



Александров В.В.,
Грабовский Е.В., Грицук А.Н.,
Лаухин Я.Н., Митрофанов К.Н.,
Олейник Г. М., Фролов И. Н.,
Сасоров П.В., Шевелько А.П.,
Гасилов В.А., Ольховская О.Г.,
Болдарев А.С., Багдасаров Г.А.

Сжатие квазисферических
проволочных лайнеров:
эксперименты и численные
исследования

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Сжатие квазисферических проволочных лайнеров: эксперименты и численные исследования / В.В.Александров [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 42. 18 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-42>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

**В. В. Александров, Е. В. Грабовский, А. Н. Грицук,
Я. Н. Лаухин, К. Н. Митрофанов, Г. М. Олейник,
И. Н. Фролов, П. В. Сасоров, А. П. Шевелько,
В. А. Гасилов, О. Г. Ольховская, А. С. Болдарев,
Г. А. Багдасаров**

**Сжатие квазисферических
проволочных лайнеров:
эксперименты и численные
исследования**

Москва — 2013

Александров В. В., Грабовский Е. В., Грицук А. Н., Лаухин Я. Н., Митрофанов К. Н., Олейник Г. М., Фролов И. Н., Сасоров П. В., Шевелько А. П., Гасилов В. А., Ольховская О. Г., Болдарев А. С., Багдасаров Г. А.

Сжатие квазисферических проволочных лайнеров: эксперименты и численные исследования.

Впервые экспериментально зарегистрировано увеличение плотности энергии мягкого рентгеновского (МР) излучения и концентрации ионов плазмы при сжатии пинча в центре квазисферических проволочных лайнеров (КПЛ) с профилированием линейной массы. Представлены результаты изучения пространственного распределения источников жесткого рентгеновского (ЖР) излучения на изображениях пинча при имплозии КПЛ из вольфрамовых проволок. Показано, что для таких нагрузок в центральной области КПЛ образуется сферический источник ЖР-излучения (>20 кэВ), расположенный симметрично относительно оси КПЛ. Приведены данные о пространственном распределении интенсивности спектра МР-излучения в центральной приосевой области КПЛ и на периферии лайнера по радиусу пинча при имплозии КПЛ из вольфрамовых проволок с применением спектроскопии с пространственным разрешением в диапазоне длин волн $20 - 400 \text{ \AA}$. Обнаружено, что спектральная плотность МР-излучения пинча КПЛ и цилиндрических проволочных лайнеров (ЦПЛ) имеет максимум в диапазоне длин волн $50 - 150 \text{ \AA}$. Средняя плотность энергии в плазме пинча при имплозии КПЛ в ~ 7 раз больше, чем при имплозии ЦПЛ при равной массе КПЛ и ЦПЛ и близких значениях разрядного тока в диапазоне от 2,4 до 3 МА. Проведено моделирование трехмерной имплозии и генерации излучения для КПЛ с профилированием массы с помощью трехмерного радиационно-магнитогидродинамического кода MARPLE.

Ключевые слова: z-пинч, квазисферический проволочный лайнер, МГД-моделирование

V. V. Aleksandrov, E. V. Grabovski, A. N. Gritsuk, Ya. N. Lauhin, K. N. Mitrofanov, G. M. Oleinik, I. N. Frolov, P. V. Sasorov, A. P. Shevelko, V. A. Gasilov, O. G. Olkhovskaya, A. S. Boldarev, G. A. Bagdasarov

Experimental and numerical study of quasispherical compression of plasma liners

Quasispherical compression of plasma liners created by multiwire arrays electrical explosion at ANGARA-5-1 facility (TRINITI) with the discharge current up to 3.5 MA and the pulse rise time about 90 ns is studied. Different configurations of wire arrays are investigated. It is demonstrated that dedicated design of the electrodes, the wire array, and mass distribution along the wires results in very compact spherical bright radiation source in the centre of the array. The trailing mass is significantly less as compared with cylindrical and uniform quasispherical liners.

Key words: z-pinch, quasispherical wire-array liners, MHD simulation

Введение

В результате исследований по инерциальному термоядерному синтезу давно стало общепризнанным, что достижение высоких параметров вещества при сферическом обжатии, достигается с меньшими полными энергетическими затратами, чем при цилиндрическом обжатии. Обычное использование цилиндрического магнитного обжатия при использовании мощных электромагнитных импульсных генераторов (типа Z и Ангара-5-1) диктовалась при этом геометрией таких импульсных генераторов. Для достижения квазисферического сжатия в более медленных взрыво-магнитных генераторах с использованием сплошных лайнеров довольно давно было предложено профилирование по форме и толщине обжимающих оболочек, которые воспринимают ток генератора. См. публикации [1, 2]. В работах [3, 4] аналогичная идея была предложена для быстрых генераторов, в которых обычно ток генератора воспринимается многопроволочной сборкой. При этом кроме придания квази-сферической формы этой сборки, необходимо специальное профилирование поверхностной массовой плотности сборки. В работах [3, 4] было предложено несколько способов такого профилирования, которые достаточно проблематично реализовать на практике. Динамика сжатия квазисферической оболочки исследовалась путем численной симуляции в работе [5]. В этих работах предполагалось, что сборка сжимается как единое целое, и энергия сжатия оболочки используется по схеме «двойного лайнера» (“Dynamic Hohlraum”). В работах [6, 7] изложенные выше идеи были реализованы экспериментально путем оригинальной схемы электростатического изгибания многопроволочного лайнера. При этом не удалось еще в полной мере провести нужное профилирование погонной массы проволок. В этих работах было подтверждено, что, как и во всех типичных случаях сжатия многопроволочныхборок, так и в этих исследованных экспериментально квазисферическихбороках имеет место явление затянутого плазмообразования, сравнимого по длительности с длительностью нарастания тока. Кроме того, несмотря на увеличение степени кумуляции энергии, не был достигнут значительный выигрыш в использовании квазисферическихборок, который следовал из ранних теоретических оценок, из-за недостаточно эффективного профилирования погонной массы проволок. Эти соображения явились основанием для настоящей работы. Здесь будут описаны методы создания эффективного профилирования проволок, получены подробные экспериментальные результаты по физике сжатия такихборок и будут

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по грантам № 12-02-00369-а, № 13-02-00013, № 13-02-00482, 11-07-93939-Джи8-а.

Расчеты выполнялись на суперкомпьютерах "Ломоносов" (НИВЦ МГУ), МВС-100К (МСЦ РАН) и К-100 (ИПМ РАН).

проведены современные трехмерные МГД симуляции сжатия квазисферических сборок с помощью радиационно-магнито-гидродинамического (РМГД) кода MARPLE с учетом эффекта затянутого плазмообразования.

Использование квазисферического проволочного лайнера (КПЛ) для трехмерного сжатия его вещества магнитным полем [6, 7] в режиме быстрого Z-пинча [8, 9] позволяет увеличить интенсивность излучения в квазисферической системе "двойной лайнер"-*"Dynamic-Hohlraum"* за счет сферической кумуляции кинетической энергии потоков плазмы в геометрическом центре КПЛ [3]. И таким образом можно более эффективно использовать кинетическую энергию имплозии лайнера.

Экспериментальное исследование параметров вещества при трехмерной имплозии КПЛ представляет сложную задачу. Высокая плотность плазмы и малые значения характерного размера ее градиента, которые достигаются в центральной области пинча при трехмерной кумуляции потоков плазмы, не позволяют использовать такие классические методы, как лазерное зондирование в оптическом диапазоне и рентгеновская радиография в квантах мягкого рентгеновского (МР) излучения с энергией менее кэВ из-за сильного поглощения и рефракции излучения этих источников в плазме. Регистрация изображений пинча КПЛ в собственном МР, соответствующем диапазону энергии квантов 0,1 - 0,6 кэВ, затрудняется тем, что на периферии пинча формируется область отстающей плазмы из вещества лайнера. Наличие области отставшей плазмы из вещества с высоким атомным номером Z может исказить исходный спектр МР за счет поглощения в ней, затрудняя корректное восстановление пространственного распределения плотности плазмы в пинче по изображению в прошедшем МР-излучении.

Поэтому для визуализации распределения вещества в пинче в экспериментах использовали изображения в квантах жесткого рентгеновского излучения (>20 кэВ). В работах [10, 11] было проведено исследование генерации такого излучения при имплозии проволочных лайнеров различных типов. Обнаружено, что генерация ЖР происходит, как правило, на несколько нс позже пика МР. Экспериментально показано, что генерация импульсов ЖР обусловлена тормозным излучением быстрых электронов [12, 13] при их взаимодействии с ионами вольфрама, входящими в состав плазмы пинча [10, 11]. Исследование изображений пинча в квантах с энергией свыше 20 кэВ было проведено с применением для построения изображений в ЖР камер-обскур (К-О) специальной конструкции [13].

Для исследования параметров излучения пинча при трехмерном сжатии в работе используется спектрограф с пространственным разрешением, позволяющий регистрировать излучение и отставшей массы, и центральной части. Для изучения динамики имплозии использовались радиальная и аксиальная оптические развертки [7].

Целью данной работы является изучение условий формирования и излучения пинча в центре КПЛ, сопоставление результатов имплозии квазисферических и цилиндрических проволочных лайнеров.

Об увеличении плотности энергии в плазме пинча при трехмерном сжатии квазисферических проволочных лайнеров

На установке «Ангара-5-1» была проведена серия экспериментов с квазисферическими лайнерами, состоящими из вольфрамовых проволок и металлизированных капроновых волокон с профилированием линейной массы вдоль лайнера. КПЛ создавались электростатическим растяжением ЦПЛ с помощью дополнительного электрода, размещенного в межэлектродном зазоре установки [6] (рис.1а). Профилирование линейной массы вдоль проволок лайнера осуществлялось напылением методом термического испарения дополнительной массы вещества на отдельные части проволочного/волоконного лайнера в универсальной вакуумной установке ВУП-4. Для напыления применялись материалы с разным атомным номером: алюминий, индий и висмут [7].

Выбор погонной массы проволочных лайнеров, предназначенных для достижения максимальной мощности выходного импульса МР-излучения, определялся при используемых профиле разрядного тока $I(t)$ и величине погонной массы m сжимаемого вещества из решения уравнения Ньютона

$$\frac{m}{2\pi r} \ddot{r} = -\frac{B^2}{2\mu_0} = -\frac{\mu_0 I(t)^2}{8\pi^2 r^2}, \quad (1)$$

при условии, что при выбранной массе m максимальная скорость равноускоренного движения вещества лайнера в процессе имплозии достигается вблизи максимума амплитуды $I(t)$.

Кроме того, в приэлектродных областях проволочных/металлизированных волоконных лайнеров (КПЛ и КМВЛ) была нанесена дополнительная погонная масса m так, чтобы вдоль высоты лайнера распределение массы приблизительно соответствовало условию:

$$mR^2 \sin^2 \theta = const, \quad (2)$$

где θ — полоидальный угол [3].

В экспериментах использовались КПЛ и КМВЛ с полной массой 150-450 мкг, высотой 15 мм, которые представляли собой часть квазисферической поверхности радиусом 9,6 мм. Параметры сжатия проволочной сборки контролировались диагностическим комплексом установки «Ангара-5-1» [14]. Для сравнения результатов имплозии были выбраны изображения, полученные с помощью камеры-обскуры в двух диапазонах энергии рентгеновских фотонов: свыше 100 эВ (фильтр лавсан толщиной 2 мкм) и свыше 600 эВ (фильтр Al толщиной 3 мкм) [13].

Зависимости пропускания рентгеновских фильтров от энергии фотонов получены с использованием таблиц, доступных на сайте [15].

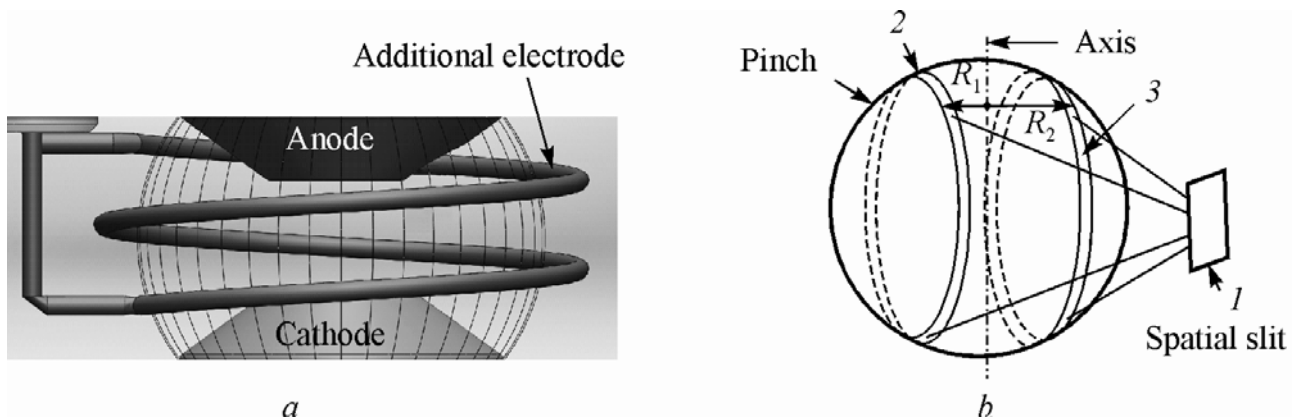


Рис.1. а) Схема создания квазисферического лайнера.

б) Схема получения изображений спектра МР-излучения из областей пинча, расположенных на различных расстояниях по радиусу от его центральной оси: 1 — пространственная щель; 2, 3 — области в пинче на расстояниях R_1 и R_2 от оси, по которым усредняется спектральная плотность

Спектры МР-излучения плазмы Z-пинча в диапазоне длин волн 20-400 Å регистрировались с помощью спектрометра скользящего падения (grazing incidence spectrometer, GIS) [16]. Для их записи в спектрографе использовалась фотопленка типа УФ-4 [17]. При регистрации спектров МР-излучения в направлении, перпендикулярном оси пинча, входная щель спектрографа располагалась на расстоянии 150 см от оси пинча. Используемая геометрия позволяла регистрировать спектр в диапазоне 20-400 Å с максимальным разрешением $\lambda/\Delta\lambda=100$, пространственное разрешение для энергии квантов 30 эВ — 1 мм, для энергии квантов порядка 500 эВ — 240 мкм. Примененная экранировка спектрографа от ЖР-излучения уменьшала интенсивность засветки фотопленки жесткой компонентой спектра до уровня вуали. Юстировка спектрографа с точностью 10^{-2} рад (1 мм по объекту) проводилась с использованием вспомогательного лазера.

Для измерения размера источника излучения и определения компактности сжатия между спектрометром и пинчем была установлена щель, которая строит одномерное изображение источника излучения на дифракционной решетке спектрометра, что дает радиальное распределение спектральной плотности излучения пинча [18].

Схема получения изображений спектра МР-излучения, формируемых из областей пинча, расположенных на различных расстояниях от центральной оси, показана на рис. 1б. Пространственная щель (1) формирует одномерное изображение пинча с пространственным разрешением по радиусу. При этом происходит усреднение интенсивности изображения по высоте пинча. Таким образом, применение спектрометра GIS обеспечивает измерение размеров

пинча по радиусу по изображениям спектров пинча с радиальным пространственным разрешением.

Эксперименты по имплозии КПЛ и КМВЛ показали, что конические электродные вставки и профилирование массы лайнера (2) приводит к более симметричному распределению плотности ионов вольфрама и висмута в центре КПЛ и уменьшению размера изображения пинча в ЖР-излучении (рис. 2а) до 3 мм, а в МР-излучении до 3,5 мм (рис. 2b).

Чтобы иметь возможность варьировать линейную и полную массу, проводились эксперименты с квазисферическими лайнерами из металлизированных диэлектрических волокон (КМВЛ) с профилированием линейной массы за счет нанесения слоев индия и висмута (In и Bi) и конусными электродами внутри. На рис. 2с, 2d, 2е представлены интегральные во времени изображения пинча в трех диапазонах энергии квантов при имплозии таких КМВЛ, исходное положение лайнера и позиции анода и катода указаны штриховыми линиями.

Представленные рентгеновские изображения в трех диапазонах энергии квантов подтверждают, что при имплозии КМВЛ с профилированием линейной массы нанесенными слоями металлов (In и Bi) и конусными электродами экспериментальные двумерные изображения пинча демонстрируют черты близкого к сферически-симметричному трехмерного сжатия вещества лайнера. На рис. 2с - е видны контуры конусных электродов и тени растягивающего электростатического электрода.

Для изучения динамики сжатия в экспериментах использовались две оптические ЭОП-камеры в режиме щелевой развертки типа СФЭР-6, временные щели которых были установлены параллельно и перпендикулярно оси лайнера. На рис. 2f, 2g приведены характерные изображения разверток свечения сжимающегося квазисферического лайнера типа КМВЛ и синхронизированные с ними импульсы мощности МР-излучения с энергией квантов свыше 120 эВ в выстреле № 5094.

На изображении радиальной развертки свечения пинча (рис. 2f) видно слабое излучение от сходящейся к центру экваториальной части лайнера и всплеск свечения в момент пика импульса МР-излучения, когда в центр прилетает плазма от всех областей лайнера, а затем наблюдается её разлет. На аксиальной развертке (рис. 2g) свечение появляется в центре лайнера только в момент пика импульса МР-излучения. Заметим, что на кадровых изображениях в рентгеновском излучении в момент пика импульса МР-излучения наиболее яркая область на изображении находится в центре нагрузки. Эти результаты — интегральные, кадровые изображения и данные оптических разверток убедительно показывают сферичность сжатия вещества лайнера.

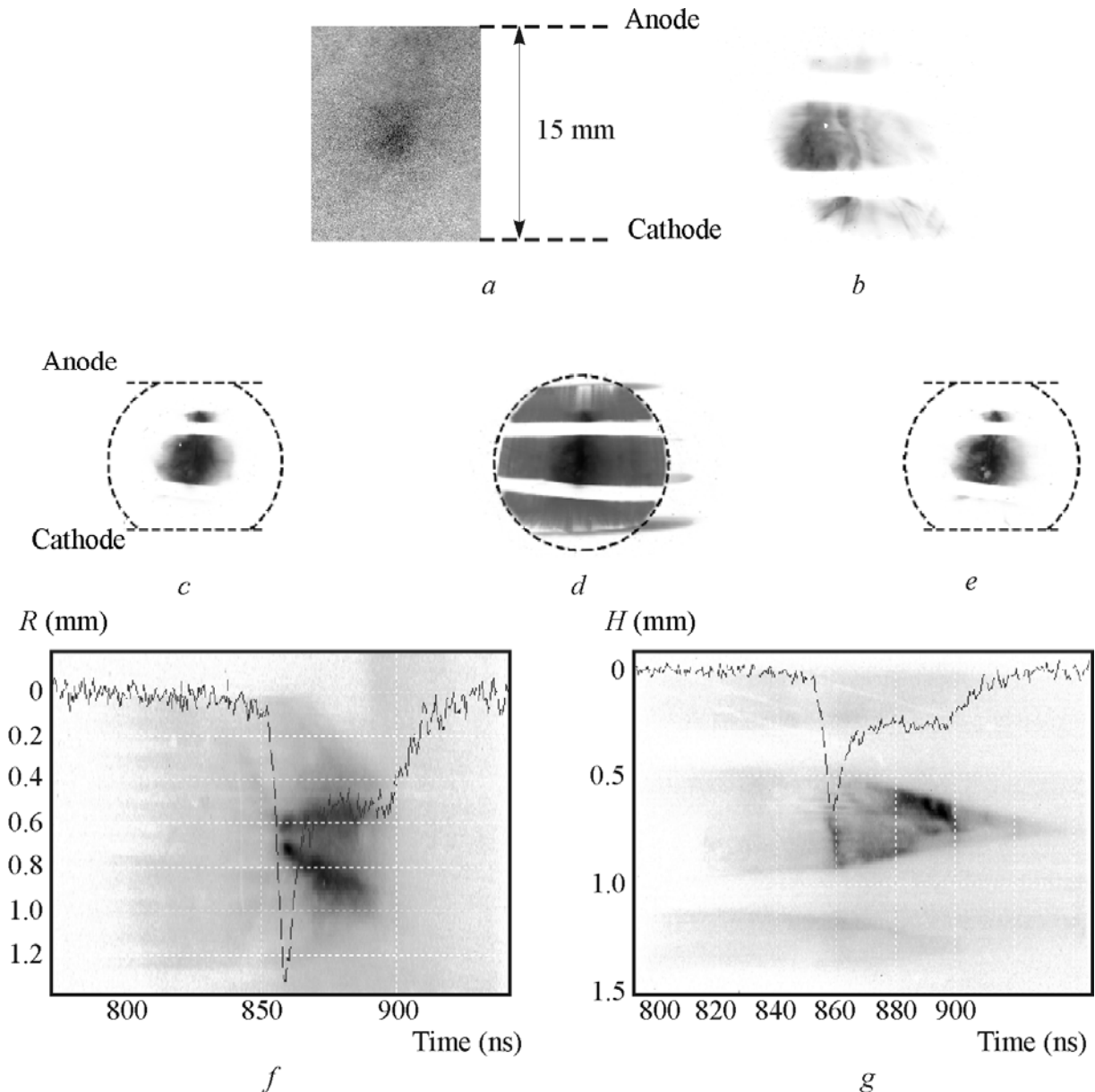


Рис. 2. Выстрел № 5101: 30 W проволока с напылением Vi , конусные электроды, полная масса лайнера 380 мкг, диаметр центральной области 3,3 мм.

Интегральные по времени изображения пинча: а) в фотонах ЖР-излучения с энергией свыше 20 кэВ, б) в МР-излучении с энергией квантов свыше 120 эВ. Выстрел № 5094: КМВЛ 40 капроновых волокон (25 мкм) с профилированием линейной массы нанесенными слоями металлов (In и Vi) и конусными электродами, полная масса 270 мкг.

Характерные интегральные во времени изображения пинча в трех диапазонах энергии квантов: с) рентгеновский фильтр: лавсан — 316 мкг/см^2 ($>120 \text{ эВ}$), д) без фильтра, е) рентгеновский фильтр Al 3 мкм ($>600 \text{ эВ}$).

Изображения развертки свечения пинча сжимающегося лайнера и синхронизированного с ней импульса мощности МР-излучения с энергией квантов свыше 120 эВ (штриховая кривая): ф) радиальная оптическая развертка, г) аксиальная оптическая развертка.

Средний размер интегрального по времени изображения, полученного с помощью камеры-обскуры за лавсановым фильтром (свыше 120 эВ) W-КПЛ с Vi напылением составил $(3,5 \pm 0,7)$ мм, в ЖР-излучении (свыше 20 кэВ) — $(3,1 \pm 0,3)$ мм. Средний размер интегрального по времени изображения, полученного с помощью камеры-обскуры за лавсановым фильтром (свыше 120 эВ), при имплозии КМВЛ с Vi-In напылением составил $(3,1 \pm 0,8)$ мм. Указанные погрешности определяются статистическим разбросом результатов измерений в проведенной серии экспериментов.

Таким образом, при имплозии W-КПЛ и КМВЛ в опытах на установке «Ангара-5-1» при токе 2 – 3,5 МА и длительности фронта импульса тока 90 нс, с помощью профилирования линейной массы проволок и волокон вдоль высоты лайнера и установки конических электродов, удалось реализовать близкое к сферически-симметричному трехмерное сжатие вещества лайнера магнитным полем и получить компактные плазменные сферические области, сильноизлучающие в МР-излучении.

Важной характеристикой трехмерного сжатия магнитным полем вещества КПЛ является компактность сжатия и концентрация энергии в его центре. Для изучения концентрации энергии был использован метод измерения спектра МР-излучения с пространственным разрешением перпендикулярно и вдоль оси КПЛ. Использование интегрального по времени спектрометра скользящего падения (спектрометр типа GIS) с пространственным разрешением по радиусу и по высоте лайнера обеспечило диагностическую методику для изучения компактности сжатия КПЛ по характеристикам пространственного распределения спектральной плотности МР-излучения в диапазоне длин волн (20-400) Å в спектрах плазмы при имплозии КПЛ.

На рис. 3а и 3б представлены экспериментальные изображения спектров МР-излучения с радиальным и аксиальным пространственным разрешением при имплозии W-КПЛ в выстрелах № 4961 и № 5071. На рис. 3а на оси R [мм] черными горизонтальными линиями отмечены направления по радиусу: 0 мм, 2,2 мм и 3,8 мм, — вдоль которых осуществлялась оцифровка интенсивности изображения спектра в шкале длин волн λ [Å]. На рис. 3б оцифровка интенсивности изображения спектра в шкале длин волн λ [Å] проводилась на разных расстояниях между анодом и катодом вдоль горизонтальных направлений, параллельных оси длин волн λ [Å].

На рис. 3с показаны распределения СП МР-излучения $I(\lambda)$ от длины волны квантов λ на различных расстояниях от оси W-КПЛ (на рис. 3а показаны линии в 2,2 мм и 3,8 мм от оси, вдоль которых были получены спектры на рис. 3с). На рис. 3д показаны распределения спектральной плотности (СП) МР-излучения $I(h\nu)$ от энергии квантов в разных областях между катодом и анодом вдоль оси W-КПЛ. Спектральная плотность имеет максимум в диапазоне 105÷120 эВ для средней части квазисферического лайнера, особенно ярко выраженный дляборок с профилированием массы. Из приведенных кривых на рисунке 3с видно, что при имплозии W-КПЛ на расстоянии 2 - 3 мм от оси СП МР падает

более чем на порядок по сравнению с СП МР на оси. Также наблюдается сдвиг максимума спектральной плотности в длинноволновую часть при удалении от оси.

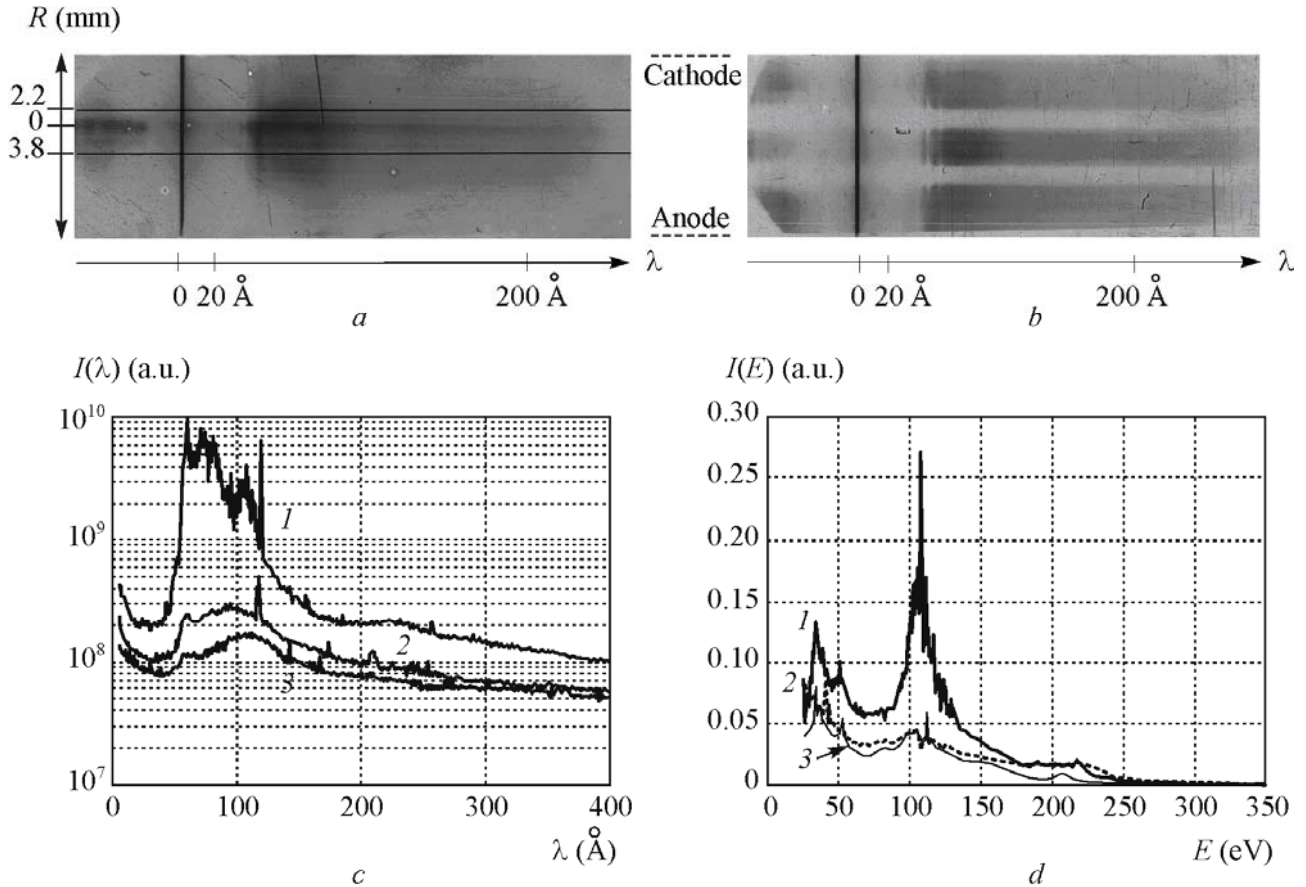


Рис.3 Экспериментальные изображения спектров МР-излучения с радиальным и аксиальным пространственным разрешением при имплозии W-КПЛ: а) Выстрел № 5071: W-КПЛ, полная масса лайнера 435 мкг, изображение спектра с радиальным пространственным разрешением; б) Выстрел № 4961: W-КПЛ, полная масса лайнера 440 мкг, изображение спектра с аксиальным пространственным разрешением.

Характерные распределения спектральной плотности МР-излучения (СП МР) с пространственным разрешением в зависимости от длины волны и энергии квантов при имплозии W-КПЛ: с) Выстрел № 5071, СП МР от длины волны на различных расстояниях по радиусу от оси лайнера (1 — на оси, 2 — в 2,2 мм от оси, 3 — в 3,8 мм от оси); д) Выстрел № 4961, СП МР от энергии квантов на различных расстояниях вдоль оси W-КПЛ между катодом и анодом (1 — в центральной части лайнера, 2 — в прикатодной области, 3 — в прианодной области).

Следует отметить, что при имплозии W-ЦПЛ на расстоянии 2 - 3 мм от его оси СП МР падает в 2-3 раза по сравнению со СП МР на оси, т.е. излучающая область в W-КПЛ меньше и компактнее, чем для W-ЦПЛ той же массы.

Данные измерений спектров МР-излучения с радиальным разрешением при имплозии W-КПЛ (рис. 3а) и W-ЦПЛ обеспечивают получение зависимости размера излучающей области пинча от энергии излучения. Полученные из этой зависимости размеры излучающих областей с точностью 10 % совпадают с размерами излучающей области, полученными из изображений рентгеновской камеры-обскуры.

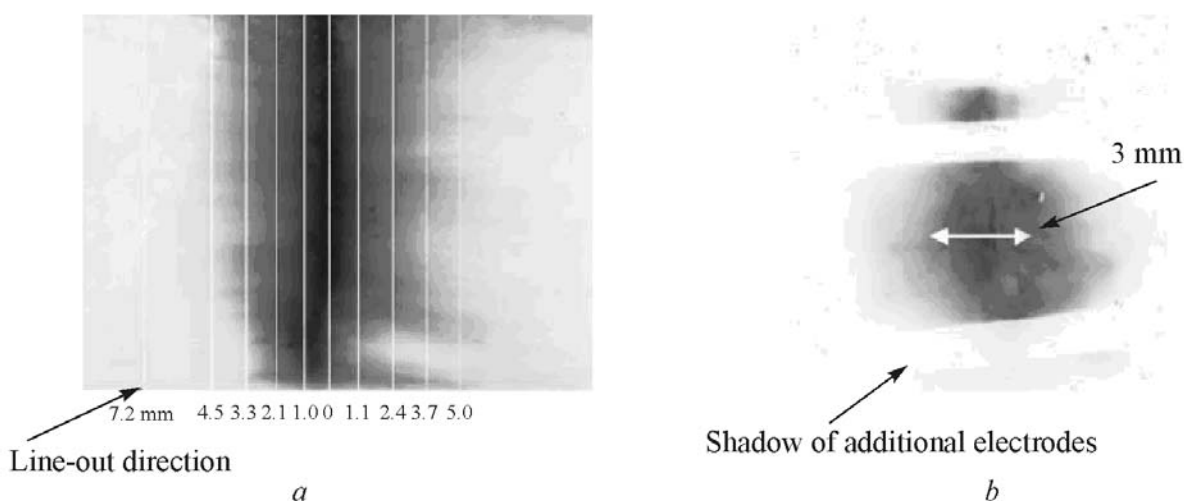


Рис.4 Интегральные по времени рентгеновские изображения пинча в МР-излучении с энергией квантов свыше 120 эВ (фильтр лавсан 316 мкг/см²) при имплозии W-ЦПЛ и КМВЛ с равными линейными массами: а) Выстрел № 5091: W-ЦПЛ, 40 W-проволок диаметром 6 мкм, начальный диаметр 20 мм, полная масса 330 мкг/см, на изображении указаны расстояния от полос оцифровки (белые прямые) до оси сборки; б) Выстрел № 5094: КМВЛ, 40 капроновых волокон (Ø25 мкм) с In-Vi слоями для профилирования линейной массы и конусными электродами, полная масса 270 мкг/см, на изображении в качестве масштаба указан отрезок длиной 3 мм (белая стрелка).

На рис. 4а и 4б приведены интегральные по времени рентгеновские изображения пинча в МР-излучении с энергией квантов свыше 120 эВ (фильтр лавсан 316 мкг/см²), полученные при имплозии W-ЦПЛ в выстреле № 5091 и квазисферического лайнера из металлизированных волокон (КМВЛ) (40 капроновых волокон (Ø 25 мкм) с In-Vi слоями для профилирования линейной массы и конусными электродами) в выстреле № 5094 при токе 2,5 МА.

Диаметр излучающей области в W-ЦПЛ на изображении рис. 4а и по спектральным данным составляет $d_{CWA} = 5$ мм, при высоте сборки $H = 15$ мм. Объем сжатой плазмы $V = \pi d^2 H / 4 = 0,29$ см³. Типичная энергия МР-излучения

40-проволочного W лайнера $\varnothing 20$ мм с линейной массой сборки 220 мкг/см составляет $E_{CWA} = 30$ кДж при токе 2,5 МА, поэтому энергия МР-излучения, отнесенная к объему источника РИ, $30 \text{ кДж} / 0,29 \text{ см}^3 = 103 \text{ кДж/см}^3$.

В случае КМВЛ диаметр излучающей области на изображении рис. 4б и по спектральным данным $d_{QSFA} = 3$ мм, объем сжатой плазмы $V_{\text{sphere}} = \pi d^3 / 6 = 3,14 \cdot 0,3^3 / 6 = 0,014 \text{ см}^3$, типичная энергия МР-излучения $E_{QSFA} = 11$ кДж при токе 2,5 МА, соответственно, энергия МР-излучения, отнесенная к объему источника РИ, в этом случае $11 \text{ кДж} / 0,014 \text{ см}^3 = 785 \text{ кДж/см}^3$. Таким образом, обнаружено, что при имплозии КМВЛ и ЦПЛ с примерно равной массой при разрядном токе 2,5 МА средняя плотность энергии МР-излучения в объеме плазмы КМВЛ в 7,5 раз превосходит соответствующее значение для W-ЦПЛ. Это значение примерно соответствует результатам ранее проведенных расчетов [3].

Трехмерное моделирование квазисферических Z-пинчей на основе проволочныхборок

Было проведено трехмерное РМГД моделирование квазисферического сжатия проволочныхборок с помощью кода MARPLE (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН) [19, 20]. В модели течение плазмы рассматривается в одножидкостном МГД-приближении, представленном обычной системой МГД-уравнений в декартовой системе координат, при этом учитывается анизотропия диссипативных процессов в условиях замагниченности. Энергетический баланс записан в двухтемпературной модели, описывающей электрон-ионный энергообмен. Перенос энергии излучением описывается многогрупповой диффузионной моделью. В проведенных расчетах использовалось 36 спектральных групп. Данные по уравнениям состояния и оптическим свойствам вещества были рассчитаны по программе ТЕРМОС [21].

Цель моделирования — изучение влияния на процесс сжатия геометрии сборки и начального распределения массы. В численных экспериментах сравнивалось сжатиеборок из однородных проволок и с дополнительным напылением, а также с плоскими и с коническими электродами. Определялись распределение плотности и температуры плазмы в процессе сжатия пинча и мощность излучения.

На рис. 5 показана схема квазисферической проволочной сборки с профилированными электродами, использовавшаяся для численных экспериментов. Проволочная сборка состоит из 40 вольфрамовых проволок толщиной 6 мкм, перераспределение массы вдоль проволоки достигается нанесением дополнительного слоя вольфрама вблизи электродов. Полная масса лайнера 266 мкг. Дополнительная масса распределена на проволоках однородно на участках длиной 4,54 мм у анода и катода, погонная масса проволок на этих участках 188 мкг/см. Погонная масса проволок на среднем участке длиной 8,134 мм без нанесения дополнительного слоя вольфрама 117 мкг/см.

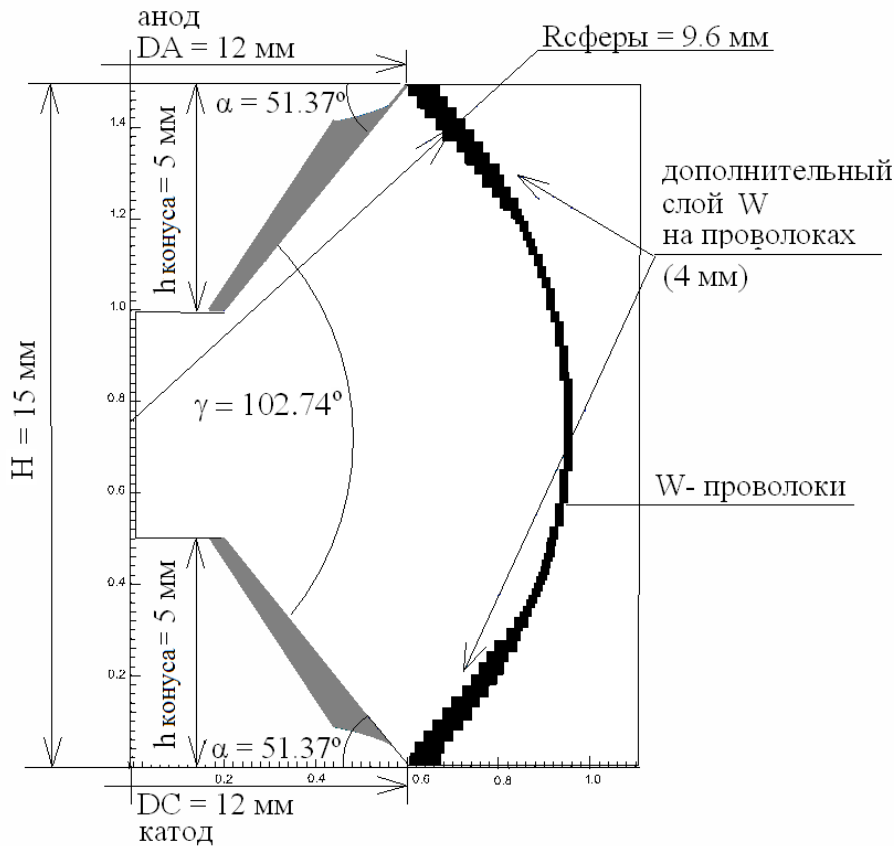


Рис.5. Схема численного эксперимента по исследованию сжатия КПЛ с профилированными электродами

Расчеты выполнялись в цилиндрическом секторе 45° с периодическими граничными условиями при $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi/4$. Сектор соответствует $1/8$ части разрядной камеры, на которую приходится 5 проволок сборки. В области была построена блочная сетка из гексаэдров (внешняя часть области — место начального расположения сборки) и треугольных призм (вблизи оси), содержащая приблизительно 4 миллиона расчетных ячеек ($h_\varphi \approx 65 \div 40$ мкм, $h_r \approx 60$ мкм и $h_z = 120$ мкм). Ток генератора задавался в форме $I(t) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{2T}t\right)$ с амплитудой $I_0 = 3$ МА и временем нарастания $T = 100$ нс.

Образование плазмы из вещества проволочной сборки учитывается в модели затянутого плазмообразования [22]. Темп производства массы вычислялся по формуле

$$\dot{m}(t) = \begin{cases} kB(t)^2, & t < t_\alpha, \\ \frac{kB(t_\alpha)^2}{M_0(1-\alpha)}(M_0 - m(t)), & t \geq t_\alpha. \end{cases}$$

где $k = 0,3$, $\alpha = 0,5$, M_0 — полная масса сборки, t_α определяется из условия $m(t_\alpha) = \alpha M_0$.

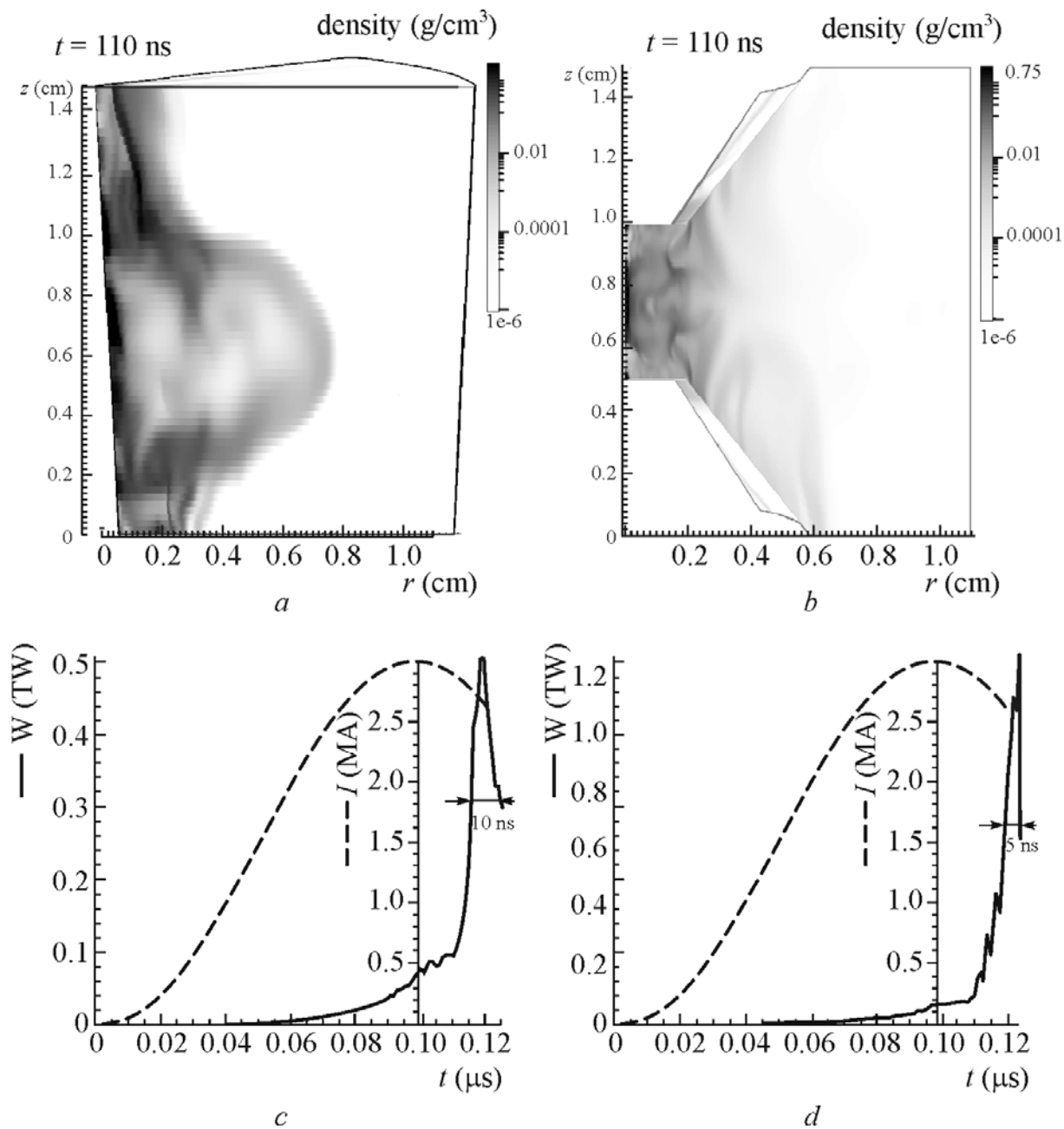


Рис.6. Распределение плотности плазмы в момент максимального сжатия (10 нс после максимума тока) и мощность излучения для профилированных по массе сборок с коническими (справа) и плоскими (слева) электродами

На рис. 6 приведены результаты моделирования для проволочных сборок с дополнительным напылением массы. Видны значительно более компактный центральный пинч и двукратное увеличение мощности излучения в конфигурации с коническими электродами.

Квазисферическое сжатие проволочной сборки достигается за счет перераспределения начальной массы проволок. Однако в конструкции с

плоскими электродами часть плазмы вытесняется в свободные области у катода и анода, при этом часть кинетической энергии уходит из центральной экваториальной области. При использовании электродов, имеющих форму усеченного конуса, достигается существенное увеличение плотности энергии сжатого пинча. Отставшая масса оказывается заметно меньше по сравнению с цилиндрическими и однородными квазисферическими лайнерами, что хорошо соответствует приведенным экспериментальным данным.

Выводы

Впервые экспериментально зарегистрировано увеличение плотности энергии мягкого рентгеновского излучения (МР-излучения) и концентрации ионов плазмы при сжатии пинча в центре КПЛ с профилированием линейной массы. Представлены результаты изучения пространственного распределения источников жесткого рентгеновского излучения (ЖР-излучение) на изображениях пинча при имплозии КПЛ из вольфрамовых проволок. Показано, что для таких нагрузок в центральной области КПЛ образуется сферический источник ЖР-излучения (>20 кэВ), расположенный симметрично относительно оси КПЛ. Приведены данные о пространственном распределении интенсивности спектра МР-излучения в центральной приосевой области КПЛ и на периферии лайнера по радиусу пинча при имплозии КПЛ из вольфрамовых проволок с применением спектроскопии с пространственным разрешением в диапазоне длин волн 20 – 400 Å. Обнаружено, что спектральная плотность МР-излучения (СП МР) пинча КПЛ и цилиндрических проволочных лайнеров (ЦПЛ) имеет максимум в диапазоне длин волн 50 - 150 Å. Средняя плотность энергии в плазме пинча при имплозии КПЛ в ~ 7 раз больше, чем при имплозии ЦПЛ при равной массе КПЛ и ЦПЛ и близких значениях разрядного тока в диапазоне от 2.4 до 3 МА.

Проведено моделирование трехмерной имплозии и генерации излучения для КПЛ с профилированием массы с помощью трехмерного РМГД кода MARPLE. Для вычислений использовались суперкомпьютеры К-100 (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН), МВС-100К (МСЦ РАН) и "Ломоносов" (НИВЦ МГУ). Исследованы различные конфигурации проволочных сборок. Изучалось влияние на процесс сжатия геометрии сборки и начального распределения массы. Моделирование показало, что специальный выбор формы электродов, конструкции сборки и распределения массы вдоль проволок позволяют получить компактный яркий источник в центре сборки. Увлеченные массы оказываются заметно меньше по сравнению с цилиндрическими и однородными квазисферическими лайнерами. Эти результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Мохов, В. Н. О возможности решения проблемы управляемого термоядерного синтеза на основе магнитогазодинамической кумуляции энергии / В.Н. Мохов [и др.] // ДАН СССР – 1979 – Т. 247, вып. 1. – С. 83–86.
2. Degnan, J. H. Electromagnetic Implosion of Spherical Liner / J. H. Degnan [et al.] // Physical Review Letters. – 1995 – Vol. 74, N 1 – P. 98–101.
3. Смирнов, В. П. Увеличение интенсивности излучения в квазисферической системе "двойной лайнер" / "dynamic-hohlraum" / В. П. Смирнов, С. В. Захаров, Е. В. Грабовский // Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики". – 2005. – Т. 81, № 9. – С. 556–562.
4. Nash, T. J. Design, simulation, and application of quasi-spherical 100 ns z-pinch implosions driven by tens of mega-amperes / T. J. Nash [et al.] // Physics of Plasmas. – 2005. – 12, 052705. – P. 052705-1–052705-9
5. Nash, T. – Quasi-Spherical Direct Drive Fusion Simulations for the Z Machine and Future Accelerators / T. Nash [et al.] // SANDIA Report. – 2007. – SAND2007-7178.
6. Грабовский, Е. В. Токовая имплозия квазисферических проволочных лайнеров / Е. В. Грабовский [и др.] // Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики". – 2009. – Т. 89, № 7. – С. 371–374.
7. Александров, В. В. Исследование характеристик имплозии квазисферических проволочных лайнеров на установке Ангара-5-1 при токе до 4МА / В. В. Александров [и др.] // Физика плазмы. – 2012. – Т. 38, № 4. – С. 345–349.
8. Ryutov, D. D. The physics of fast Z pinches / D. D. Ryutov, M. S. Derzon, M. K. Matzen // Reviews of Modern Physics. – 2000 – Vol. 72, N 1. – P. 167–223.
9. Haines, M. G. A review of the dense Z-pinch / M. G. Haines // Plasma Physics and Controlled Fusion– 2011 – Vol. 53, N 9. – P. 093001
10. Грабовский, Е. В. Использование конусных проволочныхборок для моделирования трехмерных эффектов МГД-сжатия / Е. В. Грабовский [и др.] // Физика плазмы. – 2008. – Т. 34, № 10. – С. 885–900.
11. Александров, В. В. Пространственно-временная структура и динамика рентгеновской эмиссии Z-пинча на основе проволочныхборок в области энергии квантов свыше 20 кэВ
12. Alexandrov, V. V. Shock wave production in plane lead targets under action of soft X-ray flux generated by Z-pinch plasma implosion and influence of attendant magnetic field and e-beams / V. V. Alexandrov [et al.] // Proceedings

- of the 13-th International Conference on High-Power Particle Beams – 2000. – P. 142–146.
13. Александров, В. В. Эмиссия жесткого рентгеновского излучения при сжатии многопроволочных лайнеров / В. В. Александров [и др.] // Физика плазмы. – 2008. – Т. 34, № 4. – С. 311–317.
 14. Волков, Г. С. Диагностика плазмы на установке Ангара-5-1 / Г.С.Волков [и др.] // ПТЭ. – 2008. – №2. – С. 74–81.
 15. Henke, B. L. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E=50-30000$ eV, $Z=1-92$ / B. L. Henke, E. M. Gullikson, and J. C. Davis // Atomic Data and Nuclear Data Tables – 1993. – Vol. 54, N 22. – P. 181–342. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://henke.lbl.gov/optical_constants/index.html
 16. Шевелько, А. П. ВУФ-спектроскопия плазмы, создаваемой в конечном анод-катодном промежутке сильноточного импульсного генератора "Z-Mashine" (SNL) / А. П. Шевелько [и др.] // Физика плазмы. – 2008. – Т. 34, № 11. – С. 1021–1032.
 17. Бессараб, А. В. Спектральная чувствительность фотопленки УФ-4 в области спектра 0,27-3 кэВ / А. В. Бессараб [и др.] // ПТЭ. – 2000. – №4. – С. 151–153.
 18. Митрофанов, К. Н. Особенности структуры излучающей области Z-пинча при сжатии пено-проволочных сборок на установке Ангара-5-1 / К. Н. Митрофанов [и др.] // Физика плазмы. – 2013. – Т. 39, № 1. – С. 51–76.
 19. Гасилов, В. А. Пакет прикладных программ MARPLE3D для моделирования на высокопроизводительных ЭВМ импульсной магнитоускоренной плазмы / В. А. Гасилов [и др.] // Математическое моделирование. – 2012. – Т. 24, № 1. – С. 55–87.
 20. Gasilov, V. Towards an Application of High-Performance Computer Systems to 3D Simulations of High Energy Density Plasmas in Z-Pinches. / V. Gasilov [et al.] // Applications, Tools and Techniques on the Road to Exascale Computing. IOS Press: Advances in Parallel Computing. – 2012. – Vol. 22. – P. 235-242.
 21. Никифоров, А.Ф. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы / А. Ф. Никифоров, В. Г. Новиков, В. Б. Уваров. — М: Физматлит, 2000. – 400 с.
 22. Александров, В. В. Динамика гетерогенного лайнера с затянутым плазмообразованием / В.В. Александров [и др.] // Физика плазмы. – 2001. – Т. 27, № 2. – С. 99–120.

Оглавление

Введение	3
Об увеличении плотности энергии в плазме пинча при трехмерном сжатии квазисферических проволочных лайнеров	5
Трехмерное моделирование квазисферических Z-пинчей на основе проволочныхборок	12
Выводы	15
Список литературы	16