

УДК 533.92

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ТОКОВОЙ ИМПЛОЗИИ КВАЗИСФЕРИЧЕСКИХ ЛАЙНЕРОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

В.В. Джангобегов, В.В. Александров, А.Н. Грицук, Е.В. Грабовский, К.Н. Митрофанов, А.А. Самохин

ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Москва, Троицк, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований токовой имплозии квазисферических лайнеров различной конструкции. Лайнеры обладали схожими геометрическими размерами, но при этом различались по выбранной основе (проволоки или капроновые волокна), диаметру и числу проволок, способу профилирования линейной массы (напыление или распыление), наличию вложенных сборок. У всех одиночныхборок линейная масса $m_l(x)$ имела распределение вдоль длины проволок, близкое к оптимальному распределению, которое задаётся законом $m_l(x) \sim \sin^{-1}(x)$. Предметом изучения были характеристики источника рентгеновского излучения на финальной стадии сжатия: максимальная амплитуда и ширина на полувысоте импульса рентгеновского излучения, размеры источника. С помощью представленных в настоящей работе экспериментальных результатов было установлено, что вольфрамовые квазисферические лайнеры вне зависимости от способа профилирования — напыление висмута на проволоки или распыление проволок в разряде — дают сопоставимые потоки мощности 1,7 и 1,8 ТВт/см² соответственно. Большее значение потока мощности 3,0 ТВт/см² было получено в экспериментах со сборками из капрона с напылённым висмутом. При этом в экспериментах с лайнерами, изготовленными с применением технологии напыления, удалось достигнуть более компактного сжатия вещества в радиальном направлении по сравнению со сборками, профилирование линейной массы которых осуществлялось с помощью распыления. В свою очередь, применение вложенных квазисферическихборок позволило получить в результате трёхмерной имплозии в несколько раз больший поток мощности (14,7 ТВт/см²) даже в отсутствие профилирования линейной массы вдоль высоты.

Ключевые слова: диагностика плазмы, Z-пинч, многопроволочный лайнер, мощный импульсный генератор тока.

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF X-RAY SOURCES AT THE CURRENT IMPLOSION OF QUASI-SPHERICAL WIRE ARRAYS OF VARIOUS DESIGNS

V.V. Dzhangobegov, V.V. Aleksandrov, A.N. Gritsuk, E.V. Grabovskii, K.N. Mitrofanov, A.A. Samokhin

SRC RF Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Moscow, Troitsk, Russia

Results of experimental investigations of the current implosion of quasi-spherical wire arrays of various designs are presented. The wire arrays had similar geometric dimensions, but differed in their chosen base (wire or capron fibers), diameter and number of wires, a method for profiling the linear mass (thermal vacuum deposition of heavy metal or cathode sputtering), the existence of nested arrays. In all the single assemblies, the linear mass $m_l(x)$ had a distribution along the length of the wires, close to the optimal one, which is given by the law $m_l(x) \sim \sin^{-1}(x)$. The objects of the investigation were the characteristics of the X-ray source at the final stage of implosion: the maximum amplitude and full width at half maximum of the X-ray pulse as well as the size of the source. On the basis the experimental results presented in this paper, it was established that tungsten quasi-spherical wire arrays, regardless of the method of profiling — whether deposition of bismuth on wires or sputtering of wires in a discharge — give comparable values of the specific X-ray flux (SXRPF) of 1.7 and 1.8 TW/cm², respectively. A larger value of the SXRPF of 3.0 TW/cm² was obtained in experiments with arrays of capron fibers with deposited bismuth. In experiments with arrays fabricated using thermal vacuum deposition technology, it was possible to achieve a more compact compression of the substance in the radial direction compared to the assemblies in which linear mass profiling was carried out by sputtering of wires. In turn, the use of nested quasi-spherical assemblies made it possible to obtain several times more SXRPF (14.7 TW/cm²), as a result of three-dimensional implosion, even in the absence of profiling of the linear mass along the wire length.

Key words: plasma diagnostics, Z-pinch, quasi-spherical wire array, high pulse current generator.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-2-23-33

ВВЕДЕНИЕ

Расчётно-теоретические и экспериментальные исследования процессов, происходящих в веществе, и изменение его свойств при импульсном вводе энергии высокой плотности дают необходимые основы для получения новых знаний в широкой области науки от проблемы УТС на Земле до моделирования космических явлений в астрофизике. Для создания высокой плотности энергии в веществе применяются импульсные энергетические драйверы, которые используют потоки энергии, генерируемые мощными лазерными пучками [1], ускорителями заряженных частиц [2] и Z-пинчевыми источниками интенсивного рентгеновского излучения [3—7].

Z-пинчевые энергетические драйверы основаны на преобразовании энергии мощного электрического импульса тока в энергию рентгеновского импульса с меньшей длительностью относительно длительности электрического импульса разрядного тока, формирующего Z-пинч. Увеличение мощности выходного импульса рентгеновского излучения пинча достигается за счёт сокращения его длительности в процессе трансформации кинетической энергии массы вещества Z-пинчевой нагрузки в тепловую энергию плотной высокотемпературной плазмы, которая создаётся из вещества нагрузки в процессе её токовой имплозии.

Эффективность трансформации кинетической энергии плазмы в энергию её собственного теплового излучения зависит от скорости движения ионов плазменного потока и его плотности, которые достигаются перед стагнацией в момент столкновения встречных потоков плазмы в приосевой области пинча. Температура и плотность плазмы зависят от степени сжатия плазмы пинча. Степень сжатия плазмы определяется геометрией сходящихся плазменных потоков. При центрально-симметричном магнитном сжатии полых цилиндрических сборок степень сжатия плазмы, созданной в её объёме, возрастает пропорционально $(1/r_f)^2$, где r_f — конечный радиус сжатия плазмы. При осесимметричном магнитном сжатии полых квазисферических сборок степень сжатия созданной в их объёме плазмы возрастает пропорционально $(1/r_f)^3$, увеличивая плотность внутренней энергии плазмы. При цилиндрическом сжатии индуктивность нагрузки начального радиуса r_0 изменяется как $\ln(r_0/r_f)$, в то время как при сферическом сжатии индуктивность зависит от радиуса по линейному закону. Следовательно, при заданном импульсе тока напряжение на камере при имплозии цилиндрического лайнера будет больше по сравнению со случаем квазисферического лайнера при таких же параметрах сжатия примерно в $\ln(r_0/r_f)/(r_0 - r_f)$ раз. Аналогичным будет соотношение для магнитной энергии, содержащейся в камере с указанными нагрузками. Тогда плотности кинетической энергии при сжатии квазисферического и цилиндрического лайнеров одного и того же начального радиуса r_0 при одинаковом импульсе тока и значении финального радиуса сжатия r_f будут соотноситься приблизительно как

$$\frac{\varepsilon_{\text{сф}}}{\varepsilon_{\text{цил}}} \propto \frac{r_0 - r_f}{r_f \ln(r_0 / r_f)}. \quad (1)$$

В этом случае при соотношениях начального радиуса к радиусу финального сжатия $r_0/r_f = 5\text{—}10$ для сферического сжатия выигрыш в величине потока энергии будет примерно в 2,5—4 раза.

В работе [8] приведены данные расчётно-теоретического моделирования имплозии сферической термоядерной мишени непрямого облучения с применением для её облучения схемы динамического рентгеновского хольраума, стенки которого нагревались под воздействием потоков энергии и плазмы, генерируемых источником на основе имплозии квазисферической двухкаскадной вложенной сборки. Результаты экспериментальных исследований токового сжатия в режиме Z-пинчевого разряда квазисферических проволочных сборок приведены в работах [9—12].

Цель данной работы состояла в следующем:

— проведение экспериментов по токовой имплозии образцов квазисферических лайнеров при амплитуде тока до 3 МА;

— сопоставление характеристик, полученных в результате использования источников мягкого рентгеновского излучения для лайнеров, имеющих схожие геометрические параметры, но различающихся по составу в зависимости от выбранного числа проволок или волокон, их диаметра, а также способа профилирования линейной массы.

О МЕТОДЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ СБОРОК С ПРОФИЛИРОВАННОЙ МАССОЙ

В случае квазисферического плазменного лайнера, по которому протекает ток, сжимающее его давление различно по поверхности на разных расстояниях от оси лайнера (рис. 1).

Очевидно, что при однородном распределении массы единицы поверхности по высоте лайнера вещество из полюсов сферы будет двигаться с большим ускорением, чем

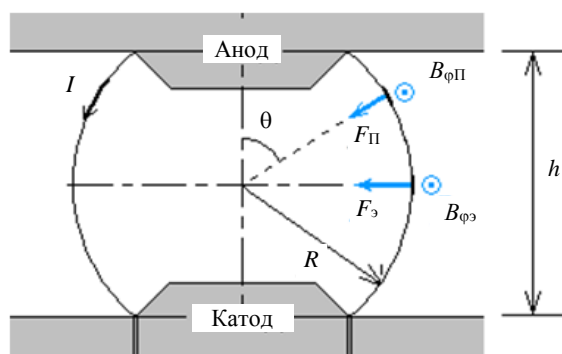


Рис. 1. Схематичное изображение квазисферической оболочки и действующих на неё сил при токовом сжатии: нижний индекс П означает полюс, Э — экватор

вещество из экваториальной области сферы. Таким образом, для осуществления сферически-симметричного токового сжатия необходимо такое профилирование массы лайнера, чтобы масса единицы поверхности на экваторе была меньше, чем на полюсах. Согласно нульмерной модели такой профиль массы единицы поверхности должен меняться по пологоидальному углу θ как

$$m_s(\theta) \sim \sin^2\theta. \quad (2)$$

Одним из начальных вариантов плазмообразующей нагрузки для квазисферического сжатия может служить проволочный лайнер. Тогда, как можно видеть на рис. 1, длина проволок лайнера l превышает высоту межэлектродного зазора узла установки h . У изначально цилиндрического лайнера высотой l , размещённого на мишенном узле установки высотой h , проволоки висят в свободном состоянии. Для того чтобы они растягивались по сферической поверхности, применяется электростатическое растяжение с помощью дополнительного спирального электрода, который располагают посередине высоты зазора [9]. Радиус квазисферы при этом задаётся диаметром электродов D и высотой зазора h , исходя из которых, подбирается высота лайнера l (или длина проволок).

У проволочных лайнеров в качестве характеристики выступает m_l — масса единицы длины (линейная масса). Для квазисферического проволочного лайнера (КПЛ), созданного на основе изначально цилиндрического лайнера диаметром D и длиной проволок l , пологоидальный угол меняется в пределах $\theta_0 \leq \theta \leq \pi - \theta_0$, где $\theta_0 = \arcsin(D/2R)$. Тогда условие (2) для распределения линейной массы КПЛ может быть представлено в виде

$$m_l(x) \sim \sin^{-1}(x/R + \theta_0), \quad 0 \leq x \leq l \quad (3)$$

или для диаметра проволоки на случай однородного по составу лайнера

$$d(x) \sim \sin^{-1/2}(x/R + \theta_0), \quad 0 \leq x \leq l. \quad (4)$$

Очевидно, что для создания лайнеров с таким начальным распределением линейной массы требуется либо наносить дополнительную массу на приэлектродные области проволок лайнера, либо удалять вещество посередине высоты лайнера. Оба метода были успешно реализованы в ГНЦ РФ ТРИНИТИ. Первый из них заключался в напылении металла на проволоки или капроновые волокна вдоль их высоты. Отработанная методика вакуумного термического напыления позволила напылять нужную массу легкоплавкого металла на заданные участки проволок [10—12]. Другой метод основан на катодном распылении проволок в тлеющем разряде, что позволило изготавливать однородные по составу лайнеры с профилированной массой [13, 14]. Технология профилирования линейной массы была отработана для цилиндрическихборок, состоящих из 16 проволок диаметром 13,2 мкм и из 30 проволок диаметром 9 мкм каждая (рис. 2, а, б), в обоих случаях диаметр сборки составлял 12 мм, материалом проволок являлся вольфрам.

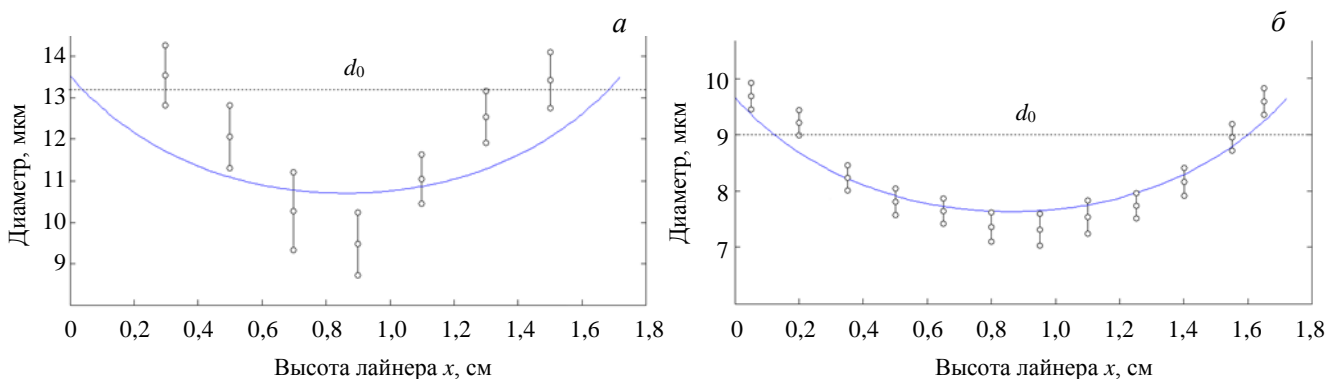


Рис. 2. Усреднённый профиль лайнера из 16 вольфрамовых проволок с начальным диаметром $d_0 = 13,2 \pm 0,3$ мкм после распыления в разряде (а) и из 30 вольфрамовых проволок с начальным диаметром $d_0 = 9,0 \pm 0,2$ мкм после распыления в разряде (б): синим цветом показана кривая, соответствующая выражению (4)

Помимо профилирования начальной массы плазмообразующих нагрузок, существенным является использование конических вставок-электродов с целью осуществления более эффективного вклада энергии генератора установки в работу по трёхмерному сжатию плазмы и, как следствие, достижения лучших параметров импульса мягкого рентгеновского излучения. Результаты экспериментов, приведённые в работах [11, 12], подтвердили важность применения конических электродов.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

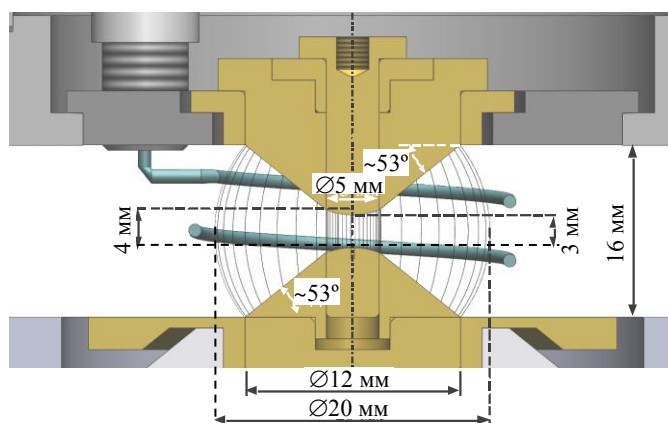


Рис. 3. Схема расположения двойного квазисферического лайнера в межэлектродном зазоре выходного узла установки Ангара-5-1

Были проведены эксперименты по токовому сжатию вольфрамовых квазисферических лайнеров с профилированной линейной массой на установке Ангара-5-1. Для сравнения были также проведены эксперименты с квазисферическими нагрузками других типов — были взяты проволочные и волоконные лайнеры с напылением дополнительной массы висмута для создания профиля линейной массы, близкого к оптимальному, а также двойные лайнеры — сборки, в которых цилиндрический лайнер малого диаметра помещался внутри квазисферического лайнера (рис. 3). Лайнеры с напылением висмута для подавления зиппер-эффекта [10] имели диаметр 12 мм у катода и 8 мм у анода, при этом у катода на проволоки была напылена меньшая масса,

чем у анода. В остальных случаях квазисферические нагрузки имели диаметр 12 мм у обоих электродов. Параметры сборки приведены в таблице.

Параметры лайнеров, использованных в экспериментах

Тип сборки, диаметр сборки у электродов D	Число проволок/волокон, их начальный диаметр d_0	Параметры профилирования
Вольфрамовый лайнер с профилированной массой, $D = 12$ мм	16 W проволока, $d_0 = 13,2$ мкм	По высоте x : $m(x) = \rho_w \pi d^2(x)$, где $d(x)$ — см. рис. 2, а; ρ_w — плотность вольфрама
Вольфрамовый лайнер с профилированной массой, $D = 12$ мм	30 W проволока, $d_0 = 9,0$ мкм	По высоте x : $m(x) = \rho_w \pi d^2(x)$, где $d(x)$ — см. рис. 2, б; ρ_w — плотность вольфрама
Вольфрамовый лайнер с напылением висмута:	30 W проволока, $d_0 = 6,0$ мкм	$m_l = 165$ мкг/см, вольфрам + напыление висмута:
$D = 8$ мм у анода		74 мкг/см на 4,5 мм у катода
$D = 12$ мм у катода		132 мкг/см на 4,5 мм у анода
Волоконный лайнер с напылением висмута:	30 капроновых нитей, $d_0 = 25$ мкм	Напыление висмута:
$D = 8$ мм у анода		204 мкг/см на 4,5 мм у катода
$D = 12$ мм у катода		330 мкг/см на 4,5 мм у анода
Вложенная вольфрамовая сборка, $D_{\text{внеш}} = 12$ мм, $D_{\text{внутр}} = 5$ мм	40 W проволока, $d_0 = 6,0$ мкм + + 40 W проволока, $d_0 = 6,0$ мкм	$m_l = m_0 = 220$ мкг/см

Процесс сжатия плазмы квазисферической сборки и размер источника мягкого рентгеновского излучения (МРИ) регистрировались с помощью рентгеновских камер (регистраторы СХР6 и РЭОП), расположенных в горизонтальном направлении и под углом 30° к вертикали, и интегральной по времени камеры-обскуры. Для получения более полной информации о размерах излучающего пинча также применялся спектрограф скользящего падения типа GIS, позволяющий регистрировать спектр в диапазоне длин волн $20\text{--}400 \text{ \AA}$ с пространственным разрешением в направлении, перпендикулярном оси пинча [15]. Мощность и энергия МРИ регистрировались с помощью четырёх вакуумных рентгеновских диодов (ВРД) за различными фильтрами. Производная тока через лайнер dI/dt измерялась с помощью восьми петель, каждая из которых размещалась на радиусе 42 мм от оси цилиндрической нагрузки по направлению к соответствующему модулю. Сигналы с петель аппаратно усреднялись по восьми модулям.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первые эксперименты были осуществлены с лайнером из 16 вольфрамовых проволок, изначальный диаметр которых составлял 13,2 мкм по всей длине, а после расплытия в разряде имел профиль, аналогичный показанному на рис. 2, *а*. Результаты эксперимента представлены на рис. 4.

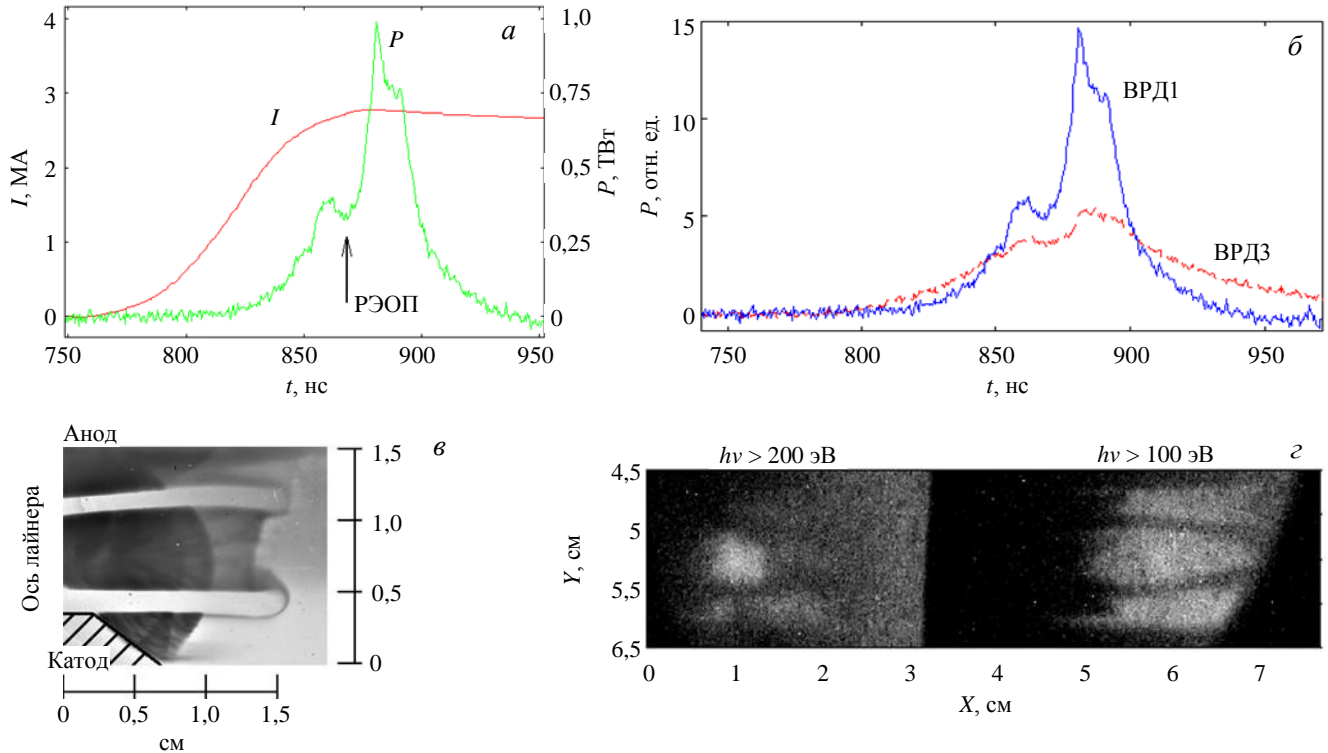


Рис. 4. Результаты эксперимента по токовому сжатию квазисферического лайнера типа 1: *а* — временные профили тока и мощности рентгеновского излучения; *б* — сигналы детекторов рентгеновского излучения ВРД1 и ВРД3; *в* — изображение сжимающегося лайнера, полученное с интегральной камеры-обскуры в рентгеновских квантах >20 эВ; *г* — кадры, полученные с помощью рентгеновской камеры РЭОП за различными фильтрами излучения, момент срабатывания камеры отмечен стрелкой на рис. 4, *а*

На сигнале рентгеновского излучения, полученного с помощью датчика ВРД1, можно видеть два максимума. Первый из них, очевидно, соответствует сжатию вещества из заметно более «лёгких» экваториальных областей, причём этот максимум наблюдается чуть раньше максимума тока. Через 20 нс происходит сжатие основной массы лайнера, мощность рентгеновского излучения во втором максимуме в 2,5 раза выше, чем в первом: 1 ТВт против 0,4 ТВт — восстановленная мощность по сигналам ВРД [16]. При этом отношение амплитуд сигналов датчиков ВРД3 и ВРД1 в первом пике заметно выше, чем во втором пике (см. рис. 4, *б*). Так как ВРД3 по сравнению с ВРД1 чувствителен к более высокоэнергичным квантам, это говорит о том, что первый максимум излучения вызван более жёсткими рентгеновскими квантами. В подтверждение сказанного на изображении, зарегистрированном рентгеновской камерой РЭОП в момент времени между двумя максимумами излучения, можно видеть образование в центре сборки, наиболее интенсивно излучающее в квантах с энергией >200 эВ (см. рис. 4, *г*). Также рентгеновские изображения лайнера в данном выстреле (РЭОП, интегральная камера-обскура) показывают, что, хотя плазма из проволок двигалась по направлению к центру (направление движения плазменных струй отчётливо видно на рис. 4, *в*), сжатие было несимметричным. Причиной тому, вероятно, послужили выбранное изначально распределение линейной массы лайнера и относительно большая общая масса лайнера (около 570 мкг). Кроме того, лайнер состоял из относительно небольшого числа проволок, что также сказывается на качестве сжатия.

Несколько иная картина наблюдается при сжатии вольфрамового квазисферического лайнера из 30 проволок с профилем, аналогичным приведённому на рис. 2, *б* (см. таблицу, тип 2). Общая масса та-

кого лайнера на 40 мкг меньше, однако лайнер состоит из большего числа проволок, к тому же распределение массы лайнера соответствует такому распределению, которое было бы необходимо для осуществления самоподобного сжатия согласно нульмерной модели. В эксперименте, описанном в работе [14], была получена максимальная амплитуда импульса рентгеновского излучения, которая составила 1,3 ТВт при длительности импульса на полувысоте 16 нс. В других экспериментах с помощью рентгеновской камеры СХР-6 удалось пронаблюдать картину сжатия лайнера. Как видно по изображениям на рис. 5, в, в данном эксперименте кольца растягивающего электрода в межэлектродном зазоре оказались чуть выше оптимального, из-за чего была несколько нарушена симметричность сборки, а изображение центральной части лайнера оказалось частично перекрыто. На изображениях, полученных с помощью СХР-6, отчетливо наблюдается влияние зиппер-эффекта: на кадре, сделанном в момент времени $t_2 = 847,5$ нс, помимо формирования пинча в центре квазисферы, видна небольшая интенсивно излучающая область вблизи конуса катода. Через 10 нс (кадр, сделанный в момент времени $t_3 = 857,5$ нс) происходит разрушение этого «прикатодного пинча», в то время как основная часть имплодирующей плазмы собирается в центре квазисферы. Примерно через 3 нс ВРД зарегистрирована пиковая мощность излучения, составившая 0,9 ТВт. По радиальному профилю яркости пинча, полученному из обработки кадра в момент времени t_3 (см. рис. 5, б), радиальный размер источника излучения оценивается как ширина профиля на полувысоте — в данном случае 4,9 мм. Аналогичным образом оценивая размер объекта в центре изображения вдоль вертикальной оси 2,0 мм и делая поправку на то, что оставшаяся его часть перекрыта растягивающим кольцом шириной 1,3 мм, можно оценить вертикальный размер пинча как 3,3 мм. Считая пинч цилиндрическим, получаем оценку плотности потока мощности рентгеновского излучения для данного эксперимента величиной 1,8 ТВт/см².

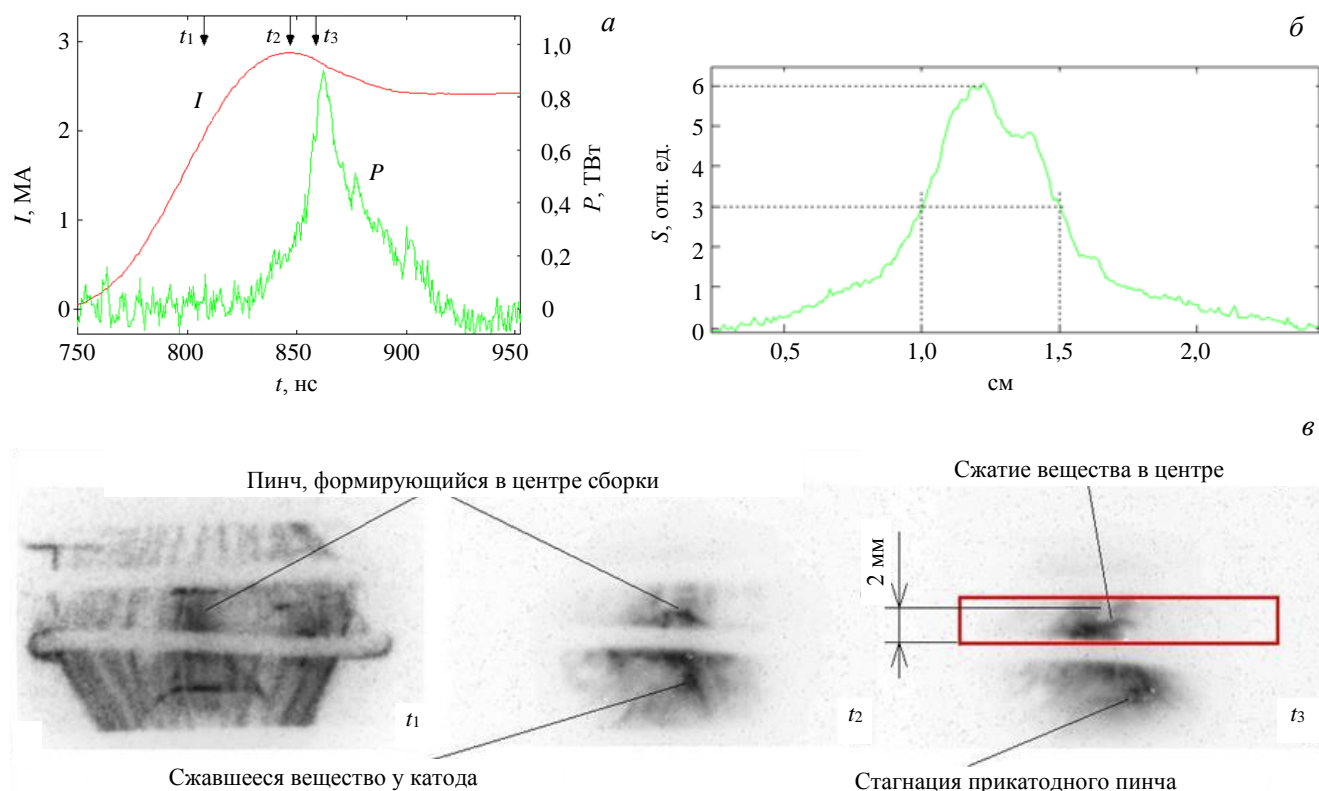


Рис. 5. Результаты эксперимента с квазисферической нагрузкой типа 2: а — временные профили тока и мощности рентгеновского излучения; б — результат обработки фрагмента (выделен прямоугольником на рис. 5, в), изображения пинча на третьем кадре: радиальный профиль яркости изображения; в — изображения сжимающегося лайнера, полученные с помощью рентгеновской камеры СХР-6. Время регистрации кадров отмечено стрелками на рис. 5, а

В эксперименте с квазисферическим лайнером, начальное распределение массы которого было сформировано путём напыления висмута на приэлектродные области (см. таблицу, тип 3), максимальная мощность импульса рентгеновского излучения составила 0,6 ТВт при ширине импульса на полувысоте 21 нс (рис. 6, а). Радиальный размер источника излучения согласно оценке по его интегральному изображению, зарегистрированному в квантах >120 эВ (рис. 6, в), составил приблизительно 2,5 мм. В то же время финальный Z-пинч заметно вытянут вдоль вертикальной плоскости — высота интенсивно светящегося объекта на рентгеновском изображении примерно равна расстоянию между кольцами растягивающего электрода 4,5 мм. На изображении пинча также обращает на себя внимание «перетяжка» посередине между кольцами растягивающего электрода. Упомянутые обстоятельства указывают на неравномерное сжатие плазмы к центру лайнера.

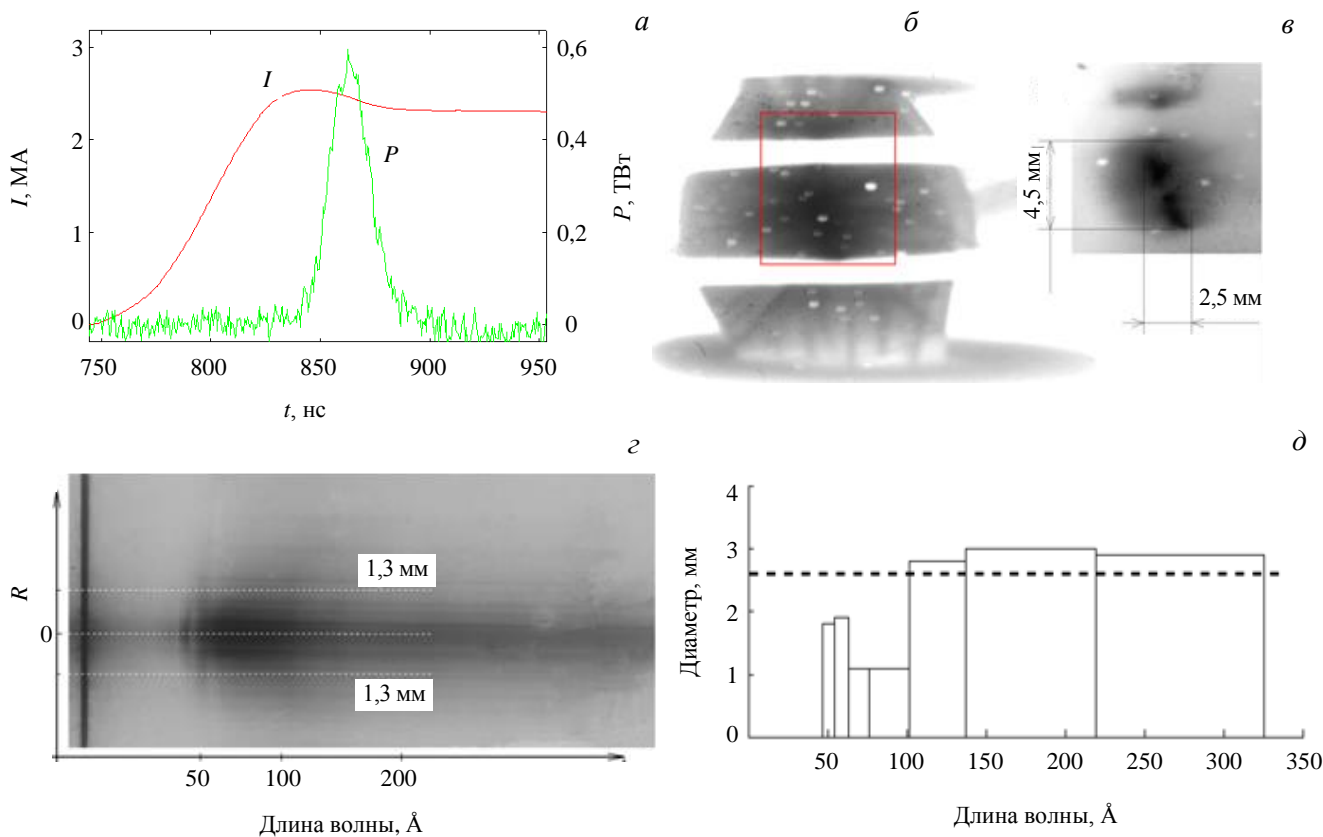


Рис. 6. Результаты эксперимента с квазисферической нагрузкой типа 3: а — временные профили тока и мощности рентгеновского излучения; б, в — изображения источника рентгеновского излучения, полученные с помощью интегральной камеры-обскуры, в квантах >20 эВ, в квантах >120 эВ соответственно; на рис. 6, б красным обведён фрагмент, соответствующий изображению на рис. 6, в; г — изображение рентгеновского спектра, полученное с помощью GIS-спектрографа; д — спектральная зависимость диаметра пинча, рассчитанная по данным спектральных измерений

Оценка размера пинча также производилась по зарегистрированному спектру с пространственным разрешением (см. рис. 6, г) — по методу, описанному в работе [12], определялся диаметр источника излучения в зависимости от длины волны для диапазона 40—350 Å (соответствует энергии квантов в диапазоне 50—250 эВ), откуда был вычислен средневзвешенный диаметр источника (см. рис. 6, д). В рассматриваемом случае он составил 2,6 мм. Таким образом, предполагая источник цилиндрическим, получим примерное значение плотности потока мощности примерно 1,7 ТВт/см² для данного эксперимента.

При сжатии квазисферического лайнера из металлизированных висмутом капроновых волокон с аналогичным профилем линейной массы напылённого висмута (см. таблицу, тип 4) наблюдалась схожая картина имплозии. Зарегистрированный импульс рентгеновского излучения имеет форму, аналогичную

форме импульса, который был получен в описанном эксперименте при близком значении длительности на полувысоте 19,8 нс (см. рис. 7 *а*). Излучающий пинч, как видно на интегральном изображении в квантах энергии >20 эВ (см. рис. 7, *б*), вдоль вертикальной оси занимает значительную часть зазора между коническими электродами-вставками (около 5,5 мм), его средний диаметр, полученный из результатов

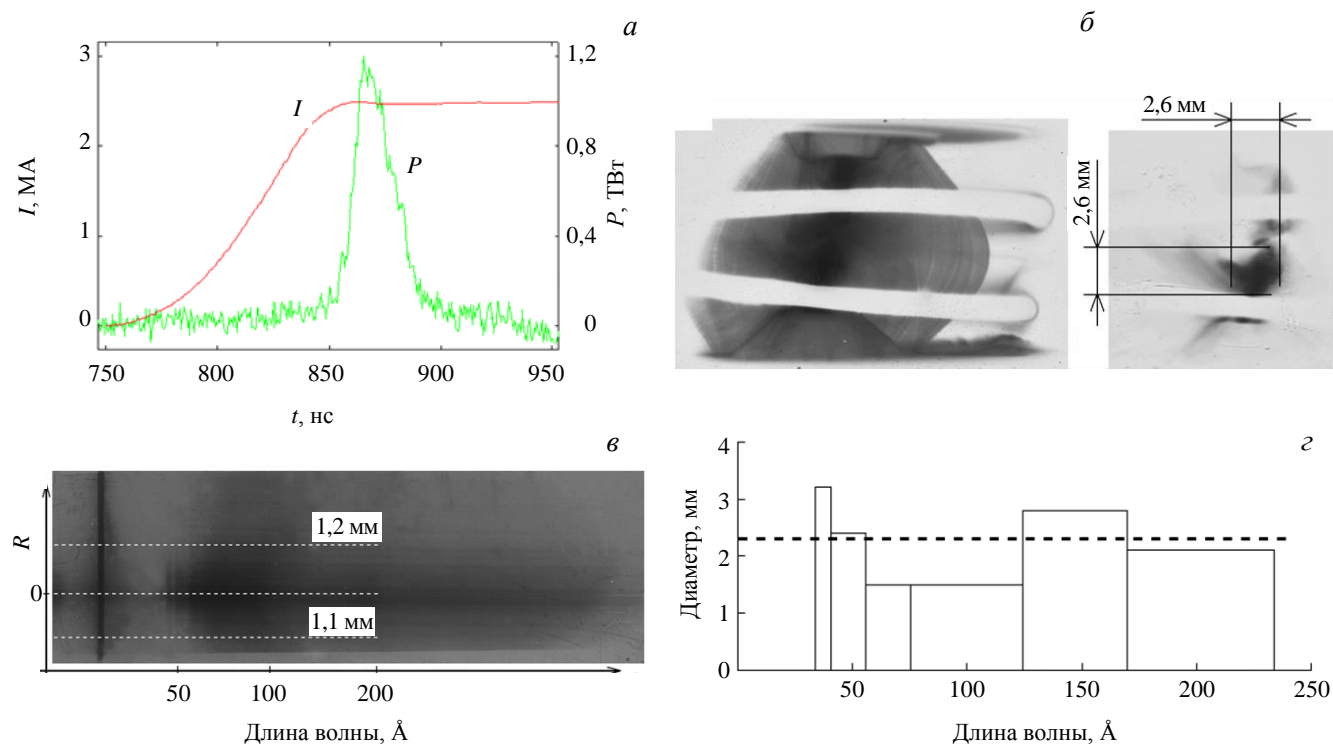


Рис. 7. Результаты эксперимента с квазисферической нагрузкой типа 4: *а* — временные профили тока и мощности рентгеновского излучения; *б* — изображения источника рентгеновского излучения, полученные с помощью интегральной камеры-обскуры: слева в квантах >20 эВ, справа — в квантах >600 эВ; *в* — изображение рентгеновского спектра, полученное с помощью GIS-спектрографа; *г* — спектральная зависимость диаметра пинча, рассчитанная по данным спектральных измерений

спектральных измерений в данном эксперименте, составил 2,3 мм, как и в эксперименте с вольфрамово-висмутовым лайнером. Однако была зарегистрирована вдвое большая максимальная мощность рентгеновского излучения 1,2 ТВт, следовательно, с учётом указанных размеров излучающего объекта оценка потока мощности даёт величину 3,0 ТВт/см². Более высокая мощность излучения, а также наличие наиболее горячей области в центре квазисферы (на изображении в квантах >600 эВ на рис. 7, *б* хорошо заметен шарообразный объект размером 2,6 мм) свидетельствуют о более симметричном и компактном сжатии нагрузки из металлизированных висмутом волокон по сравнению с лайнером из вольфрама с напылением висмута. Вероятно, на синхронности сжатия вольфрамово-висмутового лайнера негативно сказываются заметно различающиеся скорости плазмообразования составляющих его веществ [17]. В данной связи следует отметить, что для квазисферических лайнеров, сформированных из коническихборок диаметром 12 мм у катода и 8 мм у анода, с висмутовым напылением при общей массе металлического вещества 360—400 мкг время сжатия (время от начала тока до максимума рентгеновского излучения) при токе амплитудой 2,5—3 МА по статистике в среднем составляет 119 ± 3 нс. Примерно таким же значением характеризуется время сжатия вольфрамовых квазисферических лайнеров с профилированной массой при общей массе 530 мкг, что почти в 1,5 раза больше общей массыборок с напылением в сравниваемых экспериментах. Помимо вещественного состава лайнера, возможно, свою роль сыграли следующие обстоятельства: вольфрамово-висмутовый лайнер имел изначально несколько вытянутую вдоль вертикальной оси форму, а жёсткие вольфрамовые проволоки заметно хуже растягиваются под действием электростатического поля по сравнению с гибкими металлизированными волокнами.

В эксперименте по сжатию вложенной сборки (см. таблицу, тип 5) был получен импульс рентгеновского излучения максимальной амплитудой 2,5 ТВт и шириной на полувысоте 15 нс. На рис. 8, б представлены изображения лайнера в различные моменты сжатия, зарегистрированные с помощью камеры СХР-6: плазмообразование ($t_1 = 853,4$ нс), момент максимума тока, совпадающий с началом фронта рентгеновского импульса ($t_2 = 893,4$ нс), и момент за 2,7 нс до максимума рентгеновского излучения ($t_3 = 908,4$ нс). На третьем кадре отчетливо виден интенсивно излучающий объект: светящаяся выступающая поверхность катода внутреннего лайнера и наиболее горячая область пинча, радиальный размер

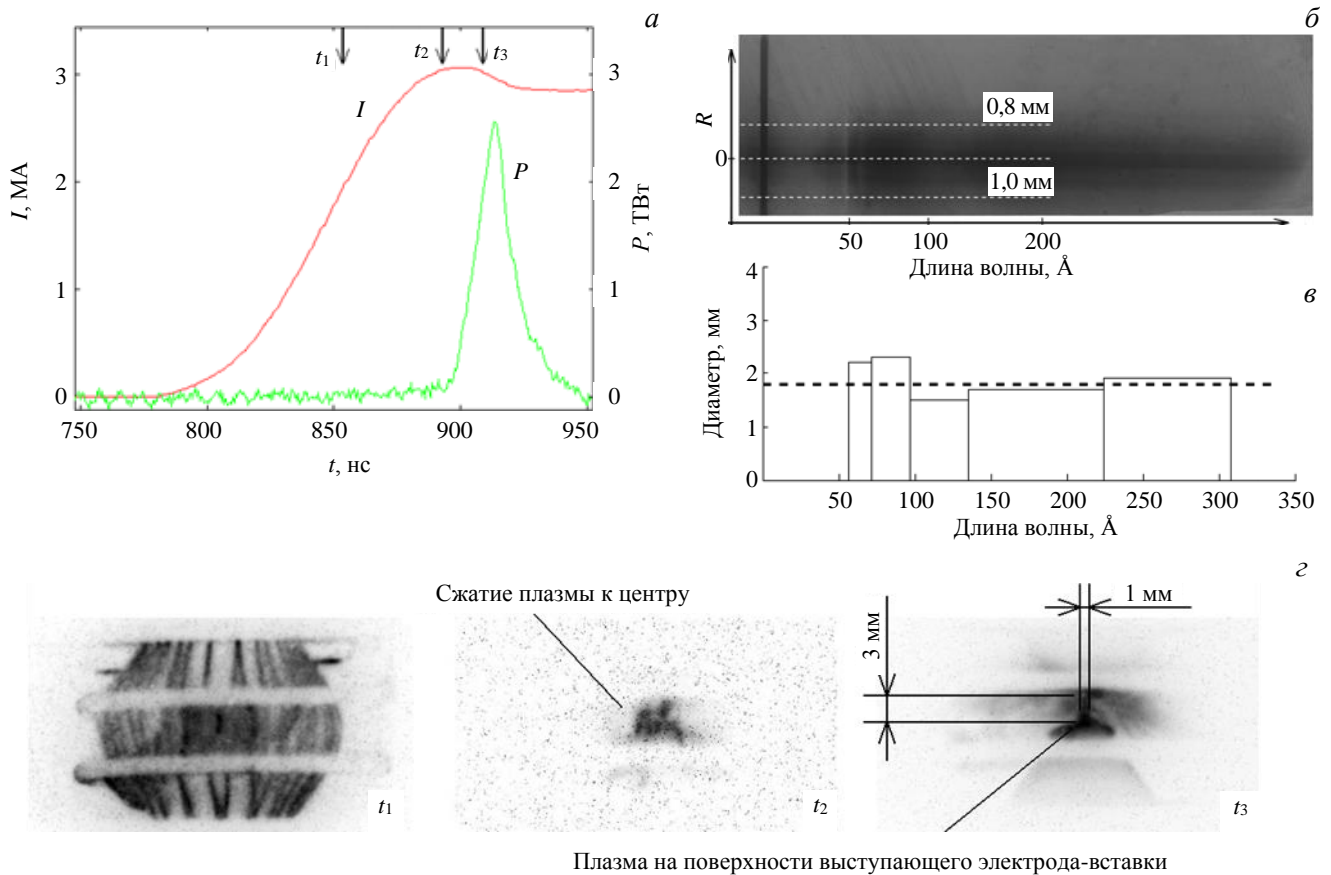


Рис. 8. Результаты эксперимента с квазисферической нагрузкой типа 5: *a* — временные профили тока и мощности рентгеновского излучения; *б* — изображение рентгеновского спектра, полученное с помощью GIS-спектрографа; *в* — спектральная зависимость диаметра пинча, рассчитанная по данным спектральных измерений; *г* — изображения сжимающегося лайнера, полученные с помощью рентгеновской камеры СХР-6. Время регистрации кадров отмечено стрелками на рис. 8, *a*

которой составляет около 1 мм, высота ≈ 3 мм. Спектральные измерения в данном эксперименте (см. рис. 8, в) позволили оценить средний размер пинча (см. рис. 8, г), примерно равный 1,8 мм. Для цилиндрического источника с таким диаметром и высотой 3 мм поток мощности излучения составляет $14,7$ ТВт/см², что на порядок превосходит величины потоков мощности, полученные при квазисферическом сжатии лайнеров с оптимальной профилированной массой. Полученные результаты свидетельствуют о том, что за счёт стабилизирующего неустойчивости эффекта соударения внешнего и внутреннего каскадов вложенной сборки [18] удаётся добиться достаточно компактного квазисферического сжатия вещества даже несмотря на отсутствие профилирования массы по высоте лайнера.

ВЫВОДЫ

Проведено измерение характеристик излучения в момент максимального сжатия квазисферических лайнеров со схожими геометрическими параметрами, различающихся по составу в зависимости от выбора основы (проволоки или органические волокна), диаметра проволок, способа профилирования линейной массы. Результаты экспериментов показали, что вольфрамовые квазисферические лайнеры вне

зависимости от способа профилирования — напыление висмута на проволоки или распыление проволок в разряде — дают сопоставимые потоки мощности 1,7 и 1,8 ТВт/см² соответственно. Большее значение потока мощности 3,0 ТВт/см² было получено в экспериментах со сборками из капрона с напылённым висмутом. При этом в экспериментах с лайнерами, изготовленными с применением технологии напыления, удалось достигнуть более компактного сжатия вещества в радиальном направлении по сравнению со сборками, профилирование линейной масса которых осуществлялось с помощью распыления. Наиболее вероятно, что данное обстоятельство связано с негативным влиянием на сжатие отставшей массы, которое заметно проявляется у лайнеров, изготовленных с помощью распыления — их общая масса составляла 530—570 мкг, в то время как общая масса металла в лайнерах с напылённым висмутом была 370—390 мкг. При этом линейная масса сборок во всех случаях имела распределение по высоте x , близкое к оптимальному и определяемое по закону $m_l(x) \sim \sin^{-1}(x/R)$.

Наибольшая плотность потока мощности была получена в экспериментах с двойными лайнерами, представляющими собой сборку, в которой цилиндрический лайнер помещён между коническими электродами-вставками внутри квазисферического лайнера, притом распределение линейной массы вдоль высоты проволок было однородным. Поток мощности рентгеновского излучения при сжатии такого двойного лайнера существенно превосходит (14,7 ТВт/см²) значения потоков мощности, полученных при сжатии одинарных квазисферических лайнеров с профилированной массой, имеющих тот же внешний диаметр и сопоставимую общую массу (410 мкг — общая масса внешнего каскада, 88 мкг — внутреннего).

Дальнейшее улучшение качества сжатия одинарных квазисферическихборок может быть связано с отработкой технологии распыления для лайнеров из более тонких вольфрамовых проволок (6 мкм и менее), что в настоящее время является не до конца решённой задачей. Другой путь — подбор оптимальной массы дляборок из органических волокон с напылённым металлом. В то же время результатами настоящей работы продемонстрировано значительное увеличение потока мощности при переходе к вложенным сборкам, в которых внешний лайнер является квазисферическим и имеет однородное распределение массы по высоте. Таким образом, более перспективной выглядит разработка технологии создания вложенных лайнеров с профилированным внешним и внутренним каскадом, что и станет целью дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность Г.М. Олейнику за ценные замечания при обсуждении результатов работы, В.А. Барсуку, С.Ф. Медовщикову, И.Н. Фролову и А.О. Шишлову за помощь при подготовке экспериментов, а также коллективу установки Ангара-5-1 за инженерно-техническое сопровождение экспериментов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-32-00913, № 16-02-00112 и № 16-02-00084.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lindl J.D., Amendt P., Berger R.L. et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility. — *Physics of Plasmas*, 2004, vol. 11, № 2, p. 339.
2. Van Devender J. et al. Light-ion fusion research in the USA. — In: Proc. of the 10th Intern. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. London, 12—19 Sept. 1984, vol. 3, p. 59.
3. Spielman R.B., Deeney C., Chandler G.A. et al. Tungsten wire-array Z-pinch experiments at 200 TW and 2 MJ. — *Physics of Plasmas*, 1998, vol. 5, № 5, p. 2105.
4. Xian-Bin Huang, Shao-Tong Zhou, Jia-Kun Dan et al. Preliminary experimental results of tungsten wire-array Z-pinch on primary test stand. — *Phys. Plasmas*, 2015, vol. 22, № 7, p. 072707.
5. Klir D., Shishlov A.V., Kokshenev V.A. et al. Characterization of neutron emission from mega-ampere deuterium gas puff Z-pinch at microsecond implosion times. — *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2013, vol. 55, p. 085012.
6. Селемир В.Д., Демидов В.А., Ермолович В.Ф. и др. Исследование генерации мягкого рентгеновского излучения в Z-пинчах с запиткой от спиральных взрывомагнитных генераторов. — *Физика плазмы*, 2007, т. 33, вып. 5, с. 424.
7. Митрофанов К.Н., Крауз В.И., Мялгон В.В. и др. Исследование имплозии многопроволочныхборок на установке ПФ-3. — *Физика плазмы*, 2014, т. 40, вып. 2, с. 134.
8. Смирнов В.П., Захаров С.В., Грабовский Е.В. Увеличение интенсивности излучения в квазисферической системе «двойной лайнер». — *Письма в ЖЭТФ*, 2005, т. 81, вып. 9, с. 556.
9. Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Смирнов В.П. и др. Токовая имплозия квазисферических проволочных лайнеров. — *Письма в ЖЭТФ*, 2009, т. 89, вып. 7, с. 371.

10. Александров В.В., Волков Г.С., Грабовский Е.В. и др. Исследование характеристик имплозии квазисферических проволочных лайнеров на установке Ангара-5-1 при токе до 4 МА. — Физика плазмы, 2012, т. 38, вып. 4, с. 345.
11. Александров В.В., Гасилов В.А., Грабовский Е.В. и др. Об увеличении плотности энергии в плазме пинча при трехмерном сжатии квазисферических проволочных лайнеров. — Физика плазмы, 2014, т. 40, вып. 12, с. 1057.
12. Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грицук А.Н. и др. Динамика сжатия квазисферических проволочных сборок с различным профилированием линейной массы. — Физика плазмы, 2016, т. 42, вып. 9, с. 813.
13. Джангобегов В.В. Оптимизация многопроволочных лайнеров для создания мощных источников мягкого рентгеновского излучения на основе Z-пинча. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Москва. 2015.
14. Грабовский Е.В., Джангобегов В.В., Олейник Г.М., Родионов Р.Н. Вольфрамовые квазисферические лайнеры с профилированной массой. — Ядерная физика и инжиниринг, 2014, т. 5, вып. 11—12, с. 986—989.
15. Gritsuk A.N., Aleksandrov V.V., Grabovskiy E.V. et al. Radiation anisotropy at the implosion of multiwire arrays. — IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, vol. 41, № 11, p. 3184.
16. Олейник Г.М., Браницкий А.В. Восстановление параметров спектра мягкого рентгеновского излучения по сигналам вакуумных рентгеновских диодов. — Приборы и техника эксперимента, 2000, вып. 4, с. 58.
17. Александров В.В., Митрофанов К.Н., Грицук А.Н. и др. Влияние интенсивности плазмообразования на динамику имплозии цилиндрических проволочныхборок с профилированной линейной массой. — Физика плазмы, 2013, т. 39, вып. 10, с. 905.
18. Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Митрофанов К.Н. и др. Исследование магнитных полей и излучения в Z-пинчах из двойных многопроволочныхборок. — Физика плазмы, 2006, т. 32, вып. 1, с. 33.



Владимир Викторович Джангобегов, к.ф.-м.н., м.н.с.; ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия
jvv88@triniti.ru



Владимир Васильевич Александров, к.ф.-м.н., заместитель директора отделения по науке; ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия
alexvv@triniti.ru



Аркадий Николаевич Грицук, к.ф.-м.н., н.с.; ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия
griar@triniti.r



Евгений Валентинович Грабовский, к. техн. н., лауреат Государственной премии Российской Федерации, директор отделения; ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия
angara@triniti.r



Константин Николаевич Митрофанов, к.ф.-м.н., в.н.с.; ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия
mitrofan@triniti.ru



Александр Анатольевич Самохин, к.ф.-м.н., в.н.с.; ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых вл. 12, Россия
samokhin@triniti

Статья поступила в редакцию 14 марта 2018 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, с. 23—33.