной высокотемпературной части пинча и излучения менее плотной и более холодной плазмы периферии.

### **Восьмая глава.**

В главе приведены результаты экспериментов по сжатию каскадных многопроволочных вольфрамовыхборок, имеющих уменьшенную индуктивность на конечной стадии образования пинча [35]. В экспериментах получена высокая мощность мягкого рентгеновского излучения  $\sim 10-11$  ТВт с выходом рентгеновского излучения порядка 130-140 кДж с пинча длиной 1 см. Удельная и полная мощности излучения пинча, полученные при сжатии каскадной нагрузки с уменьшенной индуктивностью ( $\sim 10-11$  ТВт/см, 10-11 ТВт), превышают удельную и полную мощности излучения пинча, полученные при сжатии «стандартной сборки» длиной 16 мм ( $\sim 5$  ТВт/см, 7.6ТВт) с теми же параметрами [36]. Динамика сжатия такой нагрузки свидетельствует об увеличении роли во взаимодействии каскадов магнитного поля тока, протекающего по внутреннему каскаду. Большая длительность импульса мягкого рентгеновского излучения ( $\sim 15-18$  нс) связана, скорее всего, с большей величиной тока проникающего на внутреннюю укороченную сборку по сравнению с током, проникающим на внутреннюю не укороченную сборку. В результате увеличивается задержка сжатия внешней сборки каскадной нагрузки относительно сжатия внутренней сборки.

Предложен вариант использования взаимодействия оболочек каскадной сборки через магнитное поле тока внутреннего каскада применительно к схеме статического «хольраума» для непрямого облучения сферических мишеней [36]. В схеме возможен захват части тока внутренней сборкой, удерживающей статический «хольраум». В этом случае, при взаимодействии каскадов практически всю кинетическую энергию внешней ускоренной оболочки можно использовать для генерации излучения в «хольрауме» двумя образующимися приэлектродными пинчами.

**В заключении** приведены основные защищаемые положения.

## Ссылки:

- [1]. J.Lindl // Phys.Plasmas 2, 1995, 3933
- [2]. Ананьев С.А., Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Данько С.А., Жужунашвили А.И., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С., Королев В.Д., Мижирицкий В.И., Смирнов В.П., Устроенов Г.И., Черненко А.С., Шашков А.Ю., Ткаченко С.И. Моделирование сильноточных линий с магнитной самоизоляцией в рамках концептуального проекта импульсного термоядерного реактора на z-пинчах. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез т.8, вып. 4, С. 3-24.
- [3]. Progress towards ignition on the National Ignition Facility, M.J. Edwards, P.K. Patel, J.D. Lindl, L.J. Atherton et al., Physics of Plasmas, **20**, 070501 (2013).
- [4]. Smirnov V.P., 1991, Plasma Phys. Control Fusion, v. 33, p. 1697.
- [5]. Olson R.E. et al., 1999, Fusion Technol., V.35, p.260.
- [6]. Бобашев С.В., Волков Г.С., Голубев А.В., Зайцев В.И., Царфин В.Я., Шмаенок Л.А., Абсолютные измерения импульсных потоков характеристического рентгеновского излучения и калибровка детекторов в области энергий фотонов  $E \geq 1$ кэВ. Письма ЖТФ, т.14, вып.7, с. 634-636, 1988.
- [7]. Волков Г.С., Заживихин В.В., Зайцев В.И., Мишенский В.О. "Приборы с зарядовой связью как позиционно-чувствительные детекторы рентгеновского излучения". ПТЭ, N3, с.119-127, 1996
- [8]. Г.С. Волков, Н.И. Лахтюшко, Терентьев О.В., Радиационный болометр из фольги для измерения энергетических потерь быстрых Z – пинчей., ПТЭ, №5, с.115-120, 2010 г.
- [9]. Степанов А.Е., Волков Г.С., Зайцев В.И., Макаров К.Н. Сатов Ю.А., Рерих В.К., Динамика температуры в плазме с многозарядными ионами, создаваемой импульсом CO<sub>2</sub>-лазера, ПЖТФ, т. 29, в.5. с.36-42, 2003
- [10]. В.И. Зайцев, Г.С. Волков, Источник селективного мягкого рентгеновского излучения на основе z-пинча., ПТЭ, №4, с.85-88, 2004.
- [11]. F.J.Wessel, B.Etlicher, P.Choi. Demonstration of enhanced stability and energy transfer in an Aluminum plasma embedded fibre Z-pinch. Phys. Rev. Letters, Feb. 1992.
- [12]. B.Etlicher, A.S.Chuvatin, L.Veron, F.J.Wessel, C.Rouille, S.Attelan, P.Choi., Different Stabilization Processes in Z-Pinch Plasma Experimental Approach., Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on High-Power Particle Beams, Washington, DC, v.3, p.2008-2013, 1992.
- [13]. B.Etlicher, A.S.Chuvatin, P.Choi, L.Frescaline, L.Aranchuk et al. SYRINX-A RESEARCH PROGRAM FOR THE PULSED POWER RADIATION FACILITY., Proceedings

of the 11<sup>th</sup> International Conference on High-Power Particle Beams, Prague, Czech Republic, June 10-14, v.1, p. 276-283, 1996.

[14]. Alexander Chuvatin, Peter Choi, Carmen Dumitrescu, Bernard Etlicher, S. Semushin et al. Spatial and Temporal Evolution of High-Energy Density Plasmas in the Composite Pinch on GIT-4 Generator. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, vol.25, N2, p.196-204, april 1997.

[15]. Волков Г.С., Данько С.А., Зентер П, Зайцев В.И., Мишенский В.О., Федулов М.В., Чуватин А. и Этлишер Б., Спектроскопия композитных Z - пинчей на установке Ангара-5-1, Физика плазмы, т.25, №1, с.38-45, 1999.

[16]. Браницкий А.В., Данько С.А., Герусов А.В., Грабовский Е.В., Зайцев В.И., Захаров С.В., Зурин М.В. и др., Проникновение азимутального магнитного потока внутрь неустойчивого лайнера Физика плазмы, т.22, N4, с.307-317, 1996.

[17]. Альбиков З.А., Велихов Е.П., Веретенников А.И. и др., Импульсный термоядерный комплекс «Ангара-5-1», Атомная энергия, т.68, в.1, с.26-35, 1990.

[18]. В.И. Дербилов, С.Ф. Медовщиков, С.Л. Недосеев, Е.Г. Утюгов, А.К. Рослик, В.Н. Стрекаловский, В.Т. Тимошин, Препринт ИАЭ-5157/7, М., 1990.

[19]. В. В. Александров, Е. А. Болховитинов, Г. С. Волков, Е. В. Грабовский, А. Н. Грицук, С. Ф. Медовщиков, Г. М. Олейник, А. А. Рупасов, И. Н. Фролов, Динамика сжатия мегаамперного многопроволочного Z -пинча с внутренней низкоплотной пенной оболочкой на установке “Ангара-5-1”, Физика плазмы, 2016, том 42, № 12, с. 1046–1056.

[20]. Г.С. Волков, Е.В. Грабовский, К.Н. Митрофанов, Г.М. Олейник, Физика плазмы, т.30, №2, с.115-128, 2004.

[21]. В.Д. Вихарев, С.В. Захаров, В.П. Смирнов и др., Формирование однородных плазменных оболочек в сильнотоочных разрядах на установке «Ангара-5-1», Препринт ИАЭ-5078/6, Москва 1990.

[22]. J.R. Woodworth and P.F. McKay, Surface discharges as intense photon sources in extreme ultraviolet, J. Appl. Phys. 58(9) 3364-7, 1985.

[23]. R.E. Beverly III, Electrical, gasdynamic, and radiative properties of planar surface discharges, J. Appl. Phys. 60 (1), 104-24, 1986.

[24]. Камруков А.С., Козлов Н.П., Протасов Ю.С., Шашковский С.Г., Высокояркостные источники теплового ВУФ-излучения на основе плазмодинамических МПК-разрядов в газах. ТВТ. 1989. Т. 27. N 1. С. 152-70.

[25]. Г. Альфвен, К.-Г. Космическая электродинамика, Издательство «МИР», Москва , 1967 с. 167.

- [26]. Смирнов В.П., Булан В.В., Ямпольский И.Р.// Эффективность передачи энергии в лайнер для установок с формирующими линиями, Отчет 10/НИР-2625-86, ИАЭ им. И.В. Курчатова, Москва, 1986г.
- [27]. R.V. Spielman, C. Deeney, Chandler et al. Tungsten wire-array Z-pinch experiments at 200 TW and 2 MJ, *Physics of plasma*, v.5, No. 5, pp. 2105-2111, 1998.
- [28]. R.V. Spielman, C. Deeney, M.R. Douglas et al. *Wire- array z pinches as intense x-ray sources for inertial confinement fusion.*, *Plasma Phys. Control. Fusion*, v.42, B157-B164, 2000.
- [29]. H.M. Sze, S. Levine, J.B. Banister et al. “K- Shell Radiation from Nickel Wire Array at 18MA”, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, Vol.30, N02, pp. 512-516, April 2002.
- [30]. C. Deeney, C.A. Coverdale, M.R.Douglas, T.J. Nash et al., “Titanium K – shell X-ray production from high velocity wire array implosion on 20MA Z accelerator.”, *Phys. Plasma*, vol.6, pp. 2081-2088, 1999.
- [31]. Е.А. Болховитинов, Г.С. Волков, И.Ю. Вичев, Е.В. Грабовский, А.Н. Грицук, В.И. Зайцев, В.Г. Новиков, Г.М. Олейник, А.А. Рупасов, Е.В. Светлов, А.С. Шиканов, М.В. Федулов., Исследования спектров излучения быстрых Z – пинчей, образующихся при сжатии многопроволочных сборок на установке «Ангара-5-1», *Физика плазмы*, т.38, № 10, с.894-902, 2012 г.
- [32]. Yury G. Kalinin, Li Zhenghong, Hua Xinshehg et al., *Proc. of 15<sup>th</sup> Int.Conf. on High-Power Particle Beams BEAMS’2004 Saint-Petersburg, Russia*, p.910-913.
- [33]. Г.С. Волков, В.И. Зайцев, Е.В. Грабовский, М.В. Федулов, В.В. Александров, Н.И. Лахтюшко, Исследование излучательной способности композитных по атомному составу Z – пинчей, *Физика плазмы*, том.36, №2, стр. 211-220, 2010 г.
- [34]. В.В. Александров, Г.С. Волков, Е.В. Грабовский, А.Н. Грицук, Н.И. Лахтюшко, С.Ф. Медовщиков, Г.М. Олейник, Е.В. Светлов, Исследование анизотропии энергетических потерь сильноточного Z - пинча, получаемого при сжатии цилиндрических многопроволочных вольфрамовых сборок, *Физика плазмы*, том. 40, №2, с.160-171, 2014 г.
- [35]. Г. С. Волков, Е. В. Грабовский, А. Н. Грицук, Г.Л. Комаров, А. А. Рупасов, И. Н. Фролов, М.В. Хилько, Увеличение удельной концентрации энергии плазмы сильноточных Z – пинчей за счет использования переходных режимов сжатия, *Физика плазмы*, 2022, том 48, № 4, с. 317–327.
- [36]. G. S. Volkov, E. V. Grabovskii, A. N. Gritsuk, K. N. Mitrofanov, A. A. Rupasov, and I. N. Frolov, Increase in Power of Radiation and Specific Concentration of Energy of Plasma of the High-Current Z-Pinches due to Compression of the Cascade Wire Arrays Interacting via Magnetic Field, *Plasma Physics Reports*, 2024, Vol. 50, No. 5, pp. 573-587.

## Список публикаций автора по теме диссертационной работы.

1. S.V. Bobashev, A.V. Golubev, Yu.Ya. Platonov, N.N. Salashenko, L.A. Shmaenok, G.S. Volkov and V.L. Zaitsev, Absolute Photometry of Pulsed Intense Fluxes of Ultrasoft X-Ray Radiation. *Physica Scripta*, vol.43, p.356-367, 1991.
2. Ахсахалян А.Д., Бобашев С.В., Волков Г.С., Голубев А.В., Зайцев В.И., Забродин И.Г., Краснов А.К., Олейник Г. М., Шмаенок Л.А. Измерение спектра излучения плазмы с помощью многослойных рентгеновских зеркал. *Физика плазмы*, т.18, вып.4, с. 509-513, 1992.
3. Волков Г.С., Гигиберия В.П., Комаров С.А., Корнило В.А., Тулупов М.В. Исследование параметров ксеноновых сверхзвуковых струй, получаемых с помощью электромагнитного клапана. *ЖТФ*, т.62, в.11, с.172-175, 1992.
4. Волков Г.С., Гигиберия В.П., Коваленко А.В. и др. "Экспериментальное и расчетное исследование излучательных характеристик плотной высокотемпературной плазмы многозарядных ионов получаемой при ускорении лайнеров на установке "Ангара-5-1" . *ЖЭТФ*, т.101, вып.2, с.479-492, 1992.
5. Волков Г.С., Утюгов Е.Г., Фролов И.Н. "О степени компактности ускорения быстрых лайнеров на установке "Ангара-5-1" ". *Физика плазмы*, т.19, в.9, с.1002-1008, 1993.
6. Волков Г.С., Заживихин В.В., Зайцев В.И., Мишенский В.О. "Приборы с зарядовой связью как позиционно-чувствительные детекторы рентгеновского излучения". *ПТЭ*, N3, с.119-127, 1996.
7. Волков Г.С., Зайцев В.И., Лангли С., Мишенский В.О., Папазян Ю.В., Федулов М.В., Смирнов В.П., Этлишер Б., "Спектрограф мягкого рентгеновского излучения с регистрацией на П.З.С." *ПТЭ*, N1, с.125-130, 1997.
8. Волков Г.С., Данько С.А., Зентер П, Зайцев В.И., Мишенский В.О., Федулов М.В., Чуватин А. и Этлишер Б., Спектроскопия композитных Z - пинчей на установке Ангара-5-1, *Физика плазмы*, т.25, №1, с.38-45, 1999.
9. В.В. Александров, А.В. Браницкий, Г.С. Волков, Е.В. Грабовский, М.В. Зурин, С.Л. Недосеев, Г.М. Олейник, А.А. Самохин, П.В. Сасоров, В.П. Смирнов, М.В. Федулов, И.Н. Фролов, Динамика гетерогенного лайнера с затянутым плазмообразованием. *Физика плазмы*, т.27, №2, с.99-120, 2001.
10. Prolonged plasma production at current-driven implosion of wire arrays on Angara-5-1 facility, V.V. Alexandrov, I.N. Frolov, M.V. Fedulov, E.V. Grabovsky, K.N. Mitrofanov, S.L. Nedoseev, G.M. Oleinik, I.Yu. Porofeev, A.A. Samokhin, P.V. Sasorov, V.P. Smirnov, G.S.

- Volkov, M.M. Zurin, and G.G. Zukakischvili, IEEE Transactions on PLASMA SCIENCE, V.30, number 2, p.559-566, april 2002.
11. A.E. Stepanov, G.S. Volkov, V.I. Zaitsev, K.N. Makarov, Yu.A. Satov and V.C. Roerich. Measurements of temperature evolution for the laser ion source plasma, Laser and Particle Beams , v.20, pp.613-615, 2002.
12. Степанов А.Е., Волков Г.С., Зайцев В.И., Макаров К.Н. Сатов Ю.А., Рерих В.К., Динамика температуры в плазме с многозарядными ионами, создаваемой импульсом CO<sub>2</sub>-лазера, ПЖТФ, т. 29, в.5. с.36-42, 2003
13. В.И. Зайцев, Г.С. Волков, Источник селективного мягкого рентгеновского излучения на основе z-пинча., ПТЭ, №4, с.85-88, 2004.
14. Г.С. Волков, Е.В. Грабовский, К.Н. Митрофанов, Г.М. Олейник Рентгеновское зондирование приосевой области плазмы многопроволочного лайнера на установке АНГАРА –5-1, Физика плазмы, с.115-128, том.30, №2, 2004.
15. Г.С. Волков, Е.В. Грабовский, В.И. Зайцев, Г.Г. Зукакишвили, М.В. Зурин, К.Н. Митрофанов, С.Л. Недосеев, Г.М. Олейник, И.Ю. Порофеев, В.П. Смирнов, И.Н. Фролов, Диагностика плазмы на установке “АНГАРА-5-1”., ПТЭ, №2, с. 74-81, 2004.
16. Г.С. Волков, Е.В. Грабовский, М.В. Зурин, К.Н. Митрофанов, Г.М. Олейник, И.Ю. Порофеев, Методика рентгеновского зондирования излучением X – пинча плазмы многопроволочных сжимающихся лайнеров на установке “АНГАРА-5-1”., ПТЭ, №3, с. 110-124, 2004.
17. G.S. Volkov, V.I. Zaitsev, N.I. Lakhtyushko and M.V. Fedulov Z – pinch X – ray polarisation research, Plasma Devices and Operations, Vol.13, No.2, pp.129 – 133, June 2005.
18. G.S. Volkov, V.I. Zaitsev, A.V. Kartashov, N.I. Lakhtyushko, A.A. Rupasov and A.S. Shikanov X – ray radiation of Z – pinch source, Plasma Devices and Operations, Vol.13, No.2, pp.123 – 128, June 2005.
19. High-current Z –pinch disintegration and the problem of peripheral equipment protection. V.I. Zaitsev, Yu. V. Andrianov, G.S. Volkov, Ye.V. Grabovsky, N.L. Lakhtyushko, Plasma Devices and Operations, Vol.16, No 1, pp.61 – 66, March 2008.
20. В.И. Зайцев, Г.С. Волков, И.А. Барыков, Е.В. Грабовский, В.В. Александров, А.С. Болдырев, В.А. Гасилов, «Точечный» источник мягкого рентгеновского излучения на основе газового пинча, Письма в ЖЭТФ, том.88, вып.9, с.673-676, 2008.
21. В.И. Зайцев, Г.С. Волков, А.В. Карташов, Н.И. Лахтюшко, Коллективное ускорение ионов при распаде сильноточного Z – пинча, Физика плазмы, т. 34, № 3, с. 195, 2008.

22. Г.С. Волков, В.И. Зайцев, К.Н. Макаров, А.П. Напартович, В.К.Рерих, Ю.Б. Смаковский, А.Е. Степанов, В.Е. Черковец, А.А. Рупасов, Ю.А. Сатов, Исследование генерации EUV – излучения ( $\lambda = 13.5\text{нм}$ ) ионами Sn в  $\text{CO}_2$  –лазерной плазме., Физика плазмы, том.36, №2, с. 145-158, 2010 г.
23. Г.С. Волков, В.И. Зайцев, Е.В. Грабовский, М.В. Федулов, В.В. Александров, Н.И. Лахтюшко, Исследование излучательной способности композитных по атомному составу Z – пинчей, Физика плазмы, том.36, №2, стр. 211-220, 2010 г.
24. Г.С. Волков, Н.И. Лахтюшко, Терентьев О.В., Радиационный болометр из фольги для измерения энергетических потерь быстрых Z – пинчей., ПТЭ, №5, с.115-120, 2010 г.
25. Е.А. Болховитинов, Г.С. Волков, И.Ю. Вичев, Е.В. Грабовский, А.Н. Грицук, В.И. Зайцев, В.Г. Новиков, Г.М. Олейник, А.А. Рупасов, Е.В. Светлов, А.С. Шиканов, М.В. Федулов., Исследования спектров излучения быстрых Z – пинчей, образующихся при сжатии многопроволочныхборок на установке «Ангара-5-1», Физика плазмы, т.38, № 10, с.894-902, 2012 г.
26. В.В. Александров, Г.С. Волков, Е.В. Грабовский, А.Н. Грицук, Н.И. Лахтюшко, С.Ф. Медовщиков, Г.М. Олейник, Е.В. Светлов, Исследование анизотропии энергетических потерь сильноточного Z - пинча, получаемого при сжатии цилиндрических многопроволочных вольфрамовыхборок, Физика плазмы, том. 40, №2, с.160-171, 2014 г.
27. В. В. Александров, Е. А. Болховитинов, Г. С. Волков, Е. В. Грабовский, А. Н. Грицук, С. Ф. Медовщиков, Г. М. Олейник, А. А. Рупасов, И. Н. Фролов, Динамика сжатия мегаамперного многопроволочного Z -пинча с внутренней низкоплотной пенной оболочкой на установке “Ангара-5-1”, Физика плазмы, 2016, том 42, № 12, с. 1046–1056.
28. Г. С. Волков, Е. В. Грабовский, А. Н. Грицук, Г.Л. Комаров, А. А. Рупасов, И. Н. Фролов, М.В. Хилько, Увеличение удельной концентрации энергии плазмы сильноточных Z – пинчей за счет использования переходных режимов сжатия, Физика плазмы, 2022, том 48, № 4, с. 317–327.
29. G. S. Volkov, E. V. Grabovskii, A. N. Gritsuk, K. N. Mitrofanov, A. A. Rupasov, and I. N. Frolov, Increase in Power of Radiation and Specific Concentration of Energy of Plasma of the High-Current Z-Pinches due to Compression of the Cascade Wire Arrays Interacting via Magnetic Field, Plasma Physics Reports, 2024, Vol. 50, No. 5, pp. 573-587.