

УДК 533.9.082; 533.952

## ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ ОБЛАСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО Z-ПИНЧА, ОБРАЗОВАННОГО ПРИ ИМПЛОЗИИ МНОГОПРОВОЛОЧНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВОЛЬФРАМОВЫХ СБОРОК

*М.В. Хилько, Г.С. Волков, И.Н. Фролов, А.Н. Грицук*

*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва, Россия*

Для практического применения Z-пинчей в качестве источников мягкого рентгеновского излучения, а также для понимания физических процессов и явлений, происходящих в горячей плазме, удерживаемой магнитным полем собственного тока, возникает необходимость определить размеры излучающей области Z-пинча, а также его основные макроскопические параметры, такие, как концентрация ионов и электронов, давление и температура плазмы. В работе определялись параметры Z-пинчей, получаемых при имплозии многопроволочных вольфрамовыхборок с начальным диаметром 12 мм и погонной массой 220 мкг/см на сильноточном электрическом генераторе «Ангара-5-1». Средние поперечный и продольный размеры излучающей области сильноточного Z-пинча на финальной стадии его сжатия в диапазоне энергии квантов мягкого рентгеновского излучения 0,05—2,5 кэВ оказались равными  $1,2 \pm 0,4$  и  $12,0 \pm 0,7$  мм соответственно. На основе измеренных размеров излучающей области, значения скорости сжатия оболочки, мощности и длительности излучения Z-пинча были оценены его плотность и газокинетическое давление (на финальной стадии сжатия), которые оказались равными  $2 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>, 1 Мбар соответственно. По произведённым оценкам значения плотности пинча превышают плотность ускоренной оболочки в 20—30 раз. Значения, полученные в работе, соответствуют физике устойчивого сжатия пинча. Полученные изображения Z-пинча показывают, что центральная область Z-пинча состоит в основном из горячей плазмы, а вокруг неё присутствует холодное «плазменное гало», интенсивность излучения которого значительно ниже, чем в центральной области.

**Ключевые слова:** размеры, мощность, плотность, давление, Z-пинч, многопроволочная вольфрамовая сборка.

## MEASURING SIZES OF THE EMISSION REGION OF HIGH-CURRENT Z-PINCH FORMED BY THE IMPLOSION MULTIWIRED CYLINDRICAL TUNGSTEN ARRAY

*M. V. Khilko, G. S. Volkov, I. N. Frolov, A. N. Gritsuk*

*SC «SSC RF TRINITY», Troitsk, Moscow, Russia*

For practical application of Z-pinch as sources of soft X-rays, as well as for understanding the physical processes and phenomena occurring in the hot plasma confined by a magnetic field of its own current, it is necessary to determine the size of the emitting region of Z-pinch, and its main macroscopic parameters such as the ion and electron concentration, pressure and temperature of the plasma. The parameters of Z-pinch obtained under the implosion of multiwire tungsten arrays with an initial diameter of 12 mm and a weight per unit length of 220 μg/cm in the high-current electric generator «Angara-5-1» were measured. The average transverse and longitudinal sizes of the emitting region of high current Z-pinch in the final stage of their compression in the range of soft X-ray photon energy 0.05—2.5 keV were determined as  $1.2 \pm 0.4$  and  $12.0 \pm 0.7$  mm respectively. Z-pinch density and kinetic pressure (in the final stages of compression) were assessed on the basis of the sizes of the emitting region, the values of the Z-pinch shell radial compression speed and power and duration of the Z-pinch X-ray radiation. They were equal to  $2 \cdot 10^{-2}$  g/cm<sup>3</sup> and 1 Mbar respectively. An estimated value of the pinch density is 20—30 times greater than the density of the accelerated shell. The values obtained in this study correspond to the physics of steady implosion of the Z-pinch. The Z-pinch images show that the central region of a Z-pinch mainly consists of hot plasma. There is a cold «plasma halo» around it with the radiation intensity much lower than in the central region.

**Key words:** sizes, power, density, pressure, Z-pinch, tungsten multiwire array.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно исследуется имплозия многопроволочныхборок, ускоряемых давлением магнитного поля протекающего по ним тока. Эксперименты, выполненные в середине 1990-х годов на установках «Saturn-5» и «Z» (Лаборатория Сандиа, США) по имплозии многопроволочныхборок [1, 2], продемонстрировали принципиальную возможность сокращения до 3—5 нс длительности импульса мягкого рентгеновского излучения, возникающего при сжатии многопроволочныхборок. В экспериментах при сжатии вольфрамовых проволочныхборок получена рекордная мощность мягкого рентгеновского излучения свыше 240 ТВт, при полной энергии излучения — около 2 МДж. Существенно, что полученная мощность излучения в 3—4 раза превышает электрическую мощность, вкладываемую генератором в нагрузку.

В процессе имплозии многопроволочной сборки образуется сильноточный Z-пинч, который является мощным источником мягкого рентгеновского излучения. При этом наибольший практический

интерес представляет тепловое рентгеновское излучение с температурой свыше 300 эВ, поскольку именно оно используется для поджига термоядерных мишеней. Целью данной работы является измерение средних поперечных и продольных размеров излучающей области Z-пинча на финальной стадии его сжатия в диапазоне энергии квантов мягкого рентгеновского излучения от 50 эВ до 2,5 кэВ, в направлении, перпендикулярном его оси, а также провести оценку параметров получаемых Z-пинчей.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился на восьмимодульном импульсном генераторе «Ангара-5-1» [5, 8]. Сильноточные электрические импульсы по линиям с магнитной самоизоляцией подводились к общему вакуумному концентратору (откачиваемому до давления  $10^{-4}$  торр), содержащему межэлектродный промежуток (анод 2 и катод 3 на рис. 1), в который устанавливается нагрузка. В качестве нагрузки используется многопроволочная цилиндрическая вольфрамовая сборка длиной 1,5 см, состоящая из 40 проволочек толщиной 6 мкм, расположенных на диаметре 12 мм.

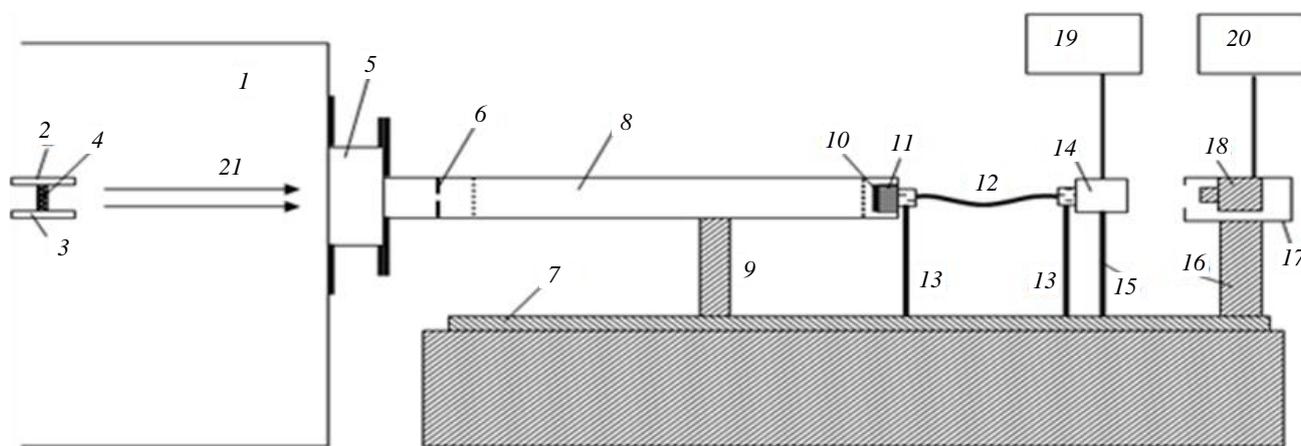


Рис. 1. Схема регистрирующей установки: 1 — вакуумная камера; 2 — анод; 3 — катод; 4 — Z-пинч; 5 — переходная труба; 6 — трубка с камерой-обскурой; 7 — рельс; 8 — удлиняющая труба; 9 — штатив удлиняющей трубы; 10 — сцинтиллирующая плёнка; 11 — фланец с волоконной шайбой; 12 — волоконный световод; 13 — крепление световода; 14 — кадровый электронно-оптический преобразователь; 15 — крепление электронно-оптического преобразователя; 16 — поворотный столик; 17 — диюралевая коробка с отверстием; 18 — цифровая фотокамера; 19 — блок формирования кадрового импульса ЭОПа; 20 — блок запуска цифровой фотокамеры; 21 — направление распространения регистрируемого излучения

Ток, протекающий через данную нагрузку, составлял величину порядка 3,5 МА. Длительность электрического импульса на нагрузке составляла 100 нс, его мощность достигала 3 ТВт. В результате пропускания тока по многопроволочной сборке она сжимается за счёт магнитного взаимодействия токов в проволочках и нагревается до состояния высокотемпературной плазмы с образованием короткоживущего Z-пинча 4, который является мощным источником мягкого рентгеновского излучения. Спектр излучения Z-пинча, образованного имплозией упомянутой вольфрамовой сборки, был измерен в работе [8]

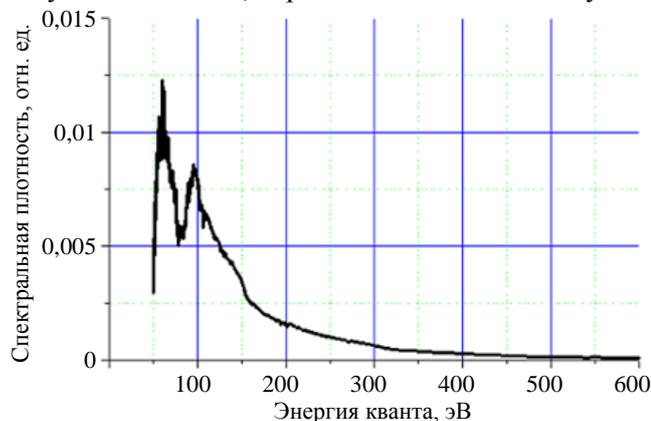


Рис. 2. Спектр излучения вольфрамовой сборки длиной 1,5 см, состоящей из 40 проволочек толщиной 6 мкм, расположенных на диаметре 12 мм

спектрографом с пропускающей решёткой и представлен на рис. 2. Как видно, основные радиационные потери Z-пинча находятся в диапазоне энергии от 50 до 400 эВ.

Для измерения размеров излучающей области Z-пинча на финальной стадии его сжатия в диапазоне энергии квантов мягкого рентгеновского излучения 50 эВ — 2,5 кэВ была разработана и сконструирована регистрирующая установка, схема которой показана на рис. 1. Излучение Z-пинча падает на поглощающий свинцовый экран с камерой-обскурой 6, которая формирует перевёрнутое изображение пинча в квантах мягкого рентгеновского излучения на сцинтиллирующей плёнке 10.

Для того чтобы размер сформированного на сцинтиллирующей плёнке изображения совпадал по порядку величины с размером Z-пинча, а также для достижения высокого пространственного разрешения, между камерой-обскурой и сцинтиллирующей плёнкой была установлена удлиняющая труба 8, которая крепилась к рельсам 7. Сцинтиллирующая плёнка 10 нанесена на поверхность плоской волоконной шайбы 11 (оптический контакт осуществлялся с помощью слоя диффузионного масла), которая, в свою очередь, уплотняет вакуум в отверстии выходного фланца. Рентгеновское излучение, попадая на сцинтиллирующую плёнку, поглощается в ней, в результате чего последняя высвечивается в оптическом диапазоне. При этом толщина плёнки была подобрана так, чтобы в ней поглощалось только мягкое рентгеновское излучение. Таким образом, при помощи сцинтиллирующей плёнки сформированное камерой-обскурой изображение пинча в квантах мягкого рентгеновского излучения преобразуется в изображение Z-пинча в квантах оптического излучения. Видимое изображение Z-пинча передаётся по волоконной шайбе 11 (без преобразования линейного масштаба) на входное окно волоконного световода 12, закреплённого на рельсах 7. Другой конец световода пристыкован к входному окну электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 14. Питание ЭОПа осуществляется от блока формирования кадрового импульса ЭОПа 19 (импульсный блок питания) в момент времени, соответствующий возникновению импульса мягкого рентгеновского излучения на финальной стадии сжатия Z-пинча. В результате на выходном окне ЭОПа формируется усиленное изображение Z-пинча, которое фотографируется цифровой фотокамерой 18, закреплённой в дюралевой коробке 17 с отверстием для объектива. Работа цифровой фотокамеры осуществляется в режиме экспозиции, управление которой производится в ручном режиме от блока запуска цифровой фотокамеры 20 (запуск осуществляется через разъём дистанционного управления). Длительность экспозиции составляет 2 с, начинается до начала выстрела и заканчивается после выстрела.

Камера-обскура была сделана из тонкой свинцовой плёнки толщиной 55 мкм. Следует отметить, что при выборе слишком маленького диаметра камеры-обскуры формируемое изображение будет искажаться за счёт процесса дифракции излучения на краях отверстия (а также значительно уменьшится его яркость), а при выборе слишком большого диаметра значительно снизится пространственное разрешение изображения. Оптимальный диаметр камеры-обскуры рассчитывался по формуле

$$D = k\sqrt{l_2\lambda}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент, равный 1,9 (согласно расчётам Дэвида Балихара);  $l_2$  — расстояние от камеры-обскуры до сцинтиллятора, м;  $\lambda$  — длина волны регистрируемого рентгеновского излучения, м.

Расстояние от камеры-обскуры до сцинтиллятора составляет  $730,0 \pm 0,5$  мм. В качестве длины волны была выбрана величина, соответствующая среднему значению энергии квантов мягкого рентгеновского излучения в спектре на рис. 1 (порядка 200 эВ). Длина волны такого излучения составляет порядка 6 нм. Таким образом, подставляя известные величины в формулу (1), получим оценку оптимального диаметра камеры-обскуры:

$$D \approx 100 \text{ мкм}. \quad (2)$$

Расстояние от Z-пинча до камеры-обскуры составляет  $1735,0 \pm 0,5$  мм. В соответствии с этим коэффициент уменьшения изображения

$$\Gamma = \frac{l_1}{l_2} = \frac{h_1}{h_2} = 2,38, \quad (3)$$

где  $l_1$  — расстояние от Z-пинча до камеры-обскуры, мм;  $l_2$  — расстояние от камеры-обскуры до сцинтиллятора, мм;  $h_1$  — размер Z-пинча, мм;  $h_2$  — размер изображения, мм.

Используемая сцинтиллирующая плёнка представляет собой пластиковый органический сцинтиллятор на основе полистирола с добавкой р-терфенила. Выбор данного типа сцинтиллятора обусловлен необходимостью быстрого времени высвечивания ( $\sim 2$  нс), поскольку длительность импульса мягкого рентгеновского излучения составляет порядка 10—20 нс. Толщина используемой плёнки составляет 60 мкм. Для данной сцинтиллирующей плёнки с использованием данных с сайта [5] была рассчитана зависимость её поглощающей способности от энергии падающих квантов (рис. 3).

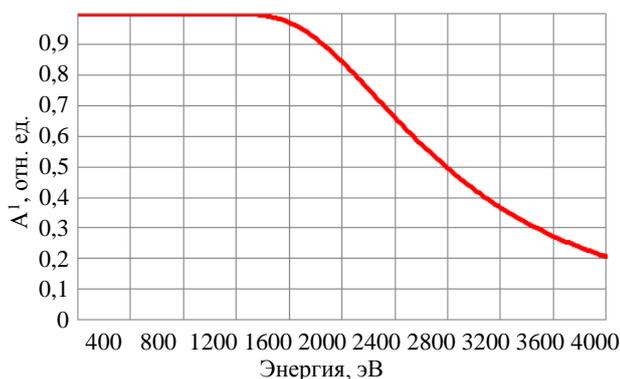


Рис. 3. Зависимость вероятности поглощения кванта в сцинтилирующей плёнке от его энергии

В частности, молекула полистирола состоит из восьми атомов углерода и восьми атомов водорода, первые потенциалы ионизации которых равны 11,3 и 13,6 эВ соответственно. Поскольку большая часть излучения Z-пинча лежит в диапазоне энергии квантов 50—400 эВ (видно из спектра на рис. 2), то на ионизацию внешней оболочки атома случайно выбранный квант затратит от 5 до 25% своей энергии, а учитывая спектр излучения, квантов, способных ионизовать внутренние оболочки упомянутых атомов, практически нет. Таким образом, в диапазоне энергии квантов, формирующих изображение, спектральную чувствительность сцинтилирующей плёнки можно считать слабозависящей от энергии квантов.

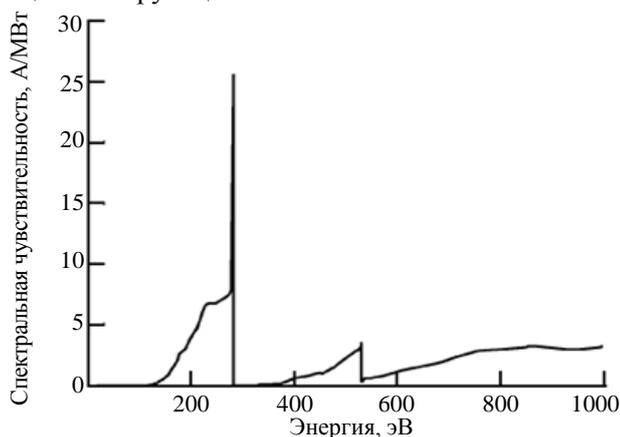


Рис. 4. Спектральная чувствительность ВРД в зависимости от длины волны регистрируемого излучения

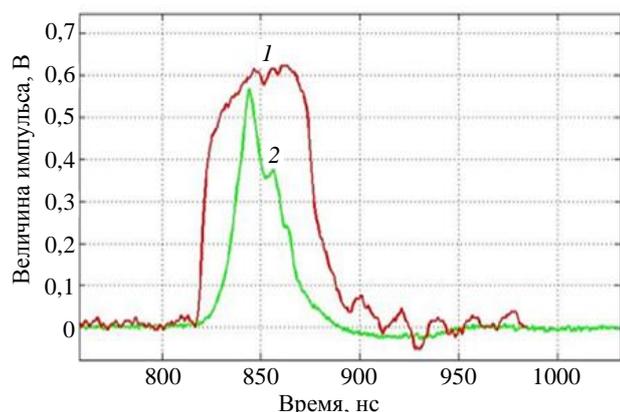


Рис. 5. Результат синхронизации сигнала питания ЭОПа с импульсом мягкого рентгеновского излучения Z-пинча (с вычетом времени задержки кабелей и оптических задержек, нулевой момент времени соответствует моменту запуска СВС): 1 — импульс питания ЭОПа (кадровый импульс)/200; 2 — сигнал ВРД/100

импульса питания ЭОПа с импульсом мягкого рентгеновского излучения, регистрируемого ВРД. Синхронизация выполнялась путём подбора временной задержки блока формирования кадрового импульса. На рис. 5 представлена синхронизация сигнала питания ЭОПа с импульсом мягкого рентгеновского из-

Как видно из данной зависимости, эффективность регистрации квантов с увеличением их энергии заметно падает, что говорит о том, что жёсткое рентгеновское излучение данной плёнкой практически не поглощается, т.е. в изображение будут давать вклад в основном кванты с энергией менее 2,5 кэВ.

Следует учесть, что яркость изображения Z-пинча должна быть прямопропорциональна количеству поглощённой в сцинтиляторе энергии. Часть энергии поглощающихся в сцинтиляторе квантов идёт на ионизацию внешних оболочек атомов сцинтилятора, остальная преобразуется в световую энергию вспышки.

Для усиления яркости передаваемого изображения используется ЭОП ЭП-15. Диаметр входного окна ЭОПа составляет 3 см. Передаваемое ЭОПом изображение является перевёрнутым и без искажений линейного масштаба. Следует учесть, что в полученное изображение может также давать вклад и оптическое излучение Z-пинча. В связи с этим, несмотря на то, что ЭОП может работать в статическом режиме, его запуск проводился в импульсном режиме, в момент времени, соответствующий возникновению импульса мягкого рентгеновского излучения, измеряемого ВРД [6]. Следует отметить, что сам ВРД был установлен за лавсановым фильтром, его фотокатод был сделан из углерода. Спектральная чувствительность данного ВРД приведена на рис. 4. Данный ВРД позволяет эффективно регистрировать излучение Z-пинча в диапазоне энергии квантов 150—300 эВ.

Для запуска ЭОПа в необходимый момент времени использовался блок формирования кадрового импульса с регулируемой временной задержкой, разработанный сотрудником ОФТП Н.И. Лахтюшко. Блок формирует прямоугольный импульс амплитудой 6,5 кВ и длительностью порядка 50 нс. Пуск разрядника блока производился через линию задержки от сигнала системы высоковольтной синхронизации (СВС) [8], которая обеспечивает синхронный пуск восьми высоковольтных генераторов Аркадьева—Маркса на установке, а также производит синхронный запуск осциллографов. Для запуска ЭОПа в необходимый момент времени была выполнена синхронизация по времени кадрового

лучения Z-пинча (с учётом времени задержки в кабелях и пробега рентгеновского излучения от Z-пинча до сцинтиллирующей плёнки). Запуская ЭОП в момент времени возникновения импульса мягкого рентгеновского излучения Z-пинча, можно существенно снизить вклад оптического излучения Z-пинча в формируемое изображение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе работы на установке было проведено семь экспериментов (выстрелов), в ходе каждого из которых проводилась имплозия упомянутых многопроволочных сборок. В пяти из них регистрация изображений Z-пинча проводилась в момент времени, соответствующий финальной стадии его сжатия (рис. 6, *a—д*). Поскольку для регистрации квантов используется сцинтиллирующая плёнка, чувстви-

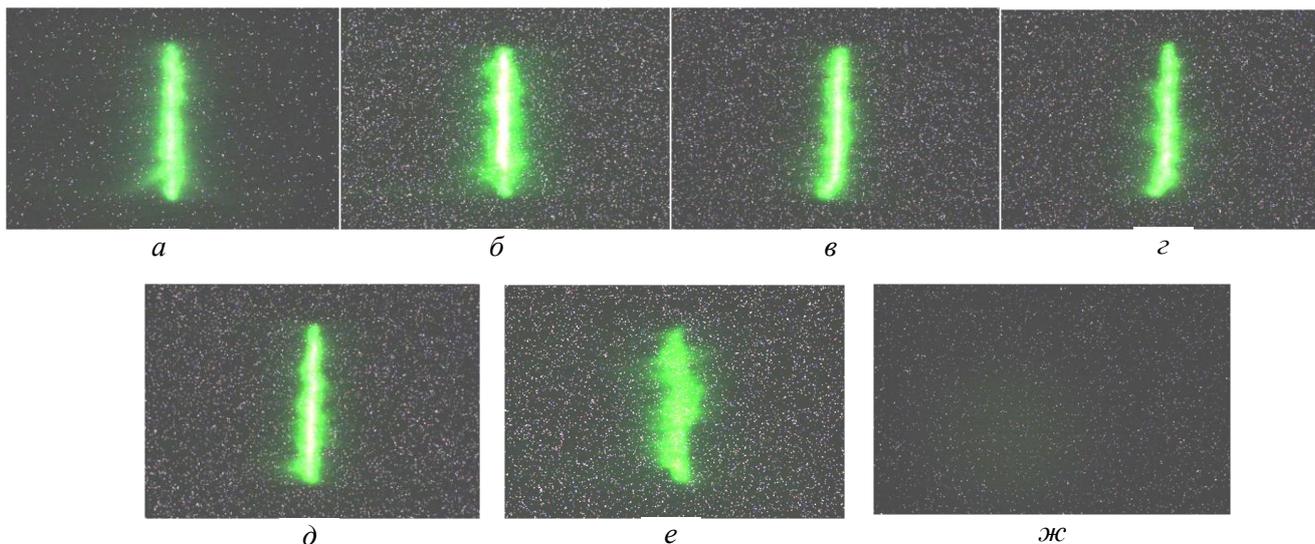


Рис. 6. Изображения Z-пинча, выстрелы № 5419 (*a*), № 5431 (*б*), № 5432 (*в*), № 5434 (*г*), № 5435 (*д*), № 5426 (*е*), № 5466 (*ж*)

ность которой мала при энергии квантов выше порядка 2,5 эВ, а основные радиационные потери Z-пинча начинаются с 50 эВ, то можно сделать вывод, что в формировании изображений Z-пинча участвуют в основном кванты, энергия которых лежит в диапазоне от 50 эВ до 2,5 кэВ. Кроме того, увеличив время задержки кадрового импульса питания ЭОПа, можно зарегистрировать изображение Z-пинча на стадии его распада (рис. 6, *е*). Для определения вклада оптического излучения Z-пинча в формируемые изображения между многопроволочной сборкой и камерой-обскурой была установлена стеклянная пластина. В результате проведения дополнительного контрольного выстрела со стеклянной пластиной было зарегистрировано изображение, представленное на рис. 6, *ж*. Полное энергосодержание Z-пинча измерялось с помощью термпарного калориметра, показания которого составили порядка 100 кДж при пересчёте в полный телесный угол. Показания термпарного калориметра и энергия излучения, измеренная системой ВРД за различными фильтрами, в каждом из экспериментов представлены в табл. 1 (в 4-й колонке таблицы указана дополнительная информация о проведении эксперимента).

Т а б л и ц а 1. Показания детекторов

№ выстрела	Калориметр, кДж	ВРД, кДж	Дополнительная информация
5419	52	43	На финальной стадии
5426	129	88	На стадии распада
5431	108	115	На финальной стадии
5432	129	130	На финальной стадии
5434	120	119	На финальной стадии
5435	140	142	На финальной стадии
5466	65	41	Опыт с установленным стеклом

Для измерения размеров Z-пинча по полученному изображению был измерен масштаб последнего. Для этого на выходное окно ЭОПа была нанесена миллиметровая бумага, после чего в ручном режиме

был сделан снимок выходного окна на фотокамеру. Для определения масштаба полученное изображение было обработано в программе Paint, с помощью которой было посчитано количество пикселей, соответствующее 1 см (для полученных изображений 1 см = 1816 пикселей).

Следует отметить, что на каждом получаемом изображении присутствуют фоновые точки, обусловленные регистрацией ПЗС-матрицей фотокамеры квантов жёсткого рентгеновского излучения.

## ОБРАБОТКА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Изображения Z-пинча, полученные в ходе эксперимента, формируются квантами мягкого рентгеновского излучения, которые в дальнейшем преобразуются в кванты оптического излучения с помощью сцинтиллирующей плёнки. Поэтому для измерения размеров излучающей области Z-пинча на финальной стадии его сжатия достаточно измерить размеры последнего на данных фотографиях. Следует отметить, что любое изображение можно рассматривать в трёх измерениях, где по двум направлениям измеряются координаты пикселей в изображении, а по третьему направлению измеряется яркость соответствующего пикселя в изображении. Поэтому под размером Z-пинча целесообразно понимать тот его размер, который соответствует уровню яркости пикселей, равному половине от величины яркости наиболее интенсивного пикселя в изображении, т.е. полная ширина на полувысоте (ПШПВ).

Для обработки полученных изображений была написана специальная программа на языке программирования Visual Basic 2010. В данной программе имеется возможность проводить очистку изображения от фоновых точек и измерять средние поперечные и продольные размеры Z-пинча на изображении (с учётом масштаба). При этом в программе имеется возможность измерять его размеры на разных порогах яркости пикселей от 0,02 до 1 (задаётся пользователем в качестве входных данных). Кроме того, в программе имеется возможность измерять поперечный и продольный размер Z-пинча в той области, куда наведён курсор мыши.

Пользуясь данной программой, были обработаны все шесть полученных изображений Z-пинчей. Результаты измерений средних поперечных ( $W$ ) и средних продольных ( $H$ ) размеров Z-пинча в соответствующих выстрелах, измеренных на уровне яркости пикселей, равном 0,5 от величины яркости наиболее интенсивного пикселя в изображении, приведены в табл. 2. Погрешность приведённых результатов также рассчитывается в программе и обусловлена двумя основными факторами: погрешностью измерения масштаба изображения и величиной разброса значений размера Z-пинча (в разных пиксельных строках) от среднего значения.

Таблица 2. Результаты подсчёта поперечных и продольных размеров Z-пинча по изображениям, полученным на финальной стадии его сжатия

№ выстрела	Поперечный размер $W$ , мм	Продольный размер $H$ , мм
5419	$1,1 \pm 0,4$	$12,3 \pm 0,7$
5431	$1,4 \pm 0,4$	$11,8 \pm 0,7$
5432	$1,2 \pm 0,4$	$12,4 \pm 0,6$
5434	$1,0 \pm 0,3$	$11,9 \pm 0,6$
5435	$1,1 \pm 0,3$	$11,8 \pm 0,7$

Таким образом, обработав пять снимков Z-пинчей, образованных в процессе имплозии одного и того же типа многопроволочной сборки, можно посчитать средние поперечные и продольные размеры излучающей области (для данной сборки) соответственно:

$$\langle W \rangle = \frac{W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5}{5} = 1,2 \text{ мм}; \quad (4)$$

$$\langle H \rangle = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5}{5} = 12,0 \text{ мм}. \quad (5)$$

В качестве абсолютных погрешностей соответствующих средних значений возьмём максимальные (по пяти выстрелам) погрешности, обусловленные ошибкой измерения масштаба изображения и величиной разброса значений размера Z-пинча (в разных пиксельных строках) от среднего значения:

$$\Delta W = 0,4 \text{ мм}; \quad (6)$$

$$\Delta H = 0,7 \text{ мм.} \quad (7)$$

Таким образом был получен конечный результат для данной многопроволочной сборки:

$$W = \langle W \rangle \pm \Delta W = 1,2 \pm 0,4 \text{ мм;} \quad (8)$$

$$H = \langle H \rangle \pm \Delta H = 12,0 \pm 0,7 \text{ мм.} \quad (9)$$

Для изображения Z-пинча, зарегистрированного на стадии его распада (см. рис. 6, е, со сдвигом по времени на 15 нс), также был проведён процесс обработки, в результате которой соответствующий средний поперечный размер Z-пинча составил  $1,6 \pm 0,6$  мм, соответствующий средний продольный размер составил  $10,7 \pm 0,6$  мм.

Для количественной оценки вклада оптического излучения была проведена оцифровка яркости каждого пикселя в средней пиксельной строке изображения, представленного на рис. 6, ж. Аналогичный процесс был проведён для средней пиксельной строки одного из полученных изображений Z-пинча (см. рис. 6, б). На рис. 7 представлен результат наложения оцифровок яркостей упомянутых пиксельных строк для обоих изображений.

При помощи щелевой оптической развёртки (СФЭР-2) в каждом выстреле происходит измерение скорости сжимающейся оболочки. Скорость плазменной оболочки в момент начала её кумуляции к центру составила

$$v_{об} \sim 3 \cdot 10^7 \text{ см/с.} \quad (10)$$

Зная длительность излучения Z-пинча (порядка 10 нс), можно оценить радиус (толщину) оболочки в момент начала кумуляции:

$$\Delta \sim v_{об} \tau \sim 3 \text{ мм,} \quad (11)$$

где  $v_{об}$  — скорость оболочки, мм/с;  $\tau$  — длительность излучения, с.

Результат (8), полученный в ходе измерений, определяет размер (диаметр), до которого произошло сжатие данной оболочки. Сравнивая соответствующий радиус (порядка 0,6 мм), полученный в формуле (11), с первоначальным радиусом оболочки, получаем, что размер оболочки в процессе сжатия уменьшился приблизительно в 5 раз. Поскольку плотность Z-пинча обратно пропорциональна квадрату его радиуса, то очевидно, что на финальной стадии сжатия плотность оболочки (плотность Z-пинча) возросла приблизительно в 25 раз по сравнению с её плотностью в момент начала кумуляции. Оценку плотности данной оболочки в момент начала кумуляции можно вывести из следующих соображений. Мощность излучения Z-пинча в полный телесный угол можно записать в виде

$$P \sim \varepsilon S, \quad (12)$$

где  $\varepsilon$  — плотность энергии, вкладываемой ударной волной в единицу площади оболочки (вектор Умова плотности потока кинетической энергии), кг/с<sup>3</sup>;  $S$  — площадь излучающей поверхности оболочки, м<sup>2</sup>;

$$\varepsilon = \frac{\rho_{об} v_{об}^3}{2}, \quad (13)$$

где  $\rho_{об}$  — плотность оболочки, кг/м<sup>3</sup>.

Представив площадь поверхности оболочки как площадь боковой поверхности цилиндра, получим формулу для расчёта мощности излучения

$$P \sim \rho_{об} v_{об}^3 \pi \Delta \langle H \rangle, \quad (14)$$

где  $\Delta$  — значение радиуса оболочки в момент начала её кумуляции, м.

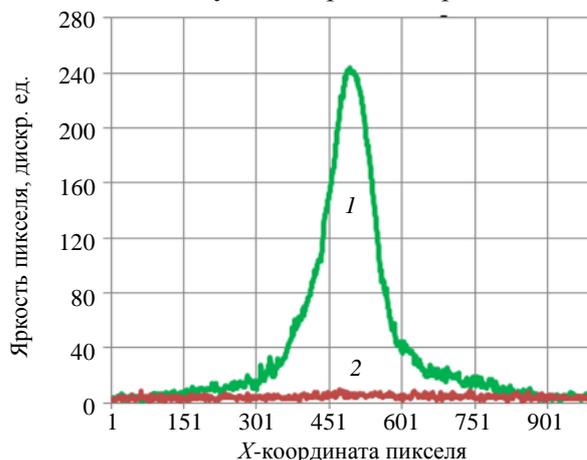


Рис. 7. Наложение оцифровок яркостей пиксельных строк с изображения Z-пинча в квантах мягкого рентгеновского излучения (1) и с изображения Z-пинча в квантах оптического излучения (2)

Согласно работе [8] мощность излучения Z-пинча (для данного типа сборок) составляет порядка 3 ТВт. Выражая из (14) плотность и подставляя известные значения соответствующих величин, получим

$$\rho_{об} \sim \frac{P}{v_{об}^3 \pi \Delta \langle H \rangle} = 1 \text{ кг/м}^3 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3. \quad (15)$$

Для оценки ионной концентрации оболочки достаточно данную величину поделить на массу атома вольфрама:

$$n_{iоб} = \frac{\rho_{об}}{m_w} = \frac{\rho_{об} N_A}{M_w} \sim 5 \cdot 10^{18} \text{ 1/см}^3, \quad (16)$$

где  $m_w$  — масса атома вольфрама, г;  $N_A$  — число Авогадро, 1/моль;  $M$  — атомный вес атома вольфрама, г/моль.

Поскольку на финальной стадии сжатия плотность оболочки возросла приблизительно в 25 раз, получаем оценку плотности и ионной концентрации Z-пинча соответственно:

$$\begin{cases} \rho_Z \sim 25\rho_{об} \sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^3; \\ n_{iZ} \sim 25n_{iоб} \sim 7 \cdot 10^{19} \text{ г/см}^3. \end{cases} \quad (17)$$

Используя измеренные в работе величины, можно также провести оценку концентрации ионов и электронов в Z-пинче в предположении, что вся начальная масса сборки сосредоточена в образовавшемся Z-пинче, а также сравнить данный результат с оценкой (18):

$$n_i = \frac{N_z}{V} = \frac{m \langle H \rangle N_A}{MV}, \quad (19)$$

где  $N_z$  — число ионов в Z-пинче;  $V$  — объём Z-пинча, см<sup>3</sup>;  $m$  — линейная плотность Z-пинча, г/см.

Выражая объём Z-пинча через величины, измеренные в данной работе, получим

$$V = \frac{\pi \langle W \rangle^2 \langle H \rangle}{4}. \quad (20)$$

Подставим выражение (20) в формулу (19). Пренебрегая константами в связи с проведением оценки данной величины, а также учитывая, что линейная плотность Z-пинча составляет 220 мкг/см, число Авогадро порядка  $6 \cdot 10^{23}$  1/моль, атомный вес атома вольфрама составляет 184 г/моль, получим

$$n_i \sim \frac{m N_A}{M \langle W \rangle^2} \sim 7 \cdot 10^{19} \text{ 1/см}^3. \quad (21)$$

Таким образом, видно, что, сделав предположение о том, что вся начальная масса сборки находится в образовавшемся Z-пинче, получается результат того же порядка, что и в оценке (18).

Учитывая, что расчётная степень ионизации плазмы Z-пинча составляет порядка 30 [8], то концентрация электронов равна

$$n_e = 30n_i \sim 2 \cdot 10^{21} \text{ 1/см}^3. \quad (22)$$

Для проведения оценки давления внутри сжимающейся оболочки рассмотрим момент начала её кумуляции. Обобщённая схема сжимающейся оболочки показана на рис. 8. За счёт сжатия оболочки и её движения к оси возникает ударная волна, направленная от оси сборки, формирующая короткоживущий плотный высокотемпературный Z-пинч. Запишем законы сохранения вещества и импульса [12] в системе отсчёта, связанной с фронтом ударной волны:

$$\rho_{об} v_{об} = \rho_Z v_Z; \quad (23)$$

$$P_{об} + \rho_{об} v_{об}^2 = P_Z + \rho_Z v_Z^2, \quad (24)$$

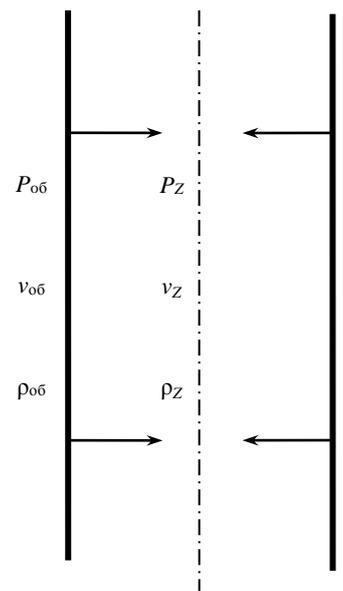


Рис. 8. Обобщённая схема сжимающегося Z-пинча:  $\leftrightarrow$  — направление сжатия

где  $v_Z$  — скорость плазмы за фронтом ударной волны, см/с;  $P_{об}$  — давление спереди от фронта ударной волны, Па;  $P_Z$  — давление внутри Z-пинча, Па.

Умножим числитель и знаменатель последнего слагаемого уравнения (24) на  $\rho_Z$ . Кроме того, давлением спереди от фронта ударной волны можно пренебречь. Тогда второе уравнение примет вид

$$\rho_{об} v_{об}^2 \sim P_Z + \frac{\rho_Z^2 v_Z^2}{\rho_Z}. \quad (25)$$

Заменим  $\rho_Z \cdot v_Z$  в выражении (25) на  $\rho_{об} \cdot v_{об}$  (согласно равенству (23)) и выразим в выражении (25)

$$P_Z \sim \rho_{об} v_{об}^2 - \frac{\rho_{об}^2 v_{об}^2}{\rho_Z} = \rho_{об} v_{об}^2 \left( 1 - \frac{\rho_{об}}{\rho_Z} \right). \quad (26)$$

Отношение  $\rho_{об}/\rho_Z$  равно 1/25, что пренебрежимо мало по сравнению с 1. Отсюда получаем оценку

$$P_Z \sim \rho_{об} v_{об}^2 \sim 10^{11} \text{ Па} = 1 \text{ Мбар}. \quad (27)$$

Это давление можно представить в виде суммы трёх составляющих: давления магнитного поля, давления ионов и давления электронов:

$$P_Z = \frac{B_Z H_Z}{2} + n_e k_B T + n_{iz} k_B T, \quad (28)$$

где  $B_Z$  — модуль вектора магнитной индукции поля Z-пинча, Тл;  $H_Z$  — модуль вектора напряжённости магнитного поля Z-пинча, А/м;  $k_B$  — постоянная Больцмана, Дж/К;  $T$  — температура плазмы в Z-пинче, К.

Пренебрегая вкладом магнитного поля в давление, а также представив  $n_e$  как произведение  $n_{iz}$  на степень ионизации плазмы  $Z$ , получим

$$P_Z \sim n_{iz} k_B T (Z + 1). \quad (29)$$

Пренебрегая единицей в скобках (по сравнению с  $Z$ ) и выражая отсюда температуру, получим

$$T \sim \frac{P_Z}{Z n_{iz} k_B} \sim 3 \cdot 10^6 \text{ К} \sim 300 \text{ эВ}. \quad (30)$$

Согласно численным расчётам, проведённым в работе [8], температура Z-пинча составляет величину порядка 80—100 эВ, что говорит о том, что оценка (30) является несколько завышенной. Это связано с тем, что в процессе оценки было сделано пренебрежение давлением спереди от фронта ударной волны, а также пренебрежение вкладом магнитного поля в давление.

Токовый диаметр Z-пинча в зависимости от времени (эффективный диаметр Z-пинча, по которому протекает ток в соответствующий момент времени) измеряется по его индуктивности [9] в каждом из выстрелов. В свою очередь, индуктивность Z-пинча измеряется из электротехнических расчётов (пренебрегая омическим сопротивлением Z-пинча), для проведения которых измеряются напряжение, падающее на нагрузку, и ток, протекающий через неё в данный момент времени.

Напряжение и ток, в свою очередь, измеряются с помощью индуктивного делителя [10] и токовых петель [11] соответственно. Поскольку излучение Z-пинча возникает преимущественно в той области, где протекает ток, то его поперечные размеры, полученные в данной работе, не должны превышать величину среднего токового диаметра, измеренного за время длительности импульса мягкого рентгеновского излучения. Результаты измерений средних токовых диаметров Z-пинчей в каждом из пяти указанных выстрелов приведены в табл. 3 (для наглядности в третьем столбце таблицы также приведены поперечные размеры Z-пинча). Из данных результатов видно, что в каждом из выстрелов поперечные размеры Z-пинча в несколько раз меньше его токового диаметра, что говорит о справедливости пренебрежения омическим сопротивлением Z-пинча.

Т а б л и ц а 3. Результаты измерений средних токовых диаметров Z-пинча, измеренных за время длительности импульса мягкого рентгеновского излучения

№ выстрела	Средний токовый диаметр, мм	Поперечный размер, мм
5419	5,34 ± 0,05	1,1 ± 0,4
5431	4,58 ± 0,05	1,4 ± 0,4
5432	5,50 ± 0,05	1,2 ± 0,4
5434	3,26 ± 0,05	1,0 ± 0,3
5435	5,72 ± 0,05	1,2 ± 0,3

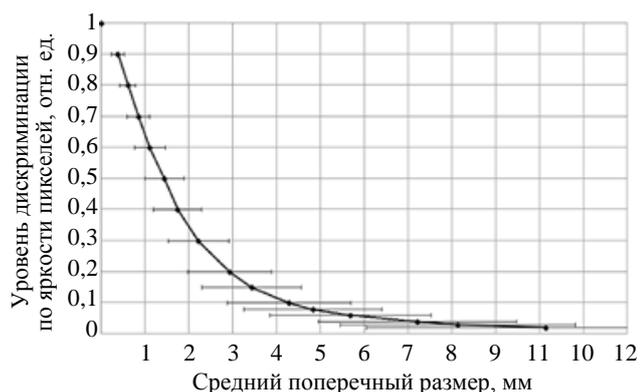


Рис. 9. Зависимость среднего поперечного размера Z-пинча от выбора уровня дискриминации по яркости пикселей

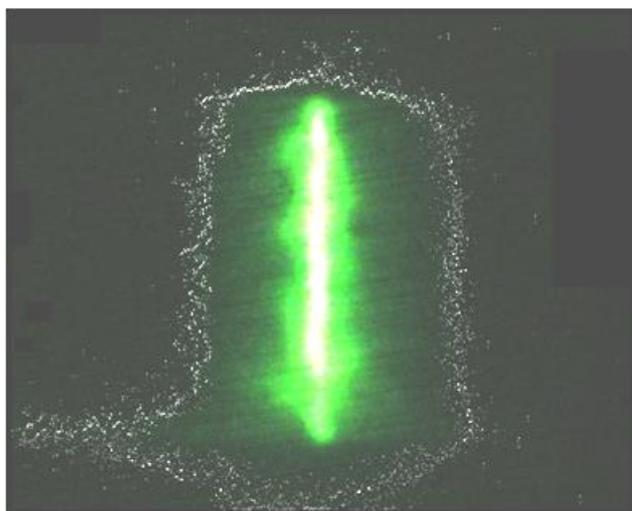


Рис. 10. Результат обработки изображения Z-пинча на уровне дискриминации по яркости пикселей, равном 0,02 (выстрел № 5431)

В ходе обработки результатов измерений для одного из изображений Z-пинча (см. рис. 6, б) с помощью упомянутой программы PiNcH SiZe были рассчитаны зависимости поперечных размеров излучающей области Z-пинча от выбора порога яркости пикселей изображения, относительно которого измерялся соответствующий размер. График данной зависимости представлен на рис. 9.

Как видно на данном графике, при выборе уровня дискриминации по яркости пикселей ниже значения, приблизительно равного 0,15, возникает резкий рост поперечного размера Z-пинча. Это хорошо согласуется с известными представлениями о структуре Z-пинча: центральная область состоит, в основном, из горячей плазмы, вокруг неё присутствует «плазменное гало», состоящее, в основном, из холодной плазмы. Данный график подтверждает, что на фоне горячей центральной области присутствует «плазменное гало», интенсивность излучения которого ниже, чем в центральной области.

На рис. 10 представлен результат обработки изображения Z-пинча на уровне дискриминации по яркости пикселей, равном 0,02 (выстрел № 5431, см. рис. 6, б). При обработке изображения программой было построено некое подобие изолинии яркости вокруг Z-пинча на соответствующем пороге яркости пикселей. Из данного изображения видно, что размер Z-пинча вблизи катода значительно превышает его размер вблизи анода. Такую динамику можно проследить и в других выстрелах, обрабатывая их в

соответствующей программе. Это связано с тем, что при пропускании тока через сборку сжатие плазмы проволочной сборки вблизи катода возникает несколько раньше, чем у анода, а следовательно, и разлёт плазмы у катода начинается раньше, чем у анода. Возникновение такого явления связано с неодновременностью имплозии проволочек по их длине внутри межэлектродного зазора. Поэтому для достижения одновременного сжатия проволочек по длине в таких экспериментах иногда используют конусные сборки, в которых диаметр расположения проволочек вблизи катода несколько превышает диаметр их расположения вблизи анода. Следует также обратить внимание на то, что на изображении, обработанном на уровне дискриминации 0,02 (см. рис. 10), получилась достаточно ровная (за исключением области катода) изолиния яркости, которая в то же время определяет средний поперечный размер Z-пинча, равный  $10 \pm 4$  мм (на данном уровне). Эта величина хорошо (в пределах погрешности) согласуется с начальным диаметром многопроволочной сборки, что означает, что последняя также может проследиваться на данном изображении.

При пропускании электрического тока через проволочки сборки процесс имплозии представляет собой растянутый во времени процесс перехода вещества проволочек в плазменное состояние и движение плазмы к центру сборки с дальнейшим образованием кумулирующей к центру оболочки. Этот процесс протекает неоднородно по длине проволочек, в результате чего в некоторых местах проволочек вещество полностью переходит в плазменное состояние, а в некоторых ещё остаётся в парокапельной фазе. Формируемая плазменная оболочка неоднородная в аксиальном направлении, вследствие чего возникают неустойчивости, приводящие к разрыву электрического тока на внешних частях ускоряемой оболочки. Оставшееся не сублимированное вещество проволочек способно излучать как в оптическом, так и в рентгеновском диапазоне. Это излучение возникает за счёт достаточно высокой

температуры данного вещества, а также в результате переизлучения им электромагнитных волн, поглощаемых от плазмы Z-пинча. Регистрируя это излучение, можно наблюдать на полученных изображениях элементы начальной структуры многопроволочной сборки.

Следует отметить, что при формировании изображения Z-пинча оно может искажаться за счёт дифракции. Учитывая этот факт, следует провести оценку минимальной энергии квантов, которые участвуют в формировании изображения Z-пинча.

Известно, что угол  $\alpha$  (рис. 11) пропорционален отношению длины волны падающего излучения к размеру отверстия, на котором происходит дифракция:

$$\alpha \sim \frac{\lambda}{D}. \quad (31)$$

Из геометрии рисунка следует

$$\operatorname{tg}(\alpha) \sim \alpha \sim \frac{\langle W \rangle / 2}{l_2}, \quad (32)$$

где  $\langle W \rangle / 2$  — половина поперечного размера Z-пинча, см.

Из формул (31) и (32) следует

$$\lambda \sim \frac{\langle W / 2 \rangle}{l_2} D \sim 100 \text{ нм}. \quad (33)$$

Эта длина волны соответствует энергии квантов, равной 10 эВ. Таким образом, в формируемое изображение Z-пинча дают вклад только кванты с энергией свыше 10 эВ, остальные дифрагируют на больший угол.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено измерение средних поперечных и продольных размеров излучающей области сильноточного Z-пинча на финальной стадии его сжатия в диапазоне энергии квантов мягкого рентгеновского излучения 50 эВ — 2,5 кэВ. Измерения проведены для Z-пинча, образованного в процессе имплозии многопроволочной цилиндрической сборки на установке «Ангара-5-1». В результате было получено пять изображений Z-пинчей на финальной стадии их сжатия, а также одно изображение Z-пинча на стадии его распада. Все измерения были проведены для одной и той же многопроволочной сборки: 40 вольфрамовых проволочек толщиной 6 мкм, расположенных на диаметре 12 мм; линейная плотность сборки 220 мкг/см; высота сборки 15 мм. В результате обработки изображений оказалось, что средний (по пяти выстрелам) поперечный размер излучающей области Z-пинча на финальной стадии его сжатия в диапазоне энергии квантов мягкого рентгеновского излучения составил  $1,2 \pm 0,4$  мм, а соответствующий средний продольный размер составил  $12,0 \pm 0,7$  мм. Как было показано в работе, в область, определяемую поперечным размером Z-пинча  $1,2 \pm 0,4$  мм, дают вклад только кванты с энергией свыше 10 эВ, остальные дифрагируют на больший угол. Контрольные измерения показали, что вклад оптического излучения в изображение примерно в 40 раз меньше интенсивности рентгеновского излучения Z-пинча (см. рис. 7).

Поперечный размер пинча был также сопоставлен с его токовыми диаметрами, измеряемыми в каждом выстреле. Как было видно из сравнения, поперечные размеры Z-пинча в несколько раз меньше его токового диаметра, что оправдывает пренебрежение омическим сопротивлением плазмы при расчёте индуктивности Z-пинча.

Для изображения Z-пинча, зарегистрированного на стадии его распада (см. рис. 6, e, через 10—15 нс от момента максимального сжатия), также был проведён процесс обработки, в результате которой соот-

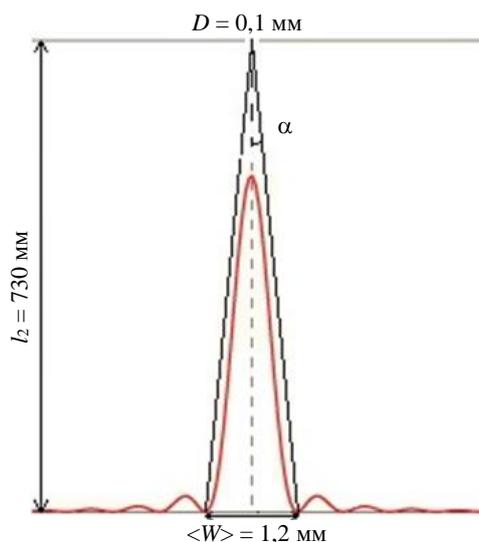


Рис. 11. Схема дифракционных максимумов

ветствующий средний поперечный размер Z-пинча составил  $1,6 \pm 0,6$  мм, соответствующий средний продольный размер составил  $10,7 \pm 0,6$  мм. На рис. 6, е, как и ожидалось, хорошо прослеживается более сильная размазанность изображения Z-пинча, чем на изображениях, полученных на финальной стадии его сжатия.

В процессе работы была также измерена зависимость средних размеров излучающей области Z-пинча от уровня дискриминации по яркости пикселей изображения, т.е. от выбора порога яркости, относительно которого измеряется размер Z-пинча. На графике данной зависимости (см. рис. 9) видно, что при уменьшении порога яркости ниже значения, приблизительно равного 0,15, возникает более быстрый рост поперечного размера Z-пинча. Это хорошо согласуется с известными представлениями о структуре Z-пинча: центральная область состоит, в основном, из горячей плотной плазмы, вокруг неё присутствует «плазменное гало», состоящее, в основном, из менее плотной и холодной плазмы. Данный график подтверждает, что на фоне горячей центральной области присутствует «плазменное гало», интенсивность излучения которого заметно ниже, чем в центральной области. Кроме того, на изображениях, обработанных на низком уровне дискриминации по яркости (порядка 0,02) хорошо видно, что размер Z-пинча вблизи катода значительно превышает его размер вблизи анода. Это связано с тем, что при пропускании тока через сборку сжатие плазмы многопроволочной сборки вблизи катода возникает несколько раньше, чем у анода, а разлёт плазмы у катода начинается раньше, чем у анода. Возникновение такого явления связано с неодновременностью имплозии проволочек сборки по их длине. По этой причине в таких экспериментах иногда используют конусные сборки для сохранения однородности процесса имплозии по длине сборки.

Начальная структура многопроволочной сборки может прослеживаться на полученных изображениях при обработке на уровне дискриминации 0,02 (см. рис. 10). Полученный при этом средний поперечный размер Z-пинча ( $10 \pm 4$  мм на данном уровне) согласуется с начальным диаметром многопроволочной сборки.

На основе измеренных мощности и длительности излучения, скорости сжатия оболочки и размеров Z-пинча были оценены плотность и ионная концентрация оболочки в момент начала её кумуляции, которые составили  $1 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup> и  $5 \cdot 10^{18}$  1/см<sup>3</sup> соответственно. Кроме того, на основе результатов обработки изображений Z-пинча было получено, что в ходе ударного сжатия оболочки её плотность приблизительно возрастает до 25 раз, откуда следует, что плотность и ионная концентрация Z-пинча на финальной стадии его сжатия составляют  $2 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup> и  $7 \cdot 10^{19}$  1/см<sup>3</sup> соответственно. Учитывая степень ионизации плазмы (около 30 электронов), была также получена оценка электронной концентрации Z-пинча  $2 \cdot 10^{21}$  1/см<sup>3</sup>. Исходя из законов сохранения вещества и импульса слева и справа от фронта ударной волны, была проведена оценка газокINETического давления в Z-пинче и его температуры, которые составили порядка 1 Мбар и 300 эВ соответственно. Следует отметить, что данная оценка температуры является завышенной, так как она не учитывает вклад магнитного поля в давление Z-пинча, а также давление спереди от фронта ударной волны.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 14-2-00438, № 13-2-00482.

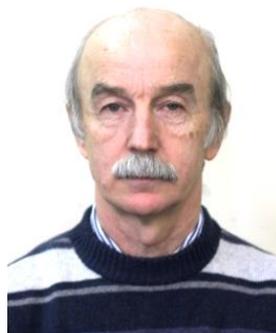
#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spielman R.B., Deeney C., Douglas M.R., Chandler G.A., Cuneo M.E., Nash T.J., Porter J.L., Ruggles L.E., T. Sanford W.L., Stygar W.A., Struve K.W., Matzen M.K., McDaniel, Peterson D.L., Hamme J.H. Pinches as intense X-ray sources for inertial confinement fusion. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2000, vol. 42, B157—B164.
2. Spielman R.B., Deeney C., Chandler G.A., Douglas M.R., Fehl D.L., Matzen M.K., McDaniel D.H., Nash T.J., Porter J.L., Sanford W.L., Seamen J.F., Stygar W.A., Struve K.W., Breeze S.P., McGurn J.S., Torres J.A., Zagar D.M., Gilliland T.L., Jobe D.O., McKenney J.L., Mock R.C., Vargas M., Wagoner T. Tungsten wire-array Z-pinch experiments at 200 TW and 2 MJ. — Physics of Plasmas, 1998, vol. 5, № 5, p. 2105—2111.
3. Аранчук Л.Е., Боголюбский С.Л., Волков Г.С., Иванов М.И., Козлов О.В., Пастухов М.Г. Исследование энергетического спектра импульсного рентгеновского излучения плазменного канала сильноточных электронных пучков: Препринт ИАЭ-3766/14, 1983. 15 с.
4. Альбикив З.А., Велихов Е.П., Веретенников А.И. и др. — Атомная энергия. 1990, т. 68, вып. 1, с. 26.

5. **Filter Transmission.** The Center for X-Ray Optics. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, 2010. URL: [http://henke.lbl.gov/optical\\_constants/filter2.html](http://henke.lbl.gov/optical_constants/filter2.html) (дата обращения: 30.03.2014).
6. **Gritsuk A.N., Aleksandrov V.V., Grabovskiy E.V., Laukhin Y., Mitrofanov K.N., Oleinik G.M., Volkov G.S., Frolov I.N., Shevel'ko A.P.** Radiation anisotropy at the implosion of multiwire arrays. — IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, vol. 41, № 11.
7. **Alexandrov V.V., Volkov G.S., Grabovsky E.V. et al.** Study of a fine spatial-temporal structure of X-ray emission of Z-pinch at the «Angara-5-1» installation. — BEAMS, July 2004, № 7002, p. 686—690.
8. **Болховитинов Е.А., Волков Г.С., Вичев И.Ю. и др.** Исследования спектров излучения быстрых Z-пинчей, образующихся при сжатии многопроволочных сборок на установке «Ангара-5-1». — Физика плазмы, 2012, т. 38, № 10, с. 894—902.
9. **Волков Г.С., Грабовский Е.В., Зайцев В.И. и др.** Диагностика плазмы на установке «Ангара-5-1». — Приборы и техника эксперимента, 2004, № 2, с. 74—81.
10. **Олейник Г.М.** Индуктивный делитель напряжения. — ПТЭ, 2000, № 3, с. 49.
11. **Александров В.В., Грабовский Е.В., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Смирнов В.П., Сасоров П.В., Фролов И.Н.** Исследование связи электротехнических параметров Z-пинчевого разряда с процессами плазмообразования в нагрузке при токовом сжатии цилиндрических проволочныхборок. — Физика плазмы, 2004, т. 30, № 7, с. 1—15.
12. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теоретическая физика. Гидродинамика. Т. VI, 3-е изд., испр. — М.: Наука, 1986. 452 с.



Максим Владимирович Хилько, лаборант; Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», 142190 Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, Россия  
f.i.s.h.008@mail.ru



Георгий Степанович Волков, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.; Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», 142190 Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, Россия  
volkov@triniti.ru



Игорь Николаевич Фролов, научный сотрудник; Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», 142190 Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, Россия  
frolov@triniti.ru



Аркадий Николаевич Грицук, научный сотрудник; Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», 142190 Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, Россия  
Griar@triniti.ru

Статья поступила в редакцию 5 августа 2015 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 1, с. 55—67.