

УВЕЛИЧЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ ПЛАЗМЫ СИЛЬНОТОЧНЫХ Z-ПИНЧЕЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ СЖАТИЯ

© 2022 г. Г. С. Волков^{а, *}, Е. В. Грабовский^а, А. Н. Грицук^а, Г. Л. Комаров^а,
А. А. Рупасов^{б, **}, И. Н. Фролов^а, М. В. Хилько^а

^а ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”, Москва, Россия

^б Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*e-mail: volkov@triniti.ru

**e-mail: rupasov@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 15.09.2021 г.

После доработки 01.12.2021 г.

Принята к публикации 16.12.2021 г.

Представлены результаты экспериментов по увеличению удельной концентрации энергии плазмы сильноточных Z-пинчей за счет использования различных режимов сжатия. Эксперименты проводились с каскадными многопроволочными цилиндрическими нагрузками на установке “Ангара-5-1” с током в нагрузке до 4 МА. В экспериментах использованы нагрузки, как с уменьшенной индуктивностью на финальной стадии сжатия пинча, так и нагрузки позволяющие реализовать переходной режим сжатия от каскадной схемы к схеме композитного Z-пинча. При сжатии каскадныхборок, имеющих уменьшенную индуктивность на конечной стадии сжатия, получена удельная мощность мягкого рентгеновского излучения свыше 5 ТВт/см, что соответствует мощности излучения с пинча стандартной длины 1.6 см на уровне 8–9 ТВт. Удельный полный выход рентгеновского излучения составил величину порядка 150 кДж/см при полном выходе излучения на уровне 90–95 кДж. Динамика сжатия такой нагрузки свидетельствует о существенной роли во взаимодействии каскадов магнитного поля тока, протекающего по внутреннему каскаду. Показано, что в переходном режиме сжатия от каскадной сборки к композитному Z-пинчу, внешняя сборка из материала с относительно невысоким атомным номером (Al) обеспечивает высокую плотность потока кинетической энергии, а внутренняя сборка малого диаметра из материала с высоким атомным номером (W) позволяет повысить мощность излучения в три раза.

Ключевые слова: токовая имплозия, Z-пинч, многопроволочные каскадные сборки, энергодбаланс, плазменные потоки, мягкое рентгеновское излучение, ударные волны, удельный энерговклад

DOI: 10.31857/S0367292122040151

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений реализации импульсного термоядерного синтеза является использование мягкого рентгеновского излучения для обжаривания сферических термоядерных мишеней. В настоящее время наибольший прогресс достигнут в схеме непрямого обжаривания мишеней с использованием мягкого рентгеновского излучения высокой мощности. Излучение генерируется при взаимодействии мощного импульсного лазерного излучения с поверхностью “хольраума” или Z-пинчами, создаваемыми импульсными сильноточными электрическими генераторами наносекундного диапазона длительности.

Среди схем непрямого обжаривания сферических мишеней с использованием излучения Z-пинчей

наиболее перспективными являются схема динамического “хольраума” (ДХ) предложенная в [1] и схема статического “хольраума” с двумя отдельными источниками предложенная в работе [2]. В обеих схемах ключевым моментом является генерация мощных потоков мягкого рентгеновского излучения или в ударной волне, возникающей при столкновении внешней разогнанной током оболочки с внутренней оболочкой (ДХ) или при сжатии двух Z-пинчей в схеме статического “хольраума”. В схеме статического “хольраума” актуальной является задача повышения эффективности генерации излучения Z-пинчей. Повысить однородность пинча и мощность его излучения можно в схеме так называемого композитного пинча, в котором роль внешних оболочек заключается в передаче энергии (тока) от элект-

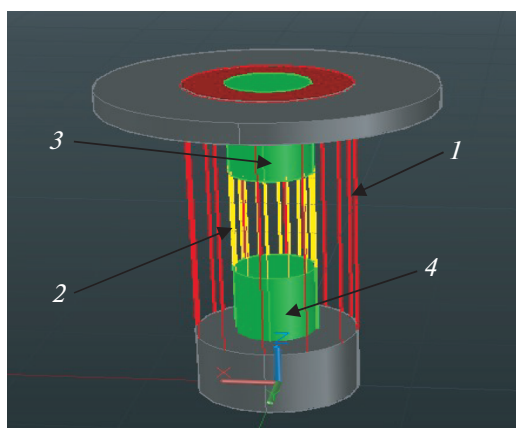


Рис. 1. Рисунок нагрузки установленной на выходе концентратора. 1 – внешняя сборка; 2 – внутренняя сборка с уменьшенной индуктивностью; 3 – анодная и 4 – катодная металлические вставки.

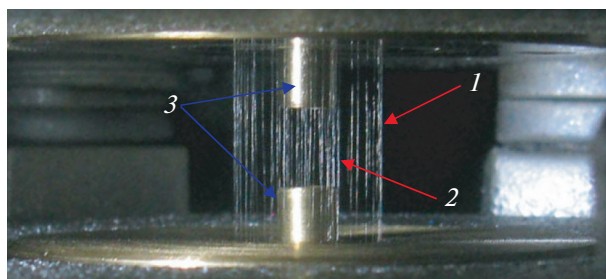


Рис. 2. Фотография нагрузки установленной на выходе вакуумного концентратора установки. 1 – внешняя сборка: 40 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; 2 – внутренняя сборка с уменьшенной индуктивностью: 20 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 110 мкг/см; 3 – анодная и катодная металлические вставки диаметром 5 мм и длиной 5 мм.

трического генератора к высокоимпедансной нагрузке “файберу”, установленному на оси пинча. Плотный компактный “файбер” выступает в роли основного излучателя энергии, поэтому он должны содержать элементы с высокой излучательной способностью [3].

Эффективная генерация излучения в схеме ДХ требует, как быстрой передачи энергии от ионов, нагреваемых в ударной волне, к электронам, так и высокой излучательной способности материала внутреннего цилиндра. Для выполнения этих требований, а также для прозрачности к собственному излучению, внутренний цилиндр должен содержать наряду с элементами с высоким атомным номером, имеющими высокую излучательную способность, и элементы с относительно невысоким атомным номером [4, 5]. Генерация высокой мощности мягкого рентгеновского излучения в пинче, получаемым при ускорении и сжатии плазменных оболочек мегаамперными токами, также ограничено временем передачи энергии от ионов, имеющих при термализации на

стадии пинчевания высокую температуру, к электронам.

Одна из задач, которая ставилась в работе, это задача повышения удельной мощности излучения сильноточного пинча, за счет использования нагрузок с уменьшенной индуктивностью на финальной стадии сжатия пинча. В работе рассмотрена также нагрузка сильноточного генератора, позволяющая реализовать переходной режим сжатия от каскадной схемы к схеме композитного Z-пинча. В этом случае ставилась задача получения высокой полной мощности излучения при использовании провололок внешнего каскада из вещества с относительно невысоким атомным номером (Al), а не вольфрама.

2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на мощном много-модульном импульсном генераторе “Ангара-5-1” (ток до 4 МА, напряжение ~1 МВ, длительность импульса напряжения 140 нс) [6]. Сильноточные

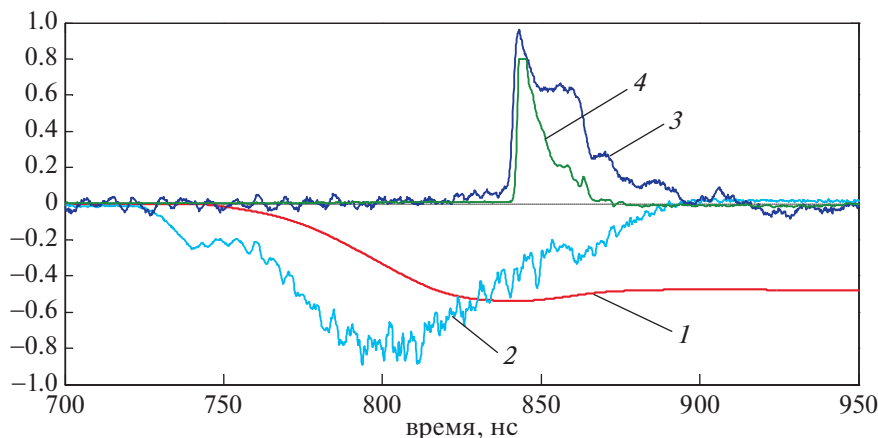


Рис. 3. Синхронизованные осциллограммы сигналов эксперимент № 6589. Нагрузка: внешняя сборка — 40 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренняя сборка с уменьшенной индуктивностью — 20 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 110 мкг/см; — анодная и катодная металлические вставки диаметром 5 мм и длиной 5 мм; 1 — ток пинча I/5E6 (А); 2 — напряжение на пинче U/1E6 (В); 3 — сигнал ВРД — датчика s2e/1E1 (В) ($h\nu > 130$ эВ); 4 — сигнал ВРД-датчика s4e/2E1 (В) ($h\nu > 700$ эВ).

электрические импульсы от отдельных модулей по транспортирующим вакуумным линиям с магнитной самоизоляцией подводились к общему вакуумному концентратору (откачиваемому до 10^{-4} Тор), содержащему межэлектродный промежуток, в который устанавливается нагрузка. На рис. 1 показана нагрузка с уменьшенной индуктивностью на финальной стадии сжатия, использованная в экспериментах по получению высокой удельной мощности излучения пинча. На рис. 2 приведена фотография нагрузки. Использовалась двухкаскадная цилиндрическая многопроволочная сборка из вольфрамовых провололок. Внешний каскад имел диаметр 12 и длину 16 мм. Длина внутренней многопроволочной сборки диаметром 5 мм, за счет одинаковых по длине анодных и катодных металлических трубчатых вставок, была от 5 до 7 мм. Для исследования динамики сжатия в переходном режиме от каскадной сборки к композитному Z-пинчу, также использовалась двухкаскадная многопроволочная сборка. В этом случае внешняя сборка из материала с относительно невысоким атомным номером (Al) диаметром 12 мм сжималась на внутреннюю сборку из вольфрамовых провололок. Начальный диаметр внутренней сборки (4 мм) был порядка диаметра пинча (~3–4 мм), получаемого при сжатии чисто алюминиевой сборки с теми же параметрами. Погонные массы обеих сборок были сравнимы (330–350 мкг/см).

Напряжение на нагрузке измерялось индуктивным делителем [7], а ток токовыми петлями [7]. Сигналы мягкого рентгеновского излучения с наносекундным временным разрешением регистрировались вакуумными рентгеновскими фотодиодами (ВРД) с чувствительностью к энергии

квантов в интервале 20–4000 эВ [9]. Измерения ВРД-детекторами проводились в направлении перпендикулярно оси пинча. Мощность излучения определялась по сигналам ВРД-детекторов с учетом их спектральной чувствительности. Изображение пинча в диапазоне энергий квантов от 0.01 до 2 кэВ регистрировалось камерами-обскурами за различными фильтрами на голографические высокоразрешающие фотопластинки марки ВРП, с пространственным разрешением по объекту порядка 100 мкм. Измерение полного выхода мягкого рентгеновского излучения проводилось термометрическим калориметром без фильтров. Радиальная динамика сжатия нагрузки измерялась двумя оптическими регистраторами типа СФЭР-2, обеспечивающими временную развертку одномерных изображений плазмы с разрешением 0.3 нс. Динамика сжатия нагрузки по радиусу снималась с пространственным разрешением 120 мкм (щель прибора ориентирована поперек пинча). Рентгеновские спектры многозарядных ионов плазмы в диапазоне энергий квантов 1–3 кэВ измерялись рентгеновским спектрографом с выпуклым кристаллом слюды. Спектр излучения регистрировался на ПЗС — линейку ЦЛ-4 [10].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Эксперименты по получению повышенной удельной мощности излучения пинча

На рис. 3 приведены характерные осциллограммы сигналов, полученные в экспериментах с каскадной нагрузкой уменьшенной индуктивности (рис. 1). Видно, что в квантах с энергией 130–270 эВ длительность импульса излучения в

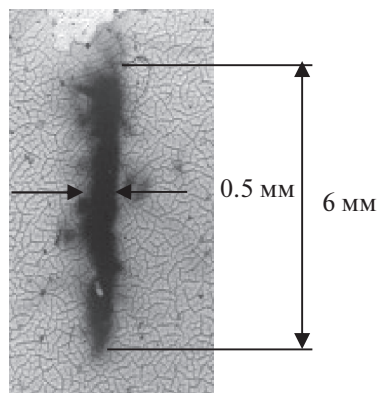


Рис. 4. Обскурограмма пинча в квантах с энергией выше 600 эВ. Эксперимент № 6589.

момент сжатия нагрузки составляет порядка 20 нс. Максимальная мощность рентгеновского излучения пинча в полный телесный угол оценивается величиной ~ 3.5 ТВт. Мощность мягкого рентгеновского излучения на единицу длины составила ~ 5 ТВт/см. Этот режим соответствует мощности излучения с пинча стандартной длины 1.6 см на уровне 8–9 ТВт. Полный выход мягкого рентгеновского излучения по данным термопарного калориметра составил 90–95 кДж, что соответствует удельному (на единицу длины) выходу рентгеновского излучения порядка 150 кДж/см. На интегральных обскурограммах, соответствующим

щих регистрации изображений в квантах с энергией выше 600 эВ (рис. 4), пинч имеет поперечный размер порядка 0.5 мм.

На рис. 5 показано, изображение радиальных оптических разверток пинча с синхронизированной осциллограммой сигнала ВРД. Полученные оптические развертки показывают, что максимум мощности мягкого рентгеновского излучения соответствует моменту торможения ускоренной внешней плазменной оболочки на внутренней сборке. В момент максимума рентгеновского излучения поперечный размер пинча в оптическом излучении в этот момент составляет порядка 2.5–3 мм с последующим дожатием пинча до размера менее 1 мм за время 5–7 нс. Несмотря на сильно уменьшенную длину пинча (6–7 мм), в момент сжатия на нем получено довольно высокое напряжение (~ 300 кВ).

Полученные результаты можно сравнить со сжатием двойной сборки с такими же параметрами, за исключением того, что длина внутренней сборки равна длине внешней сборки (16 мм). Результаты эксперимента с такой “стандартной” сборкой приведены на рис. 6. Длительность импульса мягкого рентгеновского излучения для такой нагрузки составила ~ 8 нс, с мощностью излучения на уровне 8–9 ТВт. Полный выход рентгеновского излучения по измерениям термопарным калориметром составил 95–100 кДж. Напряжение на пинче в момент сжатия (~ 350 –400 кВ). Результаты эксперимента показывают, что взаимодействие каскадов сборки в этом случае приво-

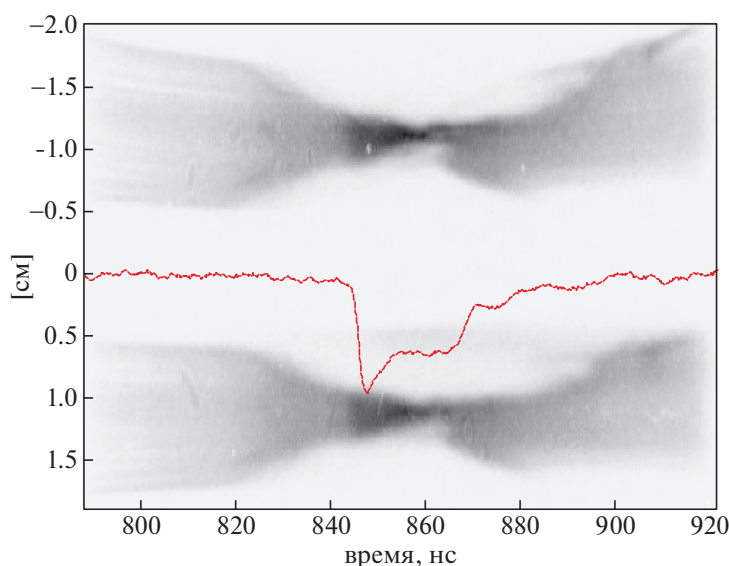


Рис. 5. Эксперимент № 6589. Радиальные оптические развертки сжатия каскадной сборки с уменьшенной длиной внутренней сборки. Верхняя развертка соответствует сжатию вблизи анодной вставки внутреннего каскада. Нижняя развертка соответствует сжатию вблизи катодной вставки внутреннего каскада. На развертку наложен сигнал ВРД-датчика $s2e$ ($h\nu > 130$ эВ) (временная шкала соответствует шкале на рис. 3).

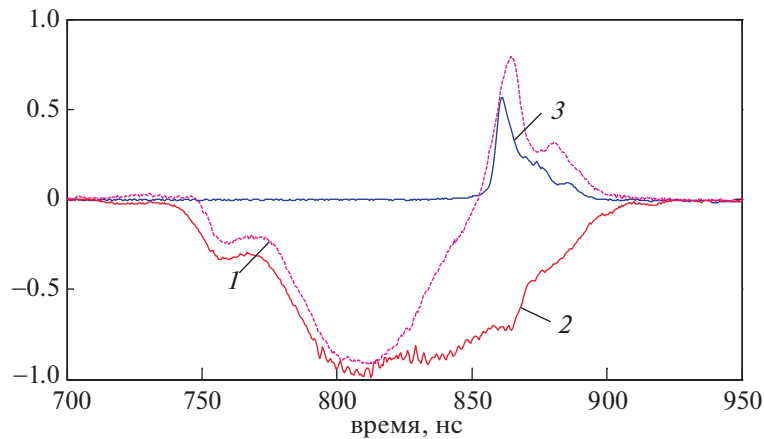


Рис. 6. Синхронизованные осциллограммы сигналов эксперимент № 4487. 1 – производная тока пинча; 2 – напряжение на пинче U/5E5 (В); 3 – сигнал ВРД-датчика s2e/2E2 (В) ($h\nu > 130$ эВ). Нагрузка – внешняя сборка: 40 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренняя сборка – 20 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 110 мкг/см.

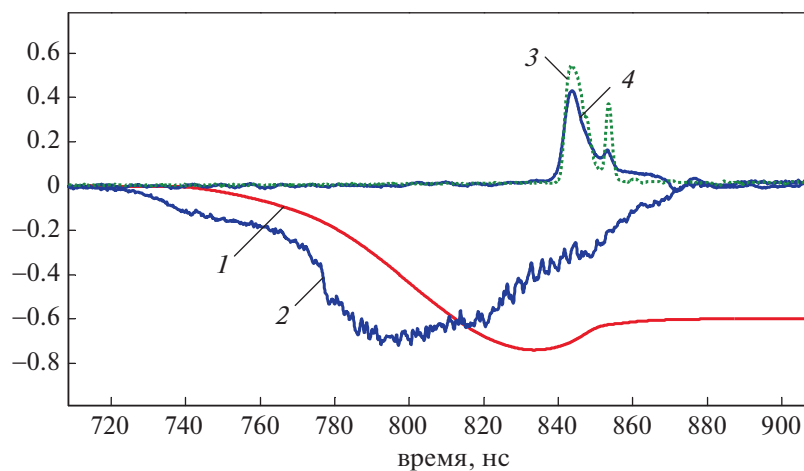


Рис. 7. Синхронизованные осциллограммы сигналов эксперимент № 6787. 1 – ток пинча I/5E6 (А); 2 – напряжение на пинче U/1E6 (В); 3 – сигнал ВРД-датчика s2e/5E1 (В) ($h\nu > 130$ эВ); 4 – сигнал ВРД-датчика s4e/5E1 (В) ($h\nu > 700$ эВ). Нагрузка: внешний каскад – 40 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренний каскад – 20 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 110 мкг/см. Максимальная мощность излучения 8 ТВт.

дит к образованию более компактного пинча. Полученные в этом случае полная энергия мягкого рентгеновского излучения и мощность излучения с единицы длины практически не отличаются от случая сжатия каскадной нагрузки с уменьшенной индуктивностью.

Сравнивать полученную в экспериментах “жесткость” спектра рентгеновского излучения можно было бы по отношению сигналов детекторов s2e/s4e. Однако, излучение регистрируемое детектором s4e (чувствительность свыше 700 эВ) соответствует хвосту теплового излучения плаз-

мы с температурой порядка 80–100 эВ и, вероятно, излучению небольших по объему горячих областей плазмы пинча. Основные излучательные потери плазмы отражает сигнал с детектора s2e.

На рис. 7–8 приведены для сравнения результаты экспериментов со стандартной вольфрамовой сборкой и со сборкой с уменьшенной индуктивностью. Эти эксперименты практически не отличаются по полному выходу излучения, удельной мощности излучения, напряжению на нагрузке и амплитуде тока через нагрузку. При этом и отношение сигналов s2e/s4e для этих экспери-

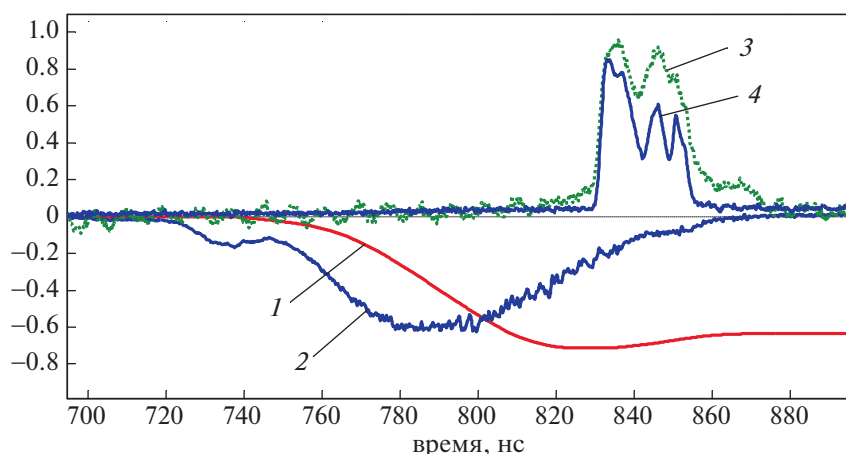


Рис. 8. Синхронизованные осциллограммы сигналов эксперимент № 6804. 1 – ток пинча I/5E6 (A); 2 – напряжение на пинче U/1E6 (B); 3 – сигнал ВРД-датчика s2e/1E1 (B) ($h\nu > 130$ эВ); 4 – сигнал ВРД-датчика s4e/2E1 (B) ($h\nu > 700$ эВ). Нагрузка: внешний каскад – 40 W проволочек диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренний каскад с уменьшенной индуктивностью – 20 W проволочек диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 110 мкг/см; анодная и катодная металлические вставки диаметром 5 мм и длиной 5 мм. Максимальная мощность излучения 3.5 ТВт.

ментов также отличаются незначительно. Для каскадной нагрузки с уменьшенной индуктивностью это отношение изменяется за время излучения пинча в пределах ~ 0.6 – 0.8 , а для “стандартной” сборки это отношение в максимуме рентгеновского излучения составляет величину ~ 0.7 – 0.8 . В экспериментах, в которых получены близкие результаты по выходу излучения и его удельной мощности эти отношения могут существенно изменяться даже за время существования пинча (рис. 3). Полученные результаты показывают, что изменение геометрии нагрузки не привело к увеличению температуры плазмы и, соответственно, удельной мощности излучения.

3.2. Эксперименты по сжатию нагрузки в переходном режиме от каскадной сборки к композитному Z-пинчу

В переходном режиме сжатия от каскадной схемы к композитному Z-пинчу реализована схема сжатия каскадной многопроволочной сборки с внутренним каскадом, имеющим начальный диаметр порядка характерного размера получаемого Z-пинча. Атомный номер материала внутренней сборки (W) существенно превышал атомный номер материала внешней сборки (Al). Диаметр внутренней многопроволочной сборки W (4 мм) был порядка диаметра пинча (2.5–3 мм), получаемого при сжатии одиночной внешней многопроволочной сборки Al диаметром 12 мм с погонной массой 330 мкг/см. Внешняя сборка была составлена из $N = 60$ алюминиевых проволочек диаметром 15 мкм. Погонные массы сборок были близки (330–350 мкг/см). Роль внешнего

каскада из материала с относительно невысоким атомным номером (Al) сводилась к передаче энергии (тока) от внешней сборки с относительно небольшой начальной индуктивностью на внутреннюю достаточно компактную сборку из вещества с большим атомным номером. Для внешней многопроволочной сборки использован материал с невысокой температурой плавления (Al). В этом случае динамика перехода проволочки из твердотельного состояния в плазменное состояние определяется теплофизическими характеристиками алюминия, а роль паров адсорбированных газов и легких примесей на начальной стадии металлической проводимости несущественна.

Выбор для внутренней сборки материала с большим атомным номером обусловлен необходимостью достижения высокой излучательной способности плазмы пинча. При сжатии одиночной алюминиевой многопроволочной сборки с погонной массой 330 мкг/см получен полный выход мягкого рентгеновского излучения ~ 50 кДж, с длительностью импульса излучения ≈ 20 нс. Параметры плазмы измерялись методом рентгеновской спектроскопии по спектрам [H]- и [He]-ионов алюминия. Температура и плотность подбирались так, чтобы расчетные значения отношений интенсивностей резонансных линий [H]- и [He]-ионов Al, а также отношений интенсивностей интеркомбинационной и резонансной линий [He]-иона Al совпадали с экспериментальными или, возможно меньше отличались от них. В координатах плотность–температура строились кривые, на которых выполнялись отношение интенсивностей выбранных пар линий. Область их

Таблица 1. Результаты экспериментов с каскадной нагрузкой в переходном режиме

№ эксп.	I_{\max} (МА)	E , кДж	τ , нс	T , эВ	$n_e/10^{20}$, 1/см ³	d_{rad} , мм
4312	3.5	77	8	440	2.2	3.1
4313	3.9	77	10	430	2.5	1.87
4314	3.9	52	6.5	420	2.5	1.62

пересечения соответствовала искомым параметрам плазмы. Для расчетов использовалась столкновительно-излучательная модель плазмы с учетом оптической толщины в линиях [10]. При поперечном размере пинча 2.5–4 мм электронная плотность и температура, измеренные методом рентгеновской спектроскопии, составили 3×10^{20} 1/см³ и 560 эВ соответственно.

По сравнению со сжатием одиночной многопроволочной сборки из алюминиевых проволок, при сжатии каскадной нагрузки увеличен выход мягкого рентгеновского излучения E (кДж) в 1.5 раза (с 50 до 75 кДж) с сокращением длительности мягкого рентгеновского излучения τ более чем в 2 раза (с 20 нс до 7–10 нс) (табл. 1), что соответствует увеличению мощности излучения более, чем втрое при амплитудном значении тока через нагрузку $I_{\max} \sim 3.5\text{--}3.9$ МА. Электронная температура плазмы, измеренная по линейчатому излучению многозарядных ионов алюминия, составила величину 420–440 эВ при электронной плотности на уровне 2×10^{20} 1/см³ [10]. На рис. 9 приведены характерные осциллограммы сигналов, полученных в эксперименте с каскадной на-

грузкой с внешней сборкой из алюминиевых проволок.

Наличие достаточно интенсивного линейчатого излучения многозарядных ионов алюминия свидетельствует о том, что это излучение возникает в начале сжатия пинча, на переднем фронте импульса мягкого рентгеновского излучения. Практически существует небольшая задержка по времени прихода внутренней вольфрамовой оболочки на ось, по сравнению с началом термализации алюминиевой плазмы от внешней сборки. В этом случае, на переднем фронте излучения пинча, на излучение алюминия практически не влияет плазма вольфрама. Этот факт подтверждается и тем, что электронная плотность в этом случае близка к электронной плотности, полученной при сжатии чисто алюминиевой сборки. В дальнейшем, на конечной стадии сжатия пинча температура плазмы существенно меньше, что подтверждается падением полного выхода излучения [H]- и [He]-подобных ионов алюминия на порядок, по сравнению с экспериментом по сжатию чисто алюминиевой сборки без внутреннего каскада из вольфрамовых проволок.

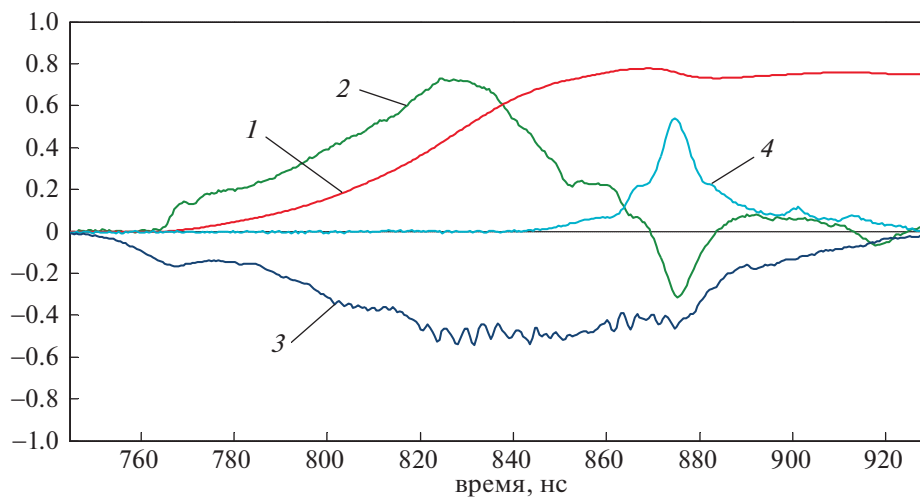


Рис. 9. Синхронизированные осциллограммы сигналов эксперимента № 4313. 1 — ток пинча $I/5E6$ (А); 2 — производная тока пинча; 3 — напряжение на пинче $U/1E6$ (В); 4 — сигнал ВРД-датчика $s2e/2E2$ (В) ($h\nu > 130$ эВ). Нагрузка — внешняя сборка: 60 Al проволок диаметром 15 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 330 мкг/см; внутренняя сборка — 60 W проволок диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 350 мкг/см; длина сборки 16 мм.

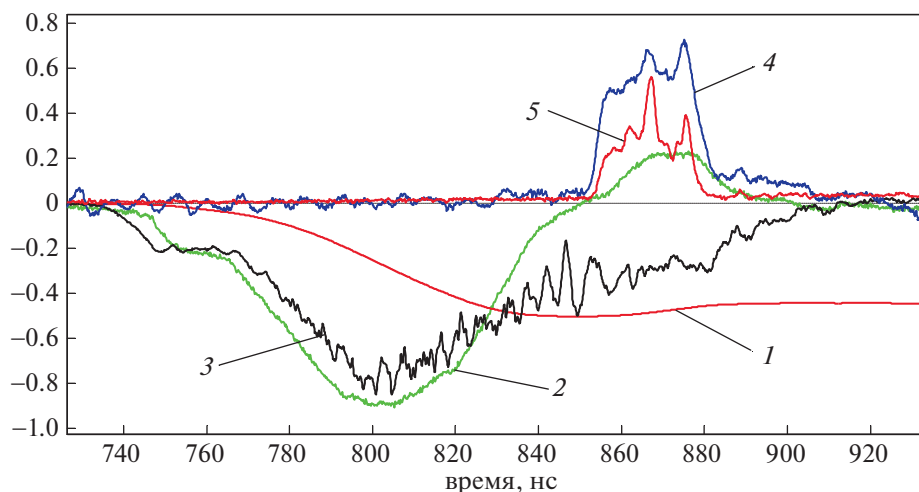


Рис. 10. Синхронизованные осциллограммы сигналов эксперимента № 6591. 1 – ток пинча I/5E6 (A); 2 – производная тока пинча; 3 – напряжение на пинче U/1E6 (B); 4 – сигнал ВРД-датчика s2e/1E1 (B) ($h\nu > 130$ эВ); 5 – сигнал ВРД-датчика s4e/2E1 (B) ($h\nu > 700$ эВ). Нагрузка: внешний каскад – 40 W проволочек диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренний каскад с уменьшенной индуктивностью – 20 W проволочек диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 110 мкг/см; анодная и катодная металлические вставки диаметром 5 мм и длиной 5 мм.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Увеличение удельной (на единицу длины) мощности излучения при уменьшенной индуктивности пинча может достигаться за счет увеличения вклада силы Лоренца на конечной стадии сжатия пинча (работа PdV). Работа силы Лоренца возрастает за счет увеличения тока в нагрузку на финальной стадии сжатия (меньшая индуктивность нагрузки). Увеличить удельную мощность излучения можно также за счет уменьшения влияния приэлектродной плазмы на качество формируемой оболочки. Использование дополнительных катодных и анодных вставок с диаметром, равным диаметру внутренней каскадной сборки, позволяет исключить из динамики формирования пинча участки внешней оболочки вблизи электродов.

Величина тока через внутреннюю сборку определяется диффузией магнитного поля через плазменную оболочку внешней многопроволочной сборки, индуктивностями и взаимной индуктивностью сборок. Если проводимость внешней сборки высокая, то ток на внутреннюю сборку не проникает и напряжение, измеряемое на нагрузке, $U = L_1 di/dt$, где L_1 индуктивности внешней сборки и i – величина полного тока через нагрузку. На начальной стадии протекания тока через нагрузку можно пренебречь омическим сопротивлением каскадов. Индуктивный характер нагрузки на начальной стадии протекания тока ви-

ден из пропорциональности производной тока через нагрузку напряжению на ней (рис. 6 и рис. 10) в течение времени 60–70 нс от начала тока.

Расчеты, проведенные по одномерному трехтемпературному РМГД-коду для параметров установки “Ангара-5-1” и двухкаскадной цилиндрической многопроволочной сборки из вольфрамовых проволочек (внешний каскад диаметр 12 мм, 40 W проволочек диаметром 6 мкм, длина 16 мм, и внутренний каскад сборка диаметром 6 мм, 20W проволочек диаметром 6 мкм и длиной 16 мм), показывают, что непосредственно перед соударением оболочек по внутренней сборке протекает около 20% от полного тока [11]. Ток во внутреннюю оболочку проникает, как за счет диффузии магнитного поля через плазму внешней оболочки, так и за счет переноса тока плазменным потоком с внешнего каскада. На конечной стадии имплозии нагрузки магнитное поле тока, протекающего по внутренней сборке сжимается внешней токовой оболочкой. В этом случае сжатие внутренней сборки происходит раньше сжатия внешней плазменной оболочки.

На начальной стадии имплозии геометрия каскадов для нагрузки с укороченной внутренней сборкой практически не отличается от геометрии нагрузки со стандартной геометрией. Поэтому на начальном этапе имплозии распределение тока между внешней и внутренней сборками не должно существенно отличаться для обеих геометрий каскадной сборки.

Наиболее важным полученным экспериментальным результатом следует считать сохранение полного выхода излучения при значительном уменьшении длины внутренней сборки. Энергия излучения связана с кинетической энергией ускоренной внешней оболочки. В случае с укороченной внутренней сборкой кинетическая энергия ускоренной внешней оболочки переходит в энергию магнитного поля тока, текущего по внутренней сборке. На стадии сжатия ток через внутреннюю сборку растет, так как должна сохраняться величина потока магнитного поля в контуре между сборками. При этом ток через внешнюю сборку падает. Сжатие магнитного поля происходит по всей длине внутренней нагрузки, включая электродные вставки, за счет которых уменьшается индуктивность пинча на конечной стадии сжатия. Таким образом, кинетическая энергия ускоренной внешней оболочки расходуется на сжатие магнитного поля тока внутренней сборки. Удельная мощность излучения пинча полученная при сжатии каскадной нагрузки с уменьшенной индуктивностью соответствует удельной мощности излучения пинча, полученного при сжатии “стандартной сборки”. Этот результат согласуется с тем, что “жесткость” спектров излучения для обеих геометрий нагрузок практически не отличаются (разд. 3.1). Большая длительность импульса мягкого рентгеновского излучения (~20 нс) связана, скорее всего, с недостаточно высокой излучательной способностью внутреннего каскада из 20-ти вольфрамовых проволочек, имеющего погонную массу 110 мкг/см. Можно ожидать, что увеличение массы внутреннего каскада приведет к увеличению плотности плазмы пинча, сокращению длительности импульса излучения и увеличению удельной мощности излучения.

Для сборки имеющей внутренний каскад длиной равной длине внешнего каскада (16 мм) динамика взаимодействия каскадов также должна осуществляться через сжатие магнитного поля тока внутреннего каскада. Но в этом случае большая длина внутреннего каскада обеспечивает эффективный сброс энергии магнитного поля внутреннего каскада через работу по сжатию каскада и джоулев нагрев, что приводит к уменьшению задержки сжатия внешнего каскада по отношению к сжатию внутреннего каскада.

Режим сжатия через взаимодействия каскадов через магнитное поле наблюдался в экспериментах с каскадными сборками на установке MAGPIE [12]. В этих экспериментах величина тока через внутреннюю сборку оценивалась из численных расчетов и составляла величину на уровне 20% от величины полного тока в нагрузке. Как отмечают авторы этой работы, получить большой ток во внутренней сборке можно за счет увеличения взаимной индуктивности сборок путем закручива-

ния внешней и внутренней сборок в противоположных направлениях [12]. Тогда продольное магнитное поле внешней сборки будет индуцировать ток во внутренней сборке.

Результаты экспериментов с двухкаскадными сборками с разным элементным составом свидетельствуют о том, что внутренняя вольфрамовая сборка практически не добавляет вещество во внешнюю алюминиевую сборку при их взаимодействии. Однако она играет существенную роль в динамике сжатия таких сборок. Об этом свидетельствует более короткий импульс рентгеновского излучения и большая мощность излучения по сравнению со сжатием одиночной алюминиевой сборки без внутреннего каскада. В динамике взаимодействия оболочек роль магнитного поля внутренней сборки, скорее всего, незначительна. Из-за более высокой проводимости внешней сборки из алюминиевых проволочек (меньшее Z и большая температура плазмы) и меньшего начального расстояния между проволочками (0.6 мм) проникновение тока на внутреннюю сборку за счет диффузии магнитного поля затруднено. Ток на внутреннюю сборку должен перебрасываться при прохождении через нее внешней сборки, за счет большего импеданса последней. Это подтверждается тем, что электронная температура плазмы, измеренная по линейчатому излучению многозарядных ионов алюминия (420–440 эВ) и электронная плотность ($\sim 2 \times 10^{20}$ 1/см³) соответствуют плотности и температуре полученной при сжатии одиночной сборки из алюминиевых проволочек.

Получение высокой мощности излучения в переходном режиме сжатия от каскадной схемы к композитному Z -пинчу, во-первых, связано с уменьшением времени передачи энергии от более легких ионов алюминия, имеющих высокую температуру при термализации ускоренной внешней оболочки, к электронам. Во-вторых, повышению мощности способствует увеличение концентрации электронов в пинче, так как на конечной стадии сжатия пинча, состоящего из смеси ионов алюминия и вольфрама с практически одинаковыми массовыми долями, в плазме будет высокая концентрация более легких ионов алюминия. Существенно, что наличие внутреннего каскада из вольфрамовых проволочек приводит к повышению степени сжатия пинча, по сравнению со сжатием чисто алюминиевой многопроволочной сборки ($d_{rad} \approx 1.5-2$ мм, см. табл. 1). При поперечном размере пинча d и заданной погонной массе, электронная концентрация плазмы пинча $n_e \sim ((1 - \mu)\langle Z_{Al} \rangle / A_{Al} + \mu\langle Z_{W} \rangle / A_{W}) / d^2$, где μ – массовая доля вольфрама в сборке, $\langle Z_{Al} \rangle$ и $\langle Z_{W} \rangle$ – средние заряды ионов алюминия и вольфрама, A_{Al} и A_{W} – атомные номера алюминия и вольфрама. Поперечный размер d зависит от массовой доли

вольфрама в пинче и изменяется от 3–4 мм при $\mu = 0$ до ~ 1 мм при $\mu = 1$. При $\mu \sim 0.5$ поперечный размер пинча составляет $d \approx 1.5$ –2 мм. Для температуры плазмы 80–100 эВ $\langle Z_{Al} \rangle \sim 10$ и $\langle Z_W \rangle \sim 20$ концентрация электронов будет такой же, как в пинче с вольфрамовой сборкой той же погонной массы ($\mu = 1$). Наличие заметной массовой доли вольфрама в нагрузке приводит к увеличению степени сжатия пинча и плотности. В этом случае, увеличение мощности излучения по сравнению со сжатием чисто алюминиевой сборки более, чем втрое связано, как с высокой излучательной способностью ионов вольфрама, так и с увеличением погонной массы сборки.

При рассмотрении излучения пинча, образованного при взаимодействии внешней алюминиевой сборки с внутренней вольфрамовой сборкой, предполагалось, что эти материалы однородно перемешаны. С другой стороны, в перемешивании вольфрама с алюминием есть две характерные скорости, скорость Альфвена и тепловая. На стадии термализации ускоренной оболочки обе эти скорости порядка скорости оболочки ($V \sim 2$ –3 $\times 10^7$ см/с). При характерном размере пинча $d \sim 2$ мм время перемешивания τ будет $\sim d/(2V) \sim 3$ –5 нс, что порядка времени излучения пинча.

Как показывают спектроскопические измерения, внутренняя W сборка механически слабо взаимодействует с оболочкой внешней сборки, хотя играет существенную роль в динамике сжатия. Мощность излучения такой сборки определяется плотностью потока кинетической энергии внешней сборки из алюминиевых проволочек на диаметре внутреннего каскада из вольфрамовых проволочек. Таким образом, в переходном режиме сжатия от каскадной сборки к композитному Z-пинчу, внешняя сборка из материала с относительно невысоким атомным номером (Al) обеспечивает высокую плотность потока кинетической энергии, а внутренняя сборка малого диаметра из материала с высоким атомным номером (W) позволяет эффективно преобразовать эту энергию в мягкое рентгеновское излучение.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты экспериментов по увеличению удельной концентрации энергии плазмы сильноточных Z-пинчей за счет использования различных режимов сжатия. Эксперименты проводились с каскадными многопроволочными цилиндрическими нагрузками на установке “Ангара-5-1” с током в нагрузке до 4 МА. В экспериментах использованы нагрузки, как с уменьшенной индуктивностью на финальной стадии сжатия пинча, так и нагрузки позволяющие реализовать переходной режим

сжатия от каскадной схемы к схеме композитного Z-пинча. При сжатии каскадных вольфрамовыхборок, имеющих уменьшенную индуктивность на конечной стадии сжатия, получена удельная мощность мягкого рентгеновского излучения порядка 5 ТВт/см, что соответствует мощности излучения с пинча стандартной длины 1.6 см на уровне 8–9 ТВт. Удельный выход мягкого рентгеновского излучения составил ~ 150 кДж/см. Динамика сжатия нагрузки и высокий выход полной излученной энергии позволяет сделать вывод о существенной роли во взаимодействии каскадов сборки магнитного поля внутреннего каскада.

Показано, что в переходном режиме сжатия от каскадной сборки к композитному Z-пинчу, внешняя сборка из материала с относительно невысоким атомным номером (Al) обеспечивает высокую плотность потока кинетической энергии, а внутренняя сборка малого диаметра из материала с высоким атомным номером (W) позволяет повысить мощность излучения в три раза. Получение высокой мощности излучения в таком режиме сжатия, во-первых, связано с высокой излучательной способностью вольфрама и, во-вторых, с уменьшением времени передачи энергии от более легких ионов алюминия, имеющих высокую температуру при термализации ускоренной внешней оболочки, к электронам.

Авторы работы благодарят коллектив установки “Ангара-5-1” за техническое обеспечение при проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-02-00133.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smirnov V.P.* // Plasma Phys. Control Fusion. 1991. V. 33. P. 1697.
2. *Olson R.E., Chandler G.A., Derzon M.S., Hebron D.E., Lash J.S., Leeper R.J., Nash T.J., Rochau G.E., Sanford T.W.L., Alexander N.B., and Gibson C.R.* // Fusion Technol. 1999. V. 35. N. 2. P. 260
3. *Wessel F.J., Etlicher B., Choi P.* // Phys. Rev. Letters. 1992. V. 69. P. 3181.
4. *Захаров С.В., Смирнов В.П., Гасилов В.А., Круковский А.Ю., Скороваров К.В.* Препринт ИАЭ, 4587/6, Москва, 1988.
5. *Захаров С.В., Новиков В.Г.* Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша, № 061, 2002.
6. *Альбинов З.А., Велихов Е.П., Веретенников А.И., Глухих В.А., Грабовский Е.В., Грязнов В.М., Гусев О.А., Жемчужников Г.Н., Зайцев В.И., Золотовский О.А., Истомин Ю.А., Козлов О.В., Крашенинников И.С., Курочкин С.С., Латманнизова Г.М., Матвеев В.В.,*

- Минеев Г.В., Михайлов В.Н., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Певчев В.П., Перлин А.С., Печерский О.П., Письменный В.Д., Рудаков Л.И., Смирнов В.П., Царфин В.Я., Ямпольский И.Р.* // Атомная энергия. 1990. Т. 68. Вып. 1. С. 26.
7. *Олейник Г.М.* // ПТЭ. 2000. № 3. С. 49.
8. *Волков Г.С., Грабовский Е.В., Зайцев В.И., Зукакишвили Г.Г., Зурин М.В., Митрофанов К.Н., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю., Смирнов В.П., Фролов И.Н.* // ПТЭ. 2004. № 5. С. 74.
9. *Олейник Г.М., Браницкий А.В.* // ПТЭ. 2000. № 4. С. 58.
10. *Волков Г.С., Зайцев В.И., Грабовский Е.В., Федюлов М.В., Александров В.В., Лахтюшко Н.И.* // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 3. С. 211.
11. *Ning Cheng, Ding Ning, Liu Quan, Yang Zhen-Hua, Fan Wen-Bin, Zhang Yang* // Chinese Phys. Lett. 2006. V. 23. № 7. P. 1857.
12. *Lebedev S.V., Chittenden J.P., Aliaga-Rossel R., Bland S.N., Dangor A.E. and Haines M.G.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 1709.