

На правах рукописи



ДЖАНГОБЕГОВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЛАЙНЕРОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
МОЩНОГО ИСТОЧНИКА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ Z-ПИНЧА

Специальность: 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2015 г.

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

Научный руководитель:	кандидат технических наук Олейник Георгий Михайлович начальник лаборатории физики сжимающейся плазмы отделения физики токонесущей плазмы ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук Калинин Юрий Григорьевич начальник отдела источников излучения НИЦ «Курчатовский институт» доктор физико-математических наук Шевелько Александр Петрович ведущий научный сотрудник отдела спектроскопии Физического института имени П.Н. Лебедева РАН
Ведущая организация:	Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

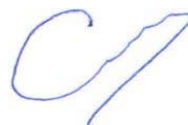
Защита состоится 22 апреля 2015 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, тел. +7(495)788-56-99.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.130.05

доктор физико-математических наук



Р.С.Стариков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Токовая имплозия многопроволочных сборок (лайнеров) с применением сверхмощных генераторов позволяет в режиме Z-пинча получать плотную высокотемпературную плазму многозарядных ионов и генерировать мягкое рентгеновское излучение (МРИ) высокой интенсивности, применимое для задач физики высоких плотностей энергии и инерционного термоядерного синтеза (ИТС). На настоящий момент времени мощности излучения, достигаемого на крупнейшей установке ZR с током до 26 МА, оказывается недостаточно для зажигания термоядерной мишени. Согласно расчетам, необходимо, чтобы величина энергетической экспозиции мишени составляла около $2,5 \text{ МДж/см}^2$, в то время как лучший результат, полученный в экспериментах по воздействию на мишень излучением сжимающегося лайнера – 1,7-миллиметровой сферической мишенью была поглощена энергия 20 кДж.

Один из способов получения мощного рентгеновского излучения с параметрами, необходимыми для поджига термоядерной мишени – создание установок с разрядным током около 60 МА и длительностью импульса $\sim 100 \text{ нс}$. Однако для достижения требуемой пиковой мощности МРИ, будет необходимо применение плазмообразующих нагрузок, время сжатия которых согласовывалось бы с импульсом установки. С другой стороны, оптическая толщина пинча не должна критически влиять на время выхода излучения, что, вероятно, потребует использования нагрузок, составленных из веществ с малым Z или смешанных сборок из веществ, как с малым, так и большим Z.

Другой способ увеличения потока мощности излучения на мишень заключается в переходе от цилиндрической к сферической имплозии. Согласно расчетам, при сжатии так называемого квазисферического лайнера вместо цилиндрического в схеме «двойной лайнер», возможно увеличение потока мощности на мишень в 4–5 раз. При этом для осуществления

компактной сферически симметричной имплозии необходимо, чтобы квазисферический лайнер обладал определенным пространственным распределением массы по высоте. К настоящему моменту единственной реализованной на практике технологией создания квазисферических нагрузок с профилированной массой является термическое вакуумное напыление металла на отдельные участки цилиндрического проволочного лайнера с последующим электростатическим растягиванием проволок по поверхности сферы. Изготовленные таким образом квазисферические проволочные лайнеры (КПЛ) оказываются состоящими из двух веществ с разной скоростью плазмообразования, что может оказывать негативное влияние на динамику их токового сжатия и, как следствие, параметры финального импульса МРИ.

Создание мощного источника МРИ для осуществления ИТС неизбежно связано с оптимизацией плазмообразующих нагрузок. С точки зрения подбора веществ, из которых будет состоять лайнерная сборка, интерес представляют исследования имплозии различных по составу лайнеров. На установках мегаамперного класса обычно исследуется динамика сжатия, а изучению начальной стадии, во время которой происходит пробой проволок лайнера, уделяется мало внимания. Однако, от величины энергии, вложенной в проволоку до пробоя, зависят дальнейшая динамика сжатия лайнера и параметры финального импульса МРИ. В данной связи исследование начальной стадии токовой имплозии (стадии инициации) цилиндрическихборок, составленных из проволок и капроновых волокон с напыленным на поверхность металлом, представляет особый интерес с точки зрения подбора веществ для создания перспективных плазмообразующих нагрузок смешанного состава, в том числе КПЛ. В свою очередь, для изучения динамики сферической имплозии необходимо иметь в распоряжении однородные по составу КПЛ с заданным пространственным распределением линейной массы вдоль высоты проволок.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель работы заключалась в экспериментальном исследовании вложения электрической энергии генератора Ангара-5-1 в проволочные сборки различных типов на начальной стадии протекания тока для оптимизации многопроволочныхборок, используемых для генерации мощных импульсов МРИ. Также ставилась задача разработать методику формирования заданного профиля линейной массы у цилиндрических лайнеров из вольфрамовых проволок с целью дальнейшего создания на их основе КПЛ с профилированной массой.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие задачи:

- создание стенда для экспериментов по профилированию линейной массы вольфрамовых проволочных лайнеров с помощью катодного распыления в газовом разряде;
- подбор конфигурации электрода и параметров разряда (давление рабочего газа, ток, напряжение) для формирования у вольфрамового проволочного лайнера заданного распределения линейной массы;
- создание методики контроля диаметра проволок лайнера после распыления в разряде;
- создание методики измерения напряжения с наносекундным разрешением вблизи излучающей нагрузки на установке Ангара-5-1;
- исследование энерговклада в лайнеры, состоящие из различных веществ, на начальной стадии разряда;
- интерпретация полученных результатов, их анализ, и формулирование предложений по оптимизации конструкции лайнеров.

Научная новизна работы

- Впервые проведено изучение энерговклада на стадии инициации проволочных и волоконных лайнеров с нанесенным металлическим покрытием в полномасштабных экспериментах по сжатию многопроволочных лайнеров на установке Ангара-5-1.
- Впервые показано, что напыление на лайнер из вольфрамовых проволок или капроновых волокон висмутового покрытия, позволяет на начальной стадии имплозии достигнуть величины энерговклада в проводящее вещество лайнера, в разы превосходящей его энергию сублимации.
- Разработана и отлажена оригинальная технология формирования заданного профиля линейной массы у лайнеров, составленных из вольфрамовых проволок диаметром порядка 10 мкм.

Практическая значимость работы.

- Создан датчик для измерения напряжения в межэлектродном зазоре установки Ангара-5-1 на расстоянии 45 мм от оси лайнера с временным разрешением 1 нс.
- С помощью созданного датчика напряжения обеспечена возможность проведения экспериментальных исследований стадии инициации проволочных вольфрамовых и алюминиевых лайнеров, а также проволочных и волоконных лайнеров с нанесенным на проволоки металлическим покрытием; полученные экспериментальные данные предоставляют информацию для дальнейшей оптимизации параметров многопроволочных сборок.
- Изготовлены проволочные лайнеры из вольфрама с заданным распределением массы вдоль высоты, предназначенные для токового сжатия КПЛ на установке Ангара-5-1.
- Результаты представленной работы могут быть использованы для проектирования крупных установок, генерирующих импульс МРИ для

ИТС, проверки расчетных схем, описывающих сжатие многопроволочных сборок для создания излучателей с большим выходом МРИ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Создан датчик для измерения напряжения в межэлектродном зазоре установки Ангара-5-1 на расстоянии 45 мм от оси лайнера с временным разрешением 1 нс.
2. Напыление слоя висмута толщиной 1 мкм на поверхность вольфрамовых проволок диаметром 6 мкм позволяет повысить средний энерговклад в вольфрамовые проволоки более чем в 2 раза по сравнению с энерговкладом, получаемым для таких же «чистых» проволок.
3. Напыление висмута на проволочные и волоконные лайнеры с целью увеличения энерговклада в них на начальной стадии имплозии является более эффективным, чем напыление алюминия.
4. Разработана технология формирования уборок из вольфрамовых проволок диаметром порядка 10 мкм нужного распределения линейной массы по высоте с помощью катодного распыления; с её помощью изготовлены квазисферические проволочные лайнеры с линейной массой, меняющейся в пределах от 260 мкг/см на половине высоты проволок до 420 мкг/см у электродов.

Личный вклад автора

Автором разработана конструкция индуктивного делителя для измерения напряжения вблизи нагрузки на лайнерном узле установки Ангара-5-1.

С помощью созданного датчика автором проведено экспериментальное исследование начальной стадии инициации лайнеров различного состава.

Также автором:

- создан стенд для формирования заданного распределения линейной массы вольфрамовых проволочных лайнеров;
- изготовлены и испытаны в экспериментах на установке Ангара-5-1 квазисферические проволочные лайнеры с распределением линейной массы по высоте, необходимым для осуществления компактного сферически симметричного сжатия;
- разработана методика измерения линейной массы лайнера после обработки в разряде, проведены измерения и осуществлена обработка полученных результатов.

Апробация работы

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались на XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС (2011г., Звенигород), на XIV Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» (2011 г., Звенигород), на IX Конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение» (5–7 ноября 2014 г., Москва, НИЯУ МИФИ), на отраслевой научной конференции «АТОМТЕХ 2014.Электрофизика» (26–28 ноября 2014, г. Москва, НИЯУ МИФИ), на ежегодных конкурсах молодых научных сотрудников, аспирантов и инженеров ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» памяти академика А.П.Александрова (г.Москва, г.Троицк, 2013 и 2014 гг.), а также на семинарах отделения физики токонесущей плазмы ФГУП «ГНЦ РФ ТРИНИТИ».

Публикации

Материал диссертации опубликован в двух статьях в рецензируемом журнале “Приборы и техника эксперимента”, входящем в список изданий, рекомендованных ВАК РФ [1,2], а также в двух сборниках трудов и материалов научных конференций [3,4].

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа состоит из Введения, 3-х глав и Заключения, содержит 2 таблицы, 25 рисунков и список литературы, состоящий из 79 ссылок. Объем диссертационной работы составляет 87 страниц.

Во **введении** кратко изложена история развития техники экспериментов с быстрыми сильноточными Z-пинчами, дано описание основных схем по применению Z-пинчей в качестве энергетического драйвера для ИТС. Приведен краткий обзор последних работ, посвященных исследованиям токовой имплозии перспективных плазмообразующих нагрузок для улучшения параметров рентгеновского излучения. Обоснована актуальность темы, сформулированы задачи и цели, достигаемые в процессе проводимых исследований; определены научная новизна и практическая значимость работы; приведены защищаемые положения.

В **первой главе** диссертационной работы представлен экспериментальный диагностический комплекс Ангара-5-1. Особое внимание уделено описанию электротехнических диагностик. Показано расположение датчиков напряжения (UL81) и производной тока (DJL) на выходном узле установки, приведено обоснование используемой методики измерения напряжения, описана методика калибровки датчиков тока и напряжения. Далее в первой главе представлена усовершенствованная методика измерения напряжения на лайнерном узле установки Ангара-5-1 с помощью индуктивного делителя ULLU (рис.1).

Сигнал, снимаемый с петли 7 пропорционален изменению тока в проволочном контуре 9, которое, в свою очередь, пропорционально напряжению между катодом и анодом. Таким образом, относительно небольшие размеры проволочного контура (30–40 см) позволяют измерять напряжение с временным разрешением ~ 1 нс, что в 3–4 раза лучше временного разрешения индуктивного делителя UL81.

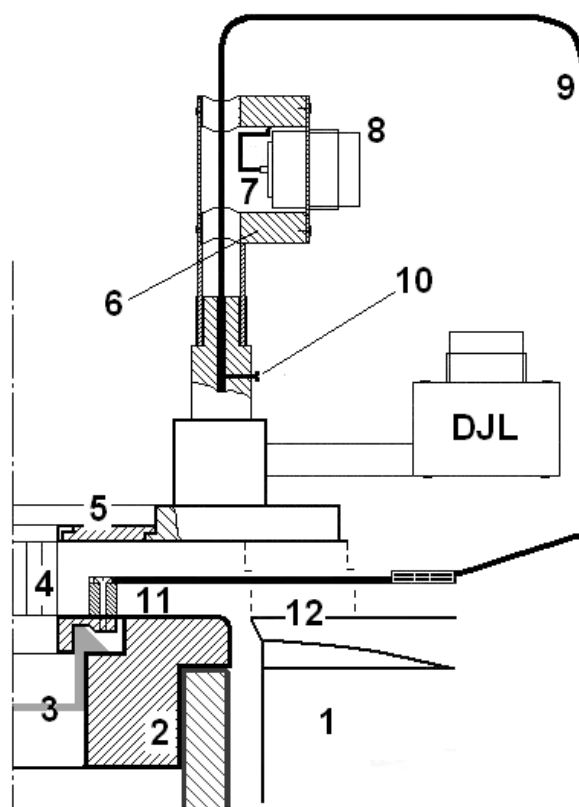


Рис. 1. Схема расположения датчика напряжения ULLU на лайнерном узле установки Ангара-5-1. 1 – ВТЛ, 2 – катод, 3 – предимпульсный разрядник, 4 – лайнер, 5 – анод, 6 – корпус датчика, 7 – измерительная петля, 8 – разъем СР-50-165ФВ82, 9 – проволочный контур, 10 – винт для крепления проволоки, 11 – контакт на катоде, 12 – местоположение обратного токопровода (показан пунктиром).

Поскольку датчик подключен к катоду лайнерного узла установки 11 после предимпульсного разрядника 3, начало сигнала напряжения совпадает с пробоем разрядника, после которого ток начинает протекать через нагрузку. Вначале напряжение быстро возрастает из-за роста сопротивления нагреваемых током проволок, затем резко падает по причине образования вокруг проволок плазмы с высокой проводимостью.

Падение омического напряжения на лайнере $U_R(t)$ в первые 10–15 нс разряда может быть определено по зарегистрированным датчиками ULLU и DJL профилям напряжения $U_L(t)$ и производной тока $dJ(t)/dt$ по формуле:

$$U_R(t) = U_L(t) - L_0 \cdot dJ(t)/dt, \quad (1)$$

где $L_0 \cdot dJ(t)/dt$ – величина, которая характеризует изменение магнитного потока, заключенного преимущественно между начальной границей лайнера

и радиусом, на котором располагаются обратные токопроводы (рис.1, поз.12). L_0 вычисляется из отношения $U_L(t)$ к $dJ(t)/dt$ на временном интервале, когда сигналы ULLU и DJL пропорциональны.

В начале **второй главы** приведено описание проволочных нагрузок, используемых в экспериментах на установке Ангара-5-1. Далее изложено обоснование перехода от цилиндрической к сферической геометрии токовой имплозии. Показано, что при одинаковом импульсе тока и одинаковой степени сжатия, при сферической имплозии поток мощности может оказаться в 4–5 раз больше, чем при цилиндрическом сжатии. Приведено пространственное распределение массы исходных нагрузок, при котором, согласно расчетам, будет происходить компактное сферически симметричное сжатие. Для КПЛ, созданного на основе изначально цилиндрической проволочной сборки диаметром D и высотой h (рис. 2), это условие имеет вид:

$$m_l(x) \propto \sin^{-1}(x/R_0 + \theta_0), \quad 0 \leq x \leq h \quad (2)$$

где R_0 – начальный радиус сферы, $\theta_0 = \arcsin(D/2R_0)$.

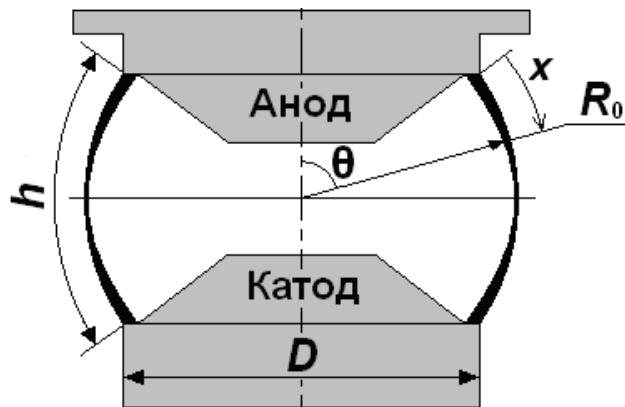


Рис. 2. КПЛ с профилированной линейной массой.

Далее во **второй главе** описана разработанная автором новая технология формирования профиля линейной массы. Приведено обоснование выбора режима разряда и рабочего газа в пользу тлеющего разряда на ксеноне. Описан стенд, созданный для проведения экспериментов по

профилированию линейной массы вольфрамовых проволочных лайнеров в газовом разряде.

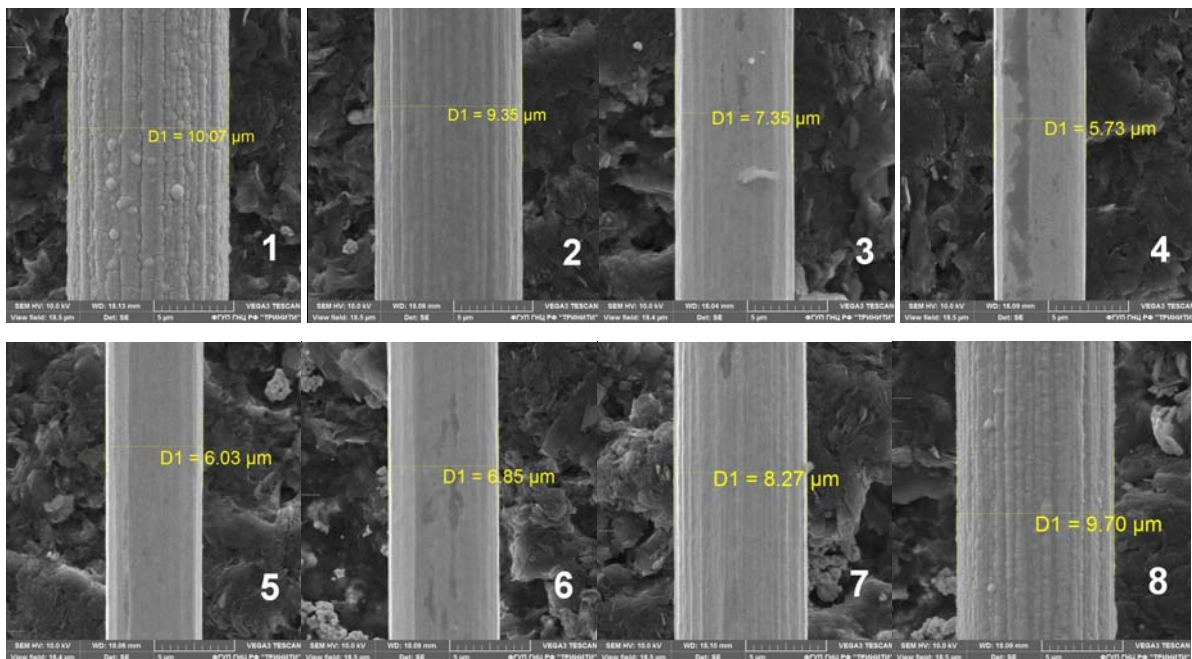
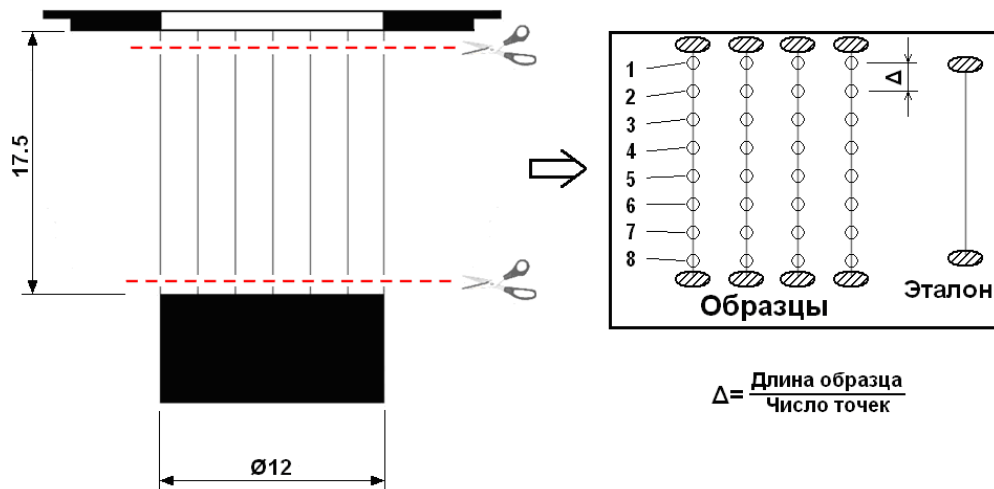


Рис. 3. Схема измерения диаметра образцов проволок с помощью растрового электронного микроскопа (показаны фотографии, полученные с помощью растрового электронного микроскопа Vega3 Tescan).

Предложена методика получения информации об изменении диаметра проволок лайнера на различных участках. От обработанного в газовом разряде лайнера отрезались по 4–6 равноудаленных друг от друга проволок и приклеивались к графитовой пластине. Для сравнения, на той же пластине отдельно закреплялся эталонный образец проволоки, из которой был

изготовлен лайнер. Затем производилось исследование образцов с помощью растрового электронного микроскопа (Zeiss EVO MA 10 или Vega3 Tescan). Измерения диаметра каждого образца производились по всей его длине с шагом 1–2,5 мм. В зависимости от длины образцов и шага получалось от 5 до 17 точек измерения (рис. 3). По результатам измерений диаметра всех образцов определялся средний диаметр проволок лайнера в зависимости от высоты.

В заключительном разделе **второй главы** представлены результаты экспериментов по профилированию линейной массы проволочных лайнеров при разных конфигурациях анодного электрода. За счет подбора электрода и параметров разряда в конечном итоге изготовлены образцы лайнеров, у которых диаметр проволок в среднем меняется по длине согласно выражению $d(x)=d_k(D/(2R_0\sin(x/R_0+\theta_0)))^{1/2}$ для $D=12$ мм, $R_0=9,6$ мм, $\theta_0=38,7$, что равносильно выполнению условия (2) для распределения линейной массы по длине проволок (рис.4). При этом из-за эффекта перенапыления диаметр проволок на концах несколько увеличился по сравнению с исходным диаметром $9,0\pm 0,2$ мкм.

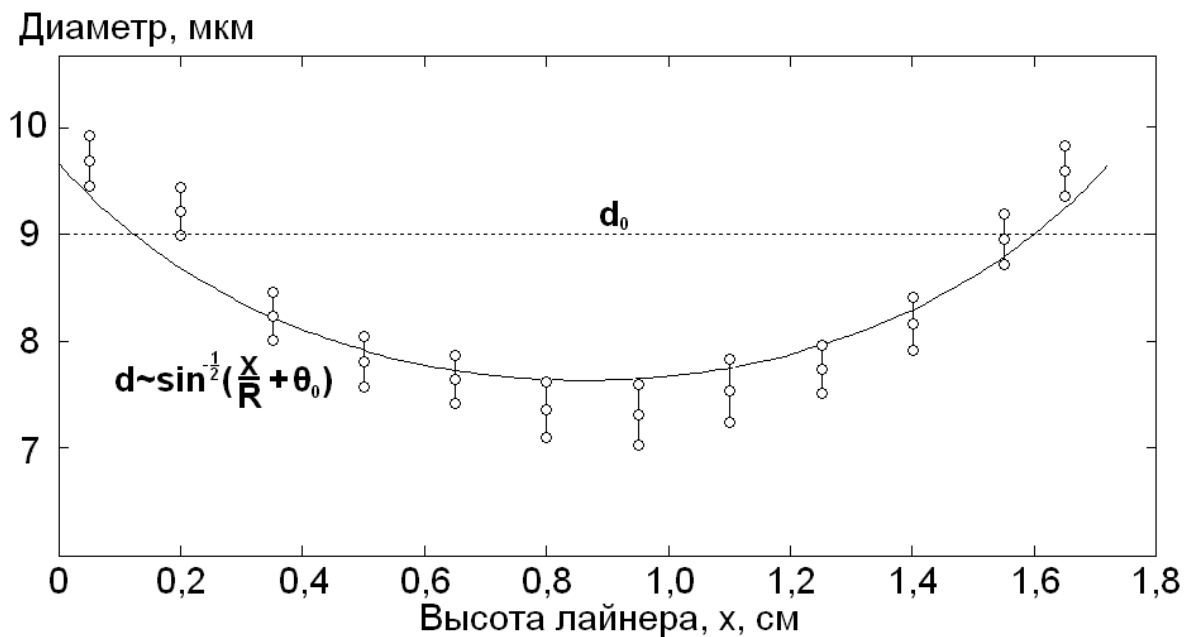


Рис. 4. Усредненный профиль лайнера из 30-ти вольфрамовых проволок с начальным диаметром $d_0= 9,0\pm 0,2$ мкм после распыления в газовом разряде.

В первом разделе **третьей главы** представлен обзор экспериментальных и теоретических исследований по взрыву одиночных проволок в вакууме при высокой скорости нарастания тока, а также работ по исследованию стадии инициации проволочных лайнеров на установках мегаамперного класса. Проведен обзор работ, в которых описывается механизм пробоя проволок. Отмечены основные факторы, влияющие на энергозатраты в проволоки до пробоя: состояние поверхности проволок и электродов, физические свойства металла, скорость нарастания тока через проволоки, наличие радиальных электрических полей («эффект полярности»).

В следующих разделах **третьей главы** представлены экспериментальные результаты, полученные автором.

Во втором разделе **третьей главы** представлены результаты проведенных измерений электротехнических параметров на стадии инициации проволочных (проволоки – W Ø6 мкм и Al Ø25 мкм), и волоконных (капроновые волокна, к.в. Ø25 мкм) цилиндрических сборок с напылением алюминия или висмута при их токовом сжатии на установке Ангара-5-1. Приведены временные профили падения омического напряжения $U_R(t)$ и тока $J(t)$, отнесенного к одной проволоке (волокну). По зарегистрированному току были вычислены временные зависимости температуры проволоки и напыленного металлического слоя (если таковой был), напряжения на нагрузке в течение ее нагрева $J(t) \cdot R(t)$. В расчете предполагается, что вся электрическая энергия, вкладываемая в нагрузку, идет на нагрев металла:

$$J^2(t) \rho(T) \frac{l}{S} dt = m C_p(T) dT, \quad (3)$$

где l , S , m – длина, поперечное сечение и масса проволоки соответственно. При этом ток можно считать равномерно распределенным по сечению металла, так как глубина скин-слоя много больше диаметра проволоки или волокна. Помимо экспериментальных данных для расчета

взяты справочные данные по зависимости теплоемкости $C_p(T)$ и удельного сопротивления $\rho(T)$ металлов от температуры.

На рис.5 показаны временные профили тока и напряжения, полученные в экспериментах с цилиндрическими сборками из капроновых волокон (к.в. $\varnothing 25$ мкм), на которые был напылен висмут и алюминий.

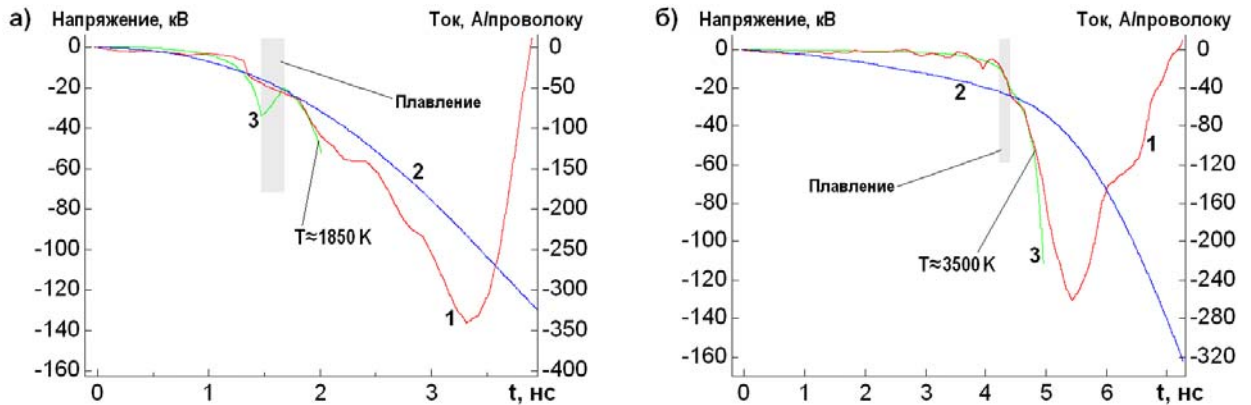


Рис.5. Электротехнические параметры на начальной стадии токовой имплозии сборок из капроновых волокон с покрытием 0,3 мкм висмута (а) и 0,1 мкм алюминия (б): 1 – падение омического напряжения; 2 – ток; 3 – расчетное падение напряжения.

В случае вольфрамовых лайнеров с напыленным металлическим покрытием проволока и покрытие рассматриваются как параллельные проводники, теплообменом между которыми можно пренебречь.

$$J_1^2(t) \rho_1(T) \frac{l}{S_1} = m_1 C_{1p}(T) dT$$

$$J_2^2(t) \rho_2(\Theta) \frac{l}{S_2} = m_2 C_{2p}(\Theta) d\Theta$$

$$J_1(t) + J_2(t) = J(t)$$

$$J_1(t) \cdot \rho_1(t) \frac{l}{S_1} = J_2(t) \cdot \rho_2(\Theta) \frac{l}{S_2}$$

где $J_1(t)$ и $J_2(t)$ – токи через проволоку и напыленный слой, соответственно (все токи в расчете на одну проволоку); l – длина проволоки; S_1 , m_1 , $\rho_1(T)$ и $C_{1p}(T)$ – сечение, масса, удельное сопротивление и теплоемкость проволоки; S_2 , m_2 , $\rho_2(\Theta)$ и $C_{2p}(\Theta)$ – аналогично для напыленного слоя. T и Θ – температуры проволоки и напыленного слоя, соответственно. Из приведенной системы уравнений определяется соотношение температур T

и Θ , после чего могут быть вычислены временные зависимости температур и сопротивлений проволоки и напыленного слоя, а также временной профиль напряжения на нагрузке. Оценки энергетических потерь на теплопроводность показывают, что данная методика расчета не дает существенных ошибок.

На рис.6 показаны профили тока и падения омического напряжения U_R , полученные в экспериментах со сборками из вольфрамовых проволок с напыленным висмутом и алюминием. Там же приведены расчетные временные зависимости напряжения (рис.6а и 6в), температуры вольфрамовых проволок, температуры напыленного на них слоя металла, распределение тока между проволокой и напыленным слоем (рис.6б и 6г).

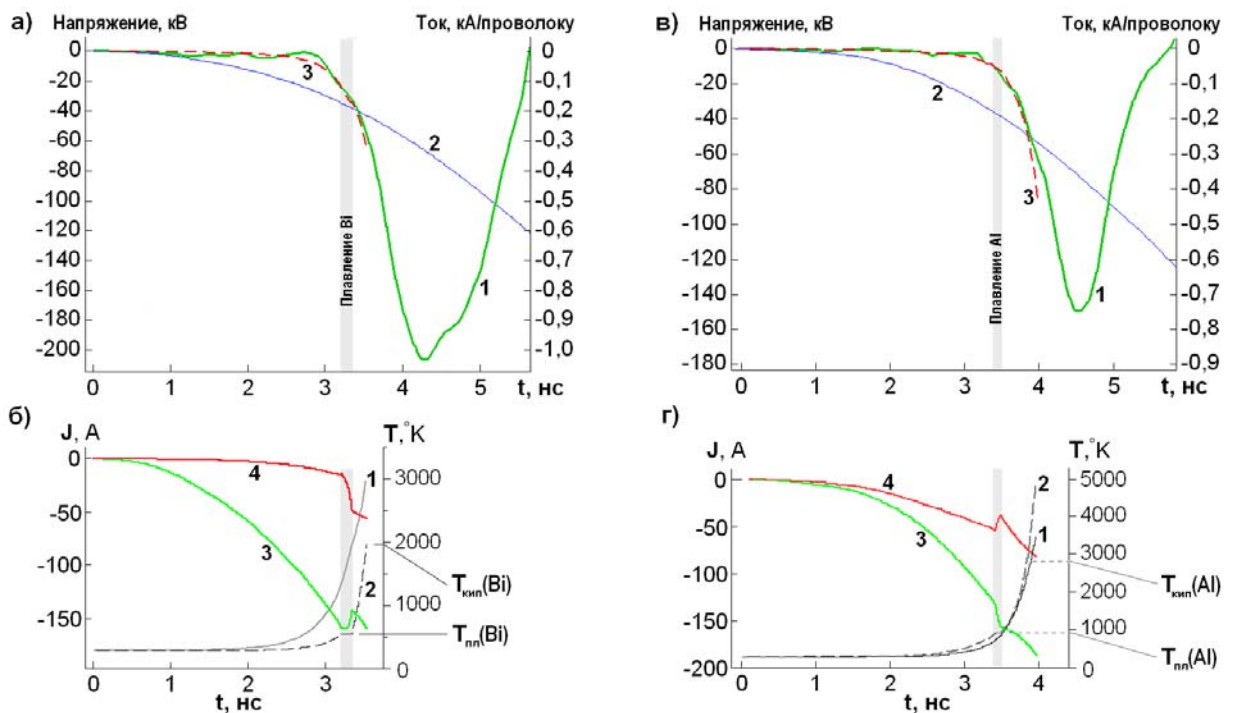


Рис.6 Электротехнические параметры на начальной стадии токовой имплузии сборок из вольфрамовых проволок с напылением 1,0 мкм висмута (6а) и 0,4 мкм алюминия (6в):

1 – падение омического напряжения; 2 – ток; 3 – расчетное падение напряжения.

На рис.6б и 6г показаны расчетные временные зависимости температур (обозначены 1 и 2) и токов (обозначены 3 и 4) проволоки и покрытия соответственно.

Измерения тока и напряжения на проволоках на начальной стадии токового сжатия позволяют определить величину вложенной в них энергии до пробоя. Оценка среднего значения энергии E_d , вложенной в проволоку

(волокно), была произведена путем интегрирования электрической мощности $J(t) \cdot U_R(t)$ до момента, когда напряжение на нагрузке падает вдвое по отношению к своему максимальному значению. При оценке энерговклада в проволоки с напылением на основании рассчитанных распределений тока было предположено, что в проволоку с напыленным висмутом было введено 87% от общего значения энерговклада, а в проволоку с напыленным алюминием – 68%. В таблице 1 приведены усредненные значения электрической энергии, вложенной в различные лайнеры, вместе с соответствующей эксперименту с конкретной нагрузкой усредненной скоростью нарастания тока в расчете на одну проволоку $\langle dJ/dt \rangle$.

Результаты, полученные в экспериментах с вольфрамовыми и алюминиевыми проволоками, хорошо согласуются с известными результатами исследований по электрическому взрыву проволок.

Таблица 1. Энерговклад в различные проволочные и волоконные лайнеры

Проволока/волокно	$\langle dJ/dt \rangle$, А/нс	Общий энерговклад, E_d , мДж/см	Энерговклад в проволоку, эВ/атом	Энерговклад в покрытие, эВ/атом
W Ø6 мкм	~100	32±4	11,2±1,4	-
Al Ø25 мкм	~200	249±32	5,3±0,7	-
К.в.Ø25 мкм + нап. Вi Δ≈0,3 мкм	~80	25±3	-	23±3
К.в.Ø25 мкм + нап. Al Δ≈0,1 мкм	~20	10,3±1,3	-	13,7±1,6
К.в.Ø25 мкм + нап. Al Δ≈0,1 мкм	~100	33±4	-	44±6
W Ø6 мкм + нап. Вi Δ≈1,0 мкм	~100	81±9	25±3	10,6±1,3
WØ6 мкм + нап. Al Δ≈0,4 мкм	~100	33±4	7,8±0,9	13,6±1,6

Исследования начальной стадии имплозии волоконных лайнеров с напылением висмута или алюминия показали, что нагрев и пробой проводящего вещества происходит быстрее по сравнению с лайнерами, состоящими из алюминиевых проволок такого же диаметра, как и капроновые волокна. При существенно большей массе напыленного висмута, для его нагрева и превращения в плазму требуется меньшее время, чем для

алюминия. При скорости роста тока через одну проволоку ~ 100 А/нс, средний энерговклад в алюминий оказался равен 44 ± 6 эВ/атом, в то время как висмут было вложено в среднем 23 ± 3 эВ/атом при несколько меньшем токе на начальной стадии (~ 80 А/нс). Однако если сравнить соотношения величин среднего энерговклада и энергии сублимации напыленного вещества (энергия сублимации алюминия – $3,2$ эВ/атом, висмута – $1,8$ эВ/атом) для вышеупомянутых экспериментов, то окажется, что эти соотношения примерно равны. Таким образом, по результатам определения начального энерговклада в волоконные лайнеры с напыленным металлом можно сделать вывод, что более эффективное вложение энергии было достигнуто на нагрузках с напыленным висмутом.

При пробое вольфрамовых проволок с напылением помимо теплофизических свойств материалов нагрузки, немаловажную роль играли их электрофизические свойства. Поскольку висмут обладает очень высоким удельным сопротивлением, значительная часть тока сосредоточена в вольфраме, а сопротивление нагрузки определяется сопротивлением исходных проволок. В то же время наличие висмутового напыления, по-видимому, задерживало образование плазменной короны, так как при относительно невысоком темпе введения энергии в напыленный слой требовалось большее время для образования пара вокруг проволоки и последующего его пробоя. Кроме того, висмутовое покрытие толщиной 1 мкм не позволяло развиваться сильной электронной эмиссии, которая обычно способствует возникновению плазменной короны при пропускании большого тока через «чистые» вольфрамовые проволоки. Именно задержкой образования плазменной короны можно объяснить тот факт, что средний энерговклад в вольфрамовые проволоки с напыленным висмутом оказался почти в два раза выше, чем в «чистые» вольфрамовые проволоки при одинаковой скорости нарастания тока через них. При этом в вольфрам, согласно оценкам, было вложено примерно 25 ± 3 эВ/атом, что выше его

энергии сублимации почти в три раза, а энерговклад в висмутовое напыление около $10,6 \pm 1,3$ эВ/атом был много больше энергии сублимации висмута $1,8$ эВ/атом.

Ощутимо влияет на энерговклад и предварительное нанесение тонкого алюминиевого покрытия. Дело в том, что сопротивление алюминиевого слоя толщиной $0,4$ мкм лишь примерно в два раза больше сопротивления вольфрамовой проволоки диаметром 6 мкм. Таким образом, напыленный слой забирает на себя около трети тока генератора. При этом из-за высокой теплоемкости алюминия темп нагрева его покрытия, составляющего $3,9\%$ от массы нагрузки, в течение большей части времени стадии нагрева, такой же, как у вольфрамовой проволоки. В итоге количество энергии, вложенной в вещество проволоки, согласно оценкам, составило $7,8 \pm 0,9$ эВ/атом, что даже ниже значения энергии сублимации вольфрама $8,6$ эВ/атом. Показательно, что в то же время энерговклад в алюминиевое покрытие $13,6 \pm 1,6$ эВ/атом был достаточно высок по отношению к энергии сублимации алюминия $3,2$ эВ/атом. Стоит отметить, что данная величина практически не отличается от значения энергии, вложенной в алюминиевое покрытие такой же массы, нанесенное на капроновое волокно при одинаковой скорости нарастания тока через алюминиевое покрытие ~ 20 А/нс. Данный факт указывает на определяющую роль напыленного алюминиевого слоя с конкретными параметрами при пробое проволочных и волоконных нагрузок.

В заключении ко второму разделу **третьей главы** сделан вывод о том, что полученные результаты исследования начальной стадии имплозии проволочных и волоконных сборок показывают, что предварительное напыление висмута с целью увеличения энерговклада в проводящее вещество лайнера на начальной стадии имплозии является более эффективным, чем напыление алюминия.

Третий раздел **третьей главы** содержит результаты, полученные в экспериментах по сжатию КПЛ с профилированной линейной массой по

высоте: линейная масса лайнера менялась от 260 мкг/см на половине высоты до 420 мкг/см у электродов. Общая масса КПЛ составляла примерно 530 мкг, при радиусе сферы – 9,6 мм. Распределение линейной массы у проволочных нагрузок было сформировано с помощью технологии, основанной на катодном распылении. В эксперименте по сжатию такого КПЛ током амплитудой 2,5 МА было получено финальный импульс МРИ мощностью 1,3 ТВт и шириной на полувысоте 18 нс. При этом источник излучения, согласно изображениям, полученным с помощью интегральных камер-обскур (рис.7), представлял собой образование, по форме близкое к шару диаметром около 5 мм. Таким образом, в результате токового сжатия КПЛ с профилированной массой значение потока мощности МРИ составило не менее $1,7 \text{ ТВт/см}^2$, что в 2–3 раза превышало аналогичную величину, получаемую при имплозии цилиндрических вольфрамовых лайнеров общей массой 330 мкг и начальным радиусом 10 мм.

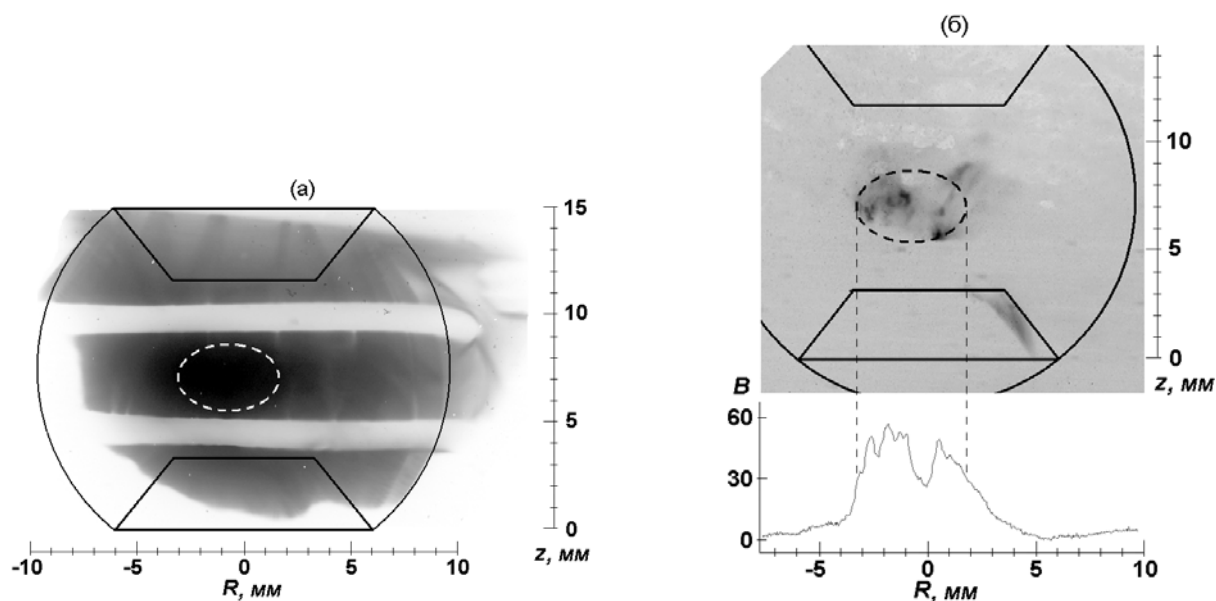


Рис. 7. Изображения, полученные в выстреле с КПЛ на интегральных камерах-обскурах за различными фильтрами: а – без фильтра МРИ ; б – изображение за алюминием 3 мкм. На рис.7б также показан радиальный профиль яркости рентгеновского изображения. На рентгеновские изображения наложены контуры конусных электродов и начального радиуса сферы. Пунктиром на обоих рисунках обведена интенсивно излучающая область.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

- Создан датчик для измерения напряжения на расстоянии 45 мм от оси лайнера на установке Ангара-5-1 с временным разрешением 1 нс.
- Экспериментально измерена энергия, вложенная на начальной стадии имплозии (стадии инициации) в цилиндрические проволочные и волоконные лайнеры с напыленным на поверхность металлическим покрытием.
- Показано, что предварительное напыление висмута на поверхность лайнера из вольфрамовых проволок позволяет существенно повысить энерговыход в проволоки до пробоя. Средняя энергия, вложенная в проволоку до плазмообразования на лайнерах из вольфрамовых проволок с напыленным слоем висмута составляла 25 ± 3 эВ/атом, что почти вдвое выше, чем на лайнерах из вольфрамовых проволок без напыления ($11,2 \pm 1,4$) эВ/атом. Показано, что напыление алюминия на вольфрамовые проволоки дает энерговыход в проволоку $7,8 \pm 0,9$ эВ/атом.
- Показано, что предварительное напыление висмута на поверхность проволочных и волоконных лайнеров целью повышения энерговыхода в них на начальной стадии имплозии является более эффективным, чем предварительное напыление алюминия.
- Разработана технология формирования заданного профиля линейной массы у лайнеров из однородных вольфрамовых проволок. Создан стенд, подобраны конфигурации электродов, параметры разряда (давление рабочего газа, ток, напряжение) и длительность разряда для получения заданного распределения линейной массы лайнера.
- Изготовлены проволочные лайнеры из вольфрама с распределением линейной массы, меняющимся по высоте в пределах от 260 мкг/см на половине высоты проволок до 420 мкг/см у электродов.

- Разработана методика измерения распределения диаметра проволок лайнера по высоте после обработки в разряде.
- Проведены эксперименты по имплозии КПЛ с распределением линейной массы на установке Ангара-5-1. Поток мощности МРИ из центральной области при сжатии таких лайнеров в 2–3 раза выше, чем при сжатии цилиндрических сборок такого же диаметра.

Полученные результаты представляют большой практический интерес в таких актуальных областях науки и техники, как:

- исследование свойств веществ при экстремальных динамических нагрузках;
- оптимизация конструкции и параметров многопроволочныхборок, в том числе и квазисферическихборок, предназначенных для генерации мощных импульсов МРИ;
- изготовление проволочных лайнеров из вольфрама с заданным распределением массы вдоль высоты;
- проектирование крупных установок, генерирующих импульс МРИ для ИТС, проверки расчетных схем, описывающих сжатие многопроволочныхборок для создания излучателей с большим выходом МРИ.

Публикации автора по теме диссертации:

1. Е.В. Грабовский, **В.В. Джангобегов**, Г.М. Олейник. Индуктивный делитель напряжения, расположенный вблизи лайнера. // Приборы и техника эксперимента. 2012. №5. С.67-72. (входит в перечень ВАК РФ, индексируется в Scopus)
2. Е.В. Грабовский, **В.В. Джангобегов**, Г.М. Олейник. Многопроволочные лайнеры с профилированной массой. // Приборы и техника эксперимента. 2014. №6. С.75-78. (входит в перечень ВАК РФ, индексируется в Scopus)
3. Е.В. Грабовский, **В.В. Джангобегов**, Г.М. Олейник. Исследование стадии инициации проволок на установке «Ангара-5-1» при помощи датчика напряжения, расположенного вблизи лайнера // Тезисы докладов XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г.Звенигород, 11–14 февраля 2011. Москва: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2011.
4. Е.В. Грабовский, **В.В. Джангобегов**, Г.М. Олейник. Многопроволочные лайнеры с профилированной массой. // АТОМТЕХ 2014. Электрофизика. Отраслевая научная конференция 26–28 ноября 2014г. Тезисы докладов. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. С.30.