

УДК 533.952

УВЕЛИЧЕНИЕ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ И УДЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ ПЛАЗМЫ СИЛЬНОТОЧНЫХ Z-ПИНЧЕЙ ЗА СЧЕТ СЖАТИЯ КАСКАДНЫХ СБОРОК, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЧЕРЕЗ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

© 2024 г. Г. С. Волков^{a, b}, Е. В. Грабовский^a, А. Н. Грицук^a,
К. Н. Митрофанов^a, А. А. Рупасов^c, И. Н. Фролов^a

^aГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Москва, Россия

^bРоссийский технологический университет — Московский институт радиотехники,
электроники, автоматики, Москва, Россия

^cФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*e-mail: volkov@triniti.ru

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

Поступила в редакцию 12.01.2024 г.

После доработки 28.02.2024 г.

Принята к публикации 10.03.2024 г.

С целью увеличения удельной концентрации энергии плазмы сильноточных Z-пинчей проведены эксперименты по сжатию каскадных многопроволочных вольфрамовыхборок, имеющих уменьшенную индуктивность на конечной стадии пинчевания. Эксперименты проводились на установке «Ангара-5-1» с током в нагрузке до 4 МА. Наибольшие на единицу длины пинча мощности излучения были получены с каскадными сборками, у которых погонная масса внутренней сборки с уменьшенной индуктивностью составляла от 1 до 1.5 погонной массы внешней сборки. С пинча длиной 1 см получена мощность мягкого рентгеновского излучения $P \sim 11$ ТВт. Удельный выход мягкого рентгеновского излучения пинча составил 130–140 кДж/см. Полная и удельная мощности излучения пинча, полученные при сжатии каскадной нагрузки с уменьшенной индуктивностью, превышают полную и удельную мощности излучения пинча, полученного при сжатии «стандартной» сборки длиной 1.6 см с теми же параметрами (7–8 ТВт и 5 ТВт/см соответственно). Выход мягкого рентгеновского излучения не изменялся при сокращении длины излучающего пинча с 1.6 см до 0.6 см. Динамика сжатия такой нагрузки свидетельствует об увеличении роли во взаимодействии каскадов магнитного поля тока, протекающего по внутреннему каскаду. Предложен вариант использования взаимодействия оболочек каскадной сборки через магнитное поле тока внутреннего каскада применительно к схеме статического «хольраума» с непрямым облучением сферических мишеней. В схеме возможен захват части тока внутренней сборкой, удерживающей статический «хольраум». В этом случае при взаимодействии каскадов практически всю кинетическую энергию внешней ускоренной оболочки можно использовать для генерации излучения в статическом «хольрауме» двумя образующимися приэлектродными пинчами.

Ключевые слова: сильноточный Z-пинч; многопроволочные каскадные сборки; удельная мощность излучения; магнитное поле тока внутреннего каскада; индуктивность пинча; статический «хольраум».

DOI: 10.31857/S0367292124050043, EDN: PWMNOG

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 электриче-

скими генераторами наносекундного диапазона длительности.

На современных мощных импульсных генераторах в экспериментах с многопроволочными вольфрамовыми Z-пинчами получено мягкое рентгеновское излучение длительностью импульса 4–10 нс и мощностью излучения до 330 ТВт [1, 2]. Образующийся в результате сжатия многопроволочной цилиндрической сборки пинч представляет собой высокотемпературное плотное плазменное образование диаметром ~ 2 мм и длиной 2 см. Спектр излучения пинча соответствует «черно-

тельному», с температурой $T \sim 200$ эВ. Существенно, что получаемая мощность мягкого рентгеновского излучения в 4–5 раз превышает электрическую мощность используемых сильноточных генераторов. Проведение экспериментов по взаимодействию мощных потоков мягкого рентгеновского излучения Z-пинча с веществом (мишенью) предполагает использование различных геометрий расположения облучаемых мишеней относительно источника излучения. Оптимальное расположение мишени относительно источника излучения определяется угловыми и спектральными характеристиками излучения пинча.

Среди схем непрямого облучения сферических мишеней с использованием излучения Z-пинчей наиболее перспективными являются схема динамического «хольраума» (ДХ), предложенная в работе [3], и схема статического «хольраума» с двумя отдельными источниками излучения, предложенная в работе [4]. В обеих схемах ключевым моментом является генерация мощных потоков мягкого рентгеновского излучения или в ударной волне, возникающей при столкновении внешней оболочкой 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 электрического генератора к высокоимпедансной нагрузке «файберу», установленному на оси пинча. Плотный компактный «файбер» выступает в роли основного излучателя энергии, поэтому он должен содержать элементы с высокой излучательной способностью [5].

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 [6, 7]. Генерация высокой мощности мягкого рентгеновского излучения в пинче, получаемом при ускорении и сжатии плазменных оболочек мегаамперными токами, также ограничена временем передачи энергии от ионов, имеющих при термализации на стадии пинчевания высокую температуру, к электронам.

В экспериментах на установке «Ангара-5-1» с вольфрамовыми многопроволочными сборками с погонными массами 200–400 мкг/см при токе в нагрузку ~ 3 –4 МА источник излучения (пинч) представляет собой цилиндр диаметром менее 1.5–2 мм и длиной 1.6 см. Полученная мощность излучения пинча составляет 6–8 ТВт с длительностью импульса излучения 8–10 нс.

В работе ставилась задача повышения полной и удельной мощностей излучения сильноточного пинча за счет использования двухкаскадныхборок с уменьшенной индуктивностью на финальной стадии сжатия. Использование двухкаскадныхборок позволяет не только увеличить мощность и выход излучения получаемых Z-пинчей, но и обеспечивать профилирование импульса излучения по времени, что позволяет снизить требования по мощности и энергии рентгеновского излучения для достижения зажигания. 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 $P \cdot dV$). Работа

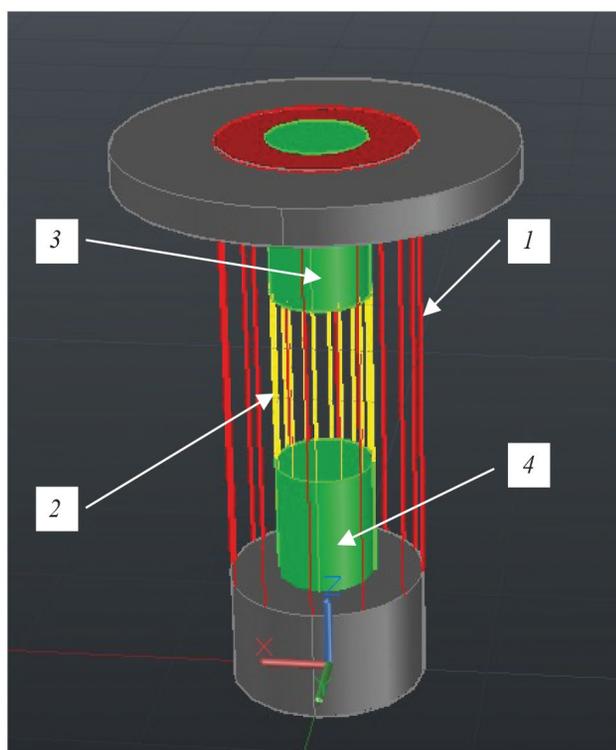


Рис. 1. Рисунок нагрузки, установленной на выходе концентратора: 1 — внешняя сборка; 2 — внутренняя сборка с уменьшенной индуктивностью; 3 — анодная и 4 — катодная металлические вставки.

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. Например, при сжатии двухкаскадных многопроволочных цилиндрических сборок использование дополнительных катодных и анодных вставок с диаметром, равным диаметру внутренней сборки, позволяет исключить из динамики формирования пинча участки внешней оболочки вблизи электродов.

2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на мощном многомодульном импульсном генераторе «Ангара-5-1» (ток от 8 модулей до 4 МА, напряжение ~ 1 МВ, длительность импульса напряжения 90 нс) [8]. Сильноточные электрические импульсы от отдельных модулей по транспортирующим вакуумным линиям с магнитной самоизоляцией подводились к общему вакуумному концентратору, содержащему межэлектродный промежуток, в который устанавливается нагрузка. В качестве нагрузки использовались двухкаскадные многопроволочные цилиндрические сборки из вольфрамовых проволочек. Для снижения индуктивности пинча на конечной стадии сжатия длина внутреннего каскада уменьшается

за счет дополнительных электродных вставок. На рис. 1 приведен рисунок такой нагрузки. Внешний каскад имел диаметр 12 мм и длину 1.6 см. Длина внутренней многопроволочной сборки диаметром 5 мм, за счет одинаковых по длине анодных и катодных металлических трубчатых вставок изменялась от 0.5 до 1.0 см. На рис. 2 приведена фотография нагрузки, установленной в выходной части концентратора тока.

Напряжение на нагрузке измерялось индуктивным делителем [9], а ток — токовыми петлями [10]. Мягкое рентгеновское излучение регистрировалось с наносекундным временным разрешением вакуумными рентгеновскими фотодиодами (ВРД) с чувствительностью к энергии квантов в интервале 20–4000 эВ [11]. Измерения ВРД-детекторами проводились в направлении перпендикулярно оси пинча. Мощность излучения определялась по сигналам ВРД-детекторов с учетом их спектральной чувствительности. На рис. 3 приведена спектральная чувствительность используемых вакуумных рентгеновских фотодиодов. 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 ~ 200 мкм. Измерение полного выхода мягкого рентгеновского излучения проводилось термодинамическим калориметром без фильтров.

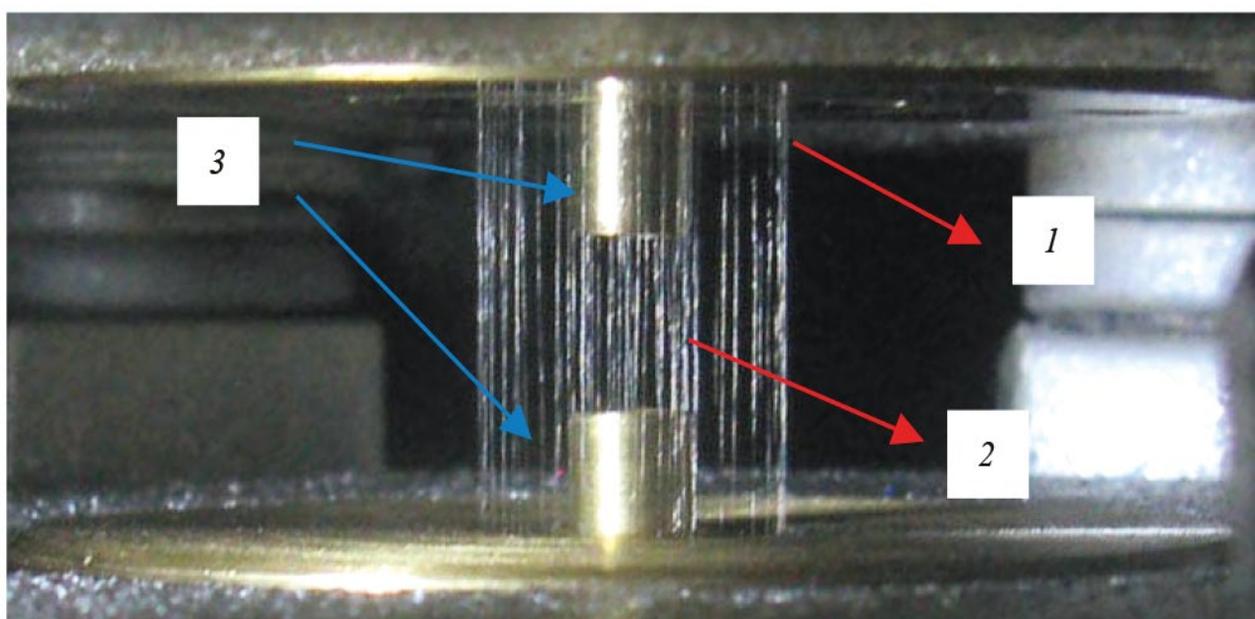


Рис. 2. Фотография нагрузки, установленной на выходе концентратора: 1 — внешняя сборка: 40 W проволочек диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; 2 — внутренняя сборка с уменьшенной индуктивностью: 20 W проволочек диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 110 мкг/см; 3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

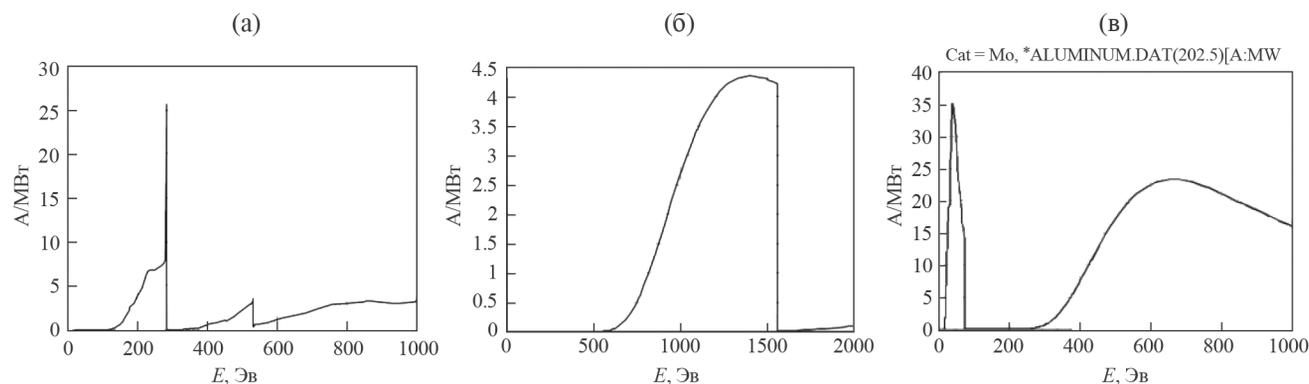


Рис. 3. Спектральная чувствительность вакуумных рентгеновских диодов: ВРД типа s1e: материал фотокатода — углерод, фильтр — лавсан 316 мкг/см² (а); ВРД типа s4e: материал фотокатода — молибден; фильтр — алюминиевая фольга толщиной 6 мкм (б); ВРД типа s3e: материал фотокатода — молибден; фильтр — алюминиевая фольга толщиной 0.75 мкм (в).

При измерениях в направлении, перпендикулярном оси пинча, подавляющий вклад в сигнал термоядерного калориметра дает мягкое рентгеновское излучение, а вклад потоков разлетающейся плазмы пинча не превышает 5% от энергии излучения [12].

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). В квантах мягкого рентгеновского излучения динамика сжатия пинча исследовалась многокадровым (экспозиция кадра 1 нс) рентгеновским ЭОПом на базе МКП [13]. Эффективный диапазон регистрации излучения (100–280 эВ) определялся

спектральной чувствительностью приемной МКП пластины и пропусканием входного фильтра прибора (1 мкм полипропилена). Пространственное разрешение методики (~200 мкм) определялось диаметром камеры-обскуры, формирующей изображение и геометрией эксперимента.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Эксперименты со «стандартной» каскадной сборкой

В работе ставилась задача повышения удельной мощности излучения пинча. Все эксперименты сравнивались с результатами сжатия двухкаскадной многопроволочной нагрузкой с длиной обоих каскадов 1.6 см. Параметры такой нагрузки согласованы с параметрами генератора тока и составляют: внешний каскад — 40 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренний каскад — 20–60 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 110–330 мкг/см. Такую нагрузку мы будем называть условно «стандартной».

На рис. 4 приведены синхронизованные осциллограммы сигналов с эксперимента № 6787, где в качестве нагрузки использовалась «стандартная» двухкаскадная многопроволочная сборка (внешний каскад — 40 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренний каскад — 30 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 165 мкг/см). В эксперименте при амплитуде тока через нагрузку 3.7 МА получена мощность излучения 7.8 ТВт с длительностью импульса ~6 нс при полном выходе излучения 86 кДж. Удельная мощность излучения составила 4.9 ТВт/см с удельным выходом излучения ~54 кДж/см.

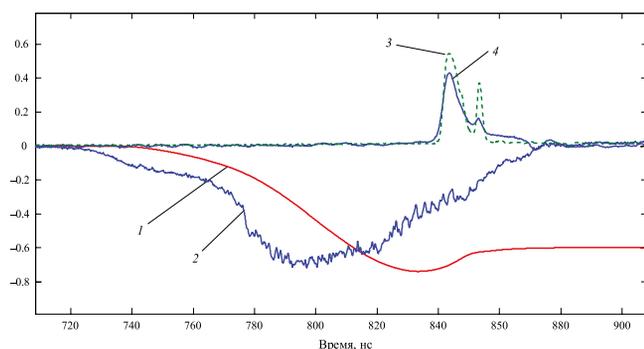


Рис. 4. Синхронизованные осциллограммы сигналов эксперимента № 6787: 1 — ток пинча $I / 5 \cdot 10^6$ А; 2 — напряжение на пинче $U / 10^6$ В; 3 — сигнал ВРД датчика s2e/ $5 \cdot 10^1$ В ($h\nu > 100$ эВ); 4 — сигнал ВРД-датчика s4e/ $5 \cdot 10^1$ В ($h\nu > 600$ эВ). Нагрузка: внешний каскад — 40 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренний каскад — 30 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 165 мкг/см. Максимальная мощность излучения 7.8 ТВт.

Таблица 1. Результаты экспериментов со «стандартными» сборками, у которых погонная масса внутреннего каскада изменялась в пределах 165–330 мкг/см

№ эксп.	Внешняя сборка	Внутренняя сборка	Мощность излучения, ТВт	Длительность импульса излучения, нс	Энергия излучения, кДж	Удельная мощность излучения, ТВт/см	Амплитуда тока пинча, МА
6787	40 W пров. на Ø 12 мм 220 мкг/см	30 W пров. на Ø 5 мм 165 мкг/см	7.9	6	86	4.9	3.7
7146	40 W пров. на Ø 12 мм 220 мкг/см	60 W пров. на Ø 5 мм 330 мкг/см	7.4	5.5	86	4.6	3.6
7154	40 W пров. на Ø 12 мм 220 мкг/см	60 W пров. на Ø 5 мм 330 мкг/см	7.7	6.5	103	4.8	3.9

В таблице 1 приведены результаты трех экспериментов с такими «стандартными» сборками, у которых погонная масса внутреннего каскада изменялась в пределах 165–330 мкг/см.

Как видно из данных, приведенных в таблице, удельная мощность излучения не превышала 5 ТВт/см, а полная мощность излучения находилась в пределах 7.6 ± 0.3 ТВт при длительности импульса излучения около 6 нс.

3.2. Эксперименты с каскадными вольфрамовыми сборками с длиной внутренней сборки 6–7 мм

В качестве нагрузки сильноточного генератора «Ангара-5-1» использовалась двухкаскадная многопроволочная сборка из вольфрамовых проволок. Индуктивность пинча на финальной стадии сжатия была уменьшена за счет геометрии электродов. В экспериментах использовались дополнительные катодные и анодные вставки с диаметром 5 мм, равным диаметру внутренней каскадной сборки, которые выступали в высоковольтный зазор на 5 мм. В этом случае из динамики формирования пинча исключаются участки внешней оболочки вблизи электродов.

Соответственно, длина внутренней сборки каскадной нагрузки составляла 0.6–0.7 см, при длине внешнего каскада 1.6 см (длина зазора катод-анод мишенного узла установки) (рис. 2).

Исследованы динамика сжатия и генерация мягкого рентгеновского излучения в зависимости от соотношения масс каскадов сборки при неизменных параметрах внешнего каскада. Внешний каскад представлял собой сборку из 40 W проволок

диаметром 6 мкм, расположенных на диаметре 12 мм ($m_w = 220$ мкг/см). Диаметр внутренней сборки составлял 5 мм, а количество вольфрамовых проволок диаметром 6 мкм в сборке изменялось от 20 до 60 ($m_w = 110$ –330 мкг/см). Отношение погонной массы внешнего каскада к погонной массе внутреннего каскада μ изменялось в пределах $\mu = 2$ –0.67. С уменьшением этого отношения сокращалась длительность импульса мягкого рентгеновского излучения с 20–23 нс при $\mu = 2$ до 15–18 нс при $\mu = 0.7$ –1.

На рисунке 5 приведены характерные осциллограммы сигналов, полученные в эксперименте ($\mu = 2$). В квантах с энергией 100–270 эВ длительность импульса излучения при сжатии нагрузки составляет порядка 20–22 нс. Максимальная мощность

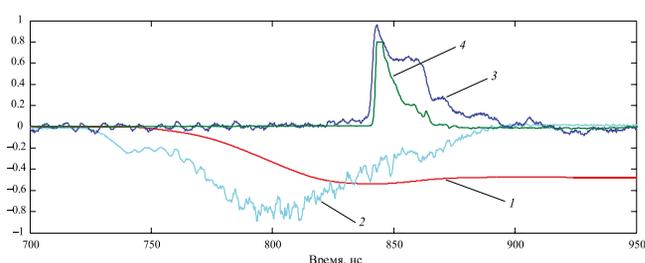


Рис. 5. Синхронизованные осциллограммы сигналов эксперимента № 6589. Нагрузка: внешняя сборка — 40 W проволок диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренняя сборка с уменьшенной индуктивностью — 20 W проволок диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 110 мкг/см; анодная и катодная металлические вставки диаметром 5 мм и длиной 5 мм; 1 — ток пинча $I/5 \cdot 10^6$ А; 2 — напряжение на пинче $U/10^6$ В; 3 — сигнал ВРД-датчика $s2e/10^1$ В ($h\nu > 100$ эВ); 4 — сигнал ВРД-датчика $s4e/2 \cdot 10^1$ В ($h\nu > 600$ эВ).

рентгеновского излучения составила порядка 3.5 ТВт, что соответствует мощности мягкого рентгеновского излучения на единицу длины пинча порядка 5 ТВт/см. По удельному энергокладу этот режим соответствует мощности излучения с пинча стандартной длины 1.6 см на уровне 8 ТВт. Поперечный размер пинча, снятый интегральной камерой-обскурой в квантах с энергией свыше 600 эВ, составил около 0.5 мм (рис. 6). В экспериментах получена энергия мягкого рентгеновского излучения 90 кДж при токе в нагрузку 2.8 МА. Несмотря на сильно уменьшенную длину пинча до 0.6–0.7 см, на нем получено

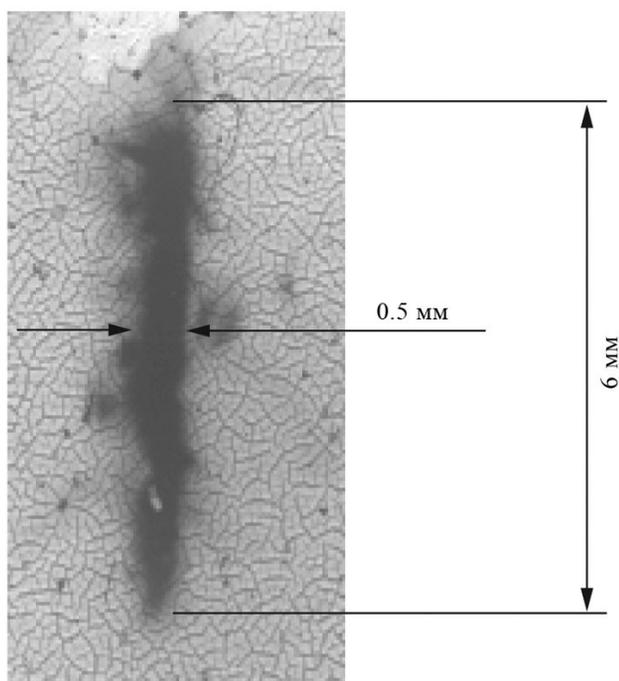


Рис. 6. Обскурограмма пинча в квантах с энергией свыше 600 эВ. Эксперимент № 6589.

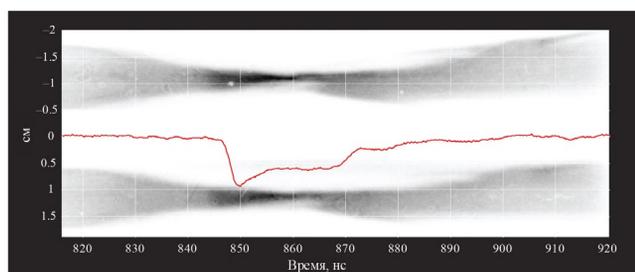


Рис. 7. Эксперимент № 6589. Радиальные оптические развертки сжатия каскадной сборки с уменьшенной длиной внутренней сборки. Верхняя развертка соответствует сжатию вблизи анодной вставки внутреннего каскада. Нижняя развертка соответствует сжатию вблизи катодной вставки внутреннего каскада. На развертку наложен сигнал ВРД-датчика s2e ($h\nu > 100$ эВ) (временная шкала соответствует шкале на рис. 5).

довольно высокое значение напряжения в момент сжатия (~ 300 кВ) (рис. 5).

На рис. 7 приведено изображение радиальных оптических разверток пинча синхронизированных с осциллограммой мягкого рентгеновского излучения вакуумного рентгеновского детектора s2e, имеющего максимальную спектральную чувствительность для квантов с энергией 100–270 эВ. Полученные оптические развертки показывают, что максимум мощности мягкого рентгеновского излучения соответствует моменту торможения ускоренной внешней плазменной оболочки на внутренней сборке. Поперечный размер пинча в оптическом излучении в этот момент составляет 2–3 мм с последующим дожатием до размера менее 1 мм за время порядка 5–8 нс. Такая динамика сжатия позволяет сделать вывод об увеличении роли во взаимодействии каскадов сборки магнитного поля тока внутреннего каскада. Влияние магнитного поля тока внутреннего каскада на динамику сжатия каскадных сборок было отмечено ранее в работах [14, 15].

На рис. 8 приведены характерные осциллограммы сигналов, полученные в эксперименте с укороченной длиной внутренней сборки, когда погонная масса внутренней сборки была увеличена до погонной массы внешней сборки. Видно, что в квантах с энергией 100–270 эВ длительность импульса излучения при сжатии нагрузки составляет порядка 18 нс. Максимальная мощность рентгеновского излучения составила порядка 5 ТВт, что соответствует мощности мягкого рентгеновского излучения на единицу длины пинча порядка 8 ТВт/см. По удельному энергокладу этот режим соответствовал бы мощности излучения с пинча длиной 1.6 см на уровне 12–13 ТВт. В экспериментах получена энергия мягкого рентгеновского излучения ~ 100 кДж (~ 140 кДж/см) при токе в нагрузку 3.8 МА. Таким образом, при увеличении погонной массы внутренней сборки с уменьшенной индуктивностью внутреннего каскада получено увеличение удельной мощности излучения по сравнению со «стандартной» каскадной сборкой.

На рис. 9 приведены кадровые рентгеновские изображения, полученные в моменты времени, соответствующи началу столкновения оболочек и формирования пинча для каскадной сборки с уменьшенной индуктивностью. На двух первых последовательно снятых кадрах видно, что в области приэлектродных вставок внешняя ускоренная оболочка полностью затормозилась на магнитном поле тока, протекающего по внутренней сборке. На рис. 10 схематично, для двух моментов времени,

показана динамика взаимодействия каскадов сборки через магнитное поле тока внутреннего каскада. На рис. 11 приведена фотография нагрузки, установленной в выходном узле установки. На рис. 12 приведена радиальная оптическая развертка сжатия каскадной сборки с наложенной на нее осциллограммой мягкого рентгеновского излучения. На развертке видно торможение внешней ускоренной оболочки на внутренней сборке. Первому максимуму рентгеновского излучения соответствует размер пинча порядка 2 мм с последующим сжатием до размера ~ 1 мм.

3.3. Эксперименты с каскадными вольфрамовыми сборками с длиной внутренней сборки 10–11 мм

Исследованы динамика сжатия и генерация мягкого рентгеновского излучения в зависимости от соотношения масс каскадов сборки при неизменных параметрах внешнего каскада. В этой серии экспериментов длина внутренней укороченной сборки была увеличена с 0.6–0.7 см до 1.0–1.1 см при неизменной длине внешней сборки 1.6 см. Отношение погонной массы внешнего каскада к погонной массе внутреннего каскада μ изменялось, как и ранее, в пределах $\mu = 2-0.67$. С уменьшением этого отношения сокращалась длительность импульса мягкого рентгеновского излучения с 18 нс при $\mu = 2$ до 15 нс при $\mu = 0.7-1$. Максимальная мощность излучения при этом увеличивалась от 7.5 до 11 ТВт. Начальный диаметр и погонная масса внешней сборки не изменялись.

И в этом случае с точки зрения генерации высокой удельной и полной мощности излучения оптимальными оказались сборки, у которых μ изменялась в пределах $\mu = 0.7-1$. Синхронизованные осциллограммы сигналов и радиальные оптические развертки приведены на рис. 13–16.

Импульс излучения состоял из двух пиков. Длительность первого пика мощностью мягкого рентгеновского излучения до 10–11 ТВт составляла 5 нс. Мощность излучения во втором пике составила 5–6.5 ТВт (5–6.5 ТВт/см). Максимальная полученная удельная мощность излучения составила 11 ТВт/см. Максимальный удельный выход излучения, по показаниям термопарного калориметра, достигал значений 135–140 кДж/см. Как показывают рентгеновские кадровые изображения, излучение, возникающее при взаимодействии внешней оболочки с катодной и анодной вставками, незначительное. Длительности импульсов мягкого рентгеновского излучения, полученные с ВРД детекторов

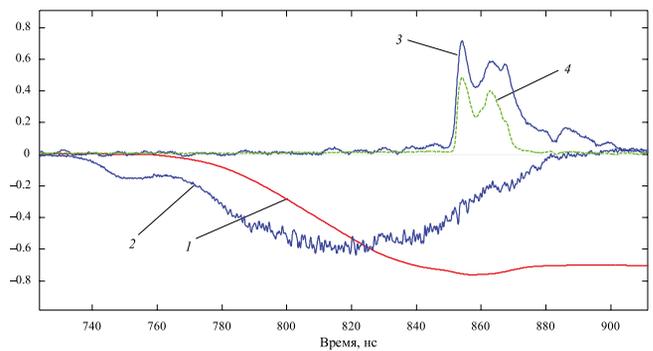
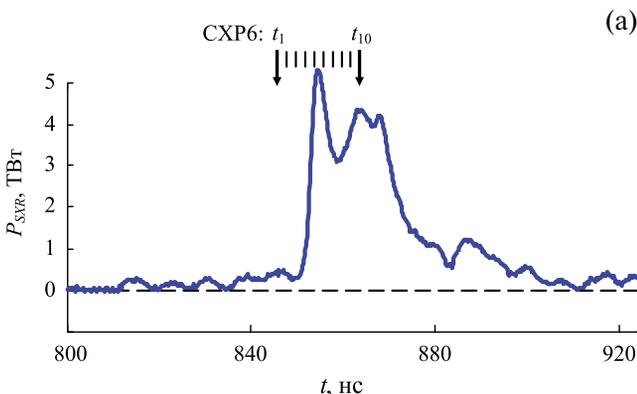
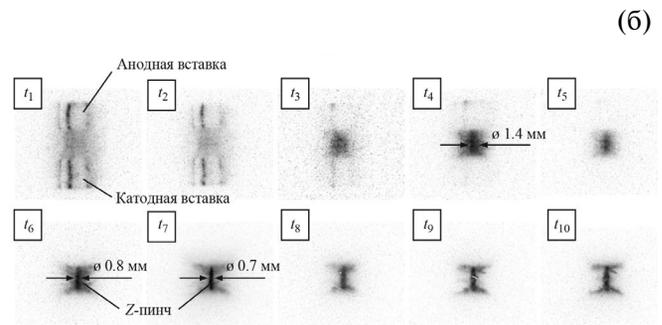


Рис. 8. Синхронизованные осциллограммы сигналов эксперимента № 6903: 1 — ток пинча $I/5 \cdot 10^6$ А; 2 — напряжение на пинче $U/10^6$ В; 3 — сигнал ВРД-датчика $s2e/2 \cdot 10^1$ В ($h\nu > 100$ эВ); 4 — сигнал ВРД-датчика $s4e/5 \cdot 10^1$ В ($h\nu > 600$ эВ). Нагрузка: внешний каскад — 40 W проволочек диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренний каскад с уменьшенной индуктивностью — 40 W проволочек диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 220 мкг/см; анодная и катодная металлические вставки диаметром 5 мм и длиной 5 мм. Максимальная мощность мягкого рентгеновского излучения 5.2 ТВт.



(а)



(б)

Рис. 9. Результаты эксперимента № 6903: временная зависимость мощности МРИ (P_{SXR}) (а); рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплюзии вложенной сборки (б), синхронизованные с представленными на (а) кривыми, где времена регистрации кадров t_1-t_{10} указаны вертикальными стрелками (\downarrow СХР6). Анод — вверх, катод — вниз.

с различной спектральной чувствительностью $s3e$ ($h\nu > 20$ эВ), $s2e$ ($h\nu > 100$ эВ) и $s4e$ ($h\nu > 600$ эВ) практически не отличаются друг от друга. В табл. 2 приведены результаты трех экспериментов с укороченными сборками, у которых погонная масса внутреннего каскада изменялась в пределах 110–330 мкг/см. Из табл. 2 видно, что максимальная мощность мягкого рентгеновского излучения получается при погонной массе внутренней сборки, сравнимой или больше массы внешней сборки.

Спектры излучения плазмы, образованной на нагрузке генератора, зарегистрированные спектрографом скользящего падения GIS-3d [16] с аксиальным разрешением за ~ 10 нс (и еще раньше) до основного пика излучения, не показывают заметной разницы в спектрах излучения по высоте нагрузки (рис. 17).

Вблизи максимума излучения пинча интенсивность спектра из середины нагрузки многократно превышает интенсивность излучения из приэлектродных областей (рис. 18), при этом спектр излучения из середины нагрузки более коротковолновый. Интенсивность спектра излучения плазмы приэлектродных вставок существенно меньше интенсивности спектра плазмы центральной части нагрузки и слабо меняется со временем вблизи максимума импульса излучения (рис. 19).

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характер взаимодействия ускоренной внешней сборки с внутренней сборкой существенно зависит от величины тока, протекающего через внутреннюю сборку. Величина тока через внутреннюю сборку определяется диффузией магнитного поля через плазменную оболочку внешней многопроволочной сборки, индуктивностямиборок и их взаимной индуктивностью. 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 — индуктивность внешней сборки и I — величина полного тока через нагрузку. Если брать стандартную каскадную сборку с длиной обеихборок равной зазору катод-анод ($l = 1.6$ см), то для используемой геометрии начальная индуктивность внешней сборки радиуса $r_1 = 0.6$ см составит $L_1 = 2 \ln(R/r_1) = 6.8$ нГ ($R = 5$ см — радиус обратного токопровода). Соответственно, начальная индуктивность внутренней сборки L_2 радиуса $r_2 = 0.25$ см составит $L_2 = 9.6$ нГ, а отношение начальных индуктивностей $L_2/L_1 = 1.4$.

На начальной стадии протекания тока через нагрузку можно пренебречь омическим сопротивлением каскадов. Индуктивный характер нагрузки на начальной стадии протекания тока виден из пропорциональности производной тока через нагрузку напряжению на ней (рисунк 20) в течение времени 60–70 нс от начала тока. Однако

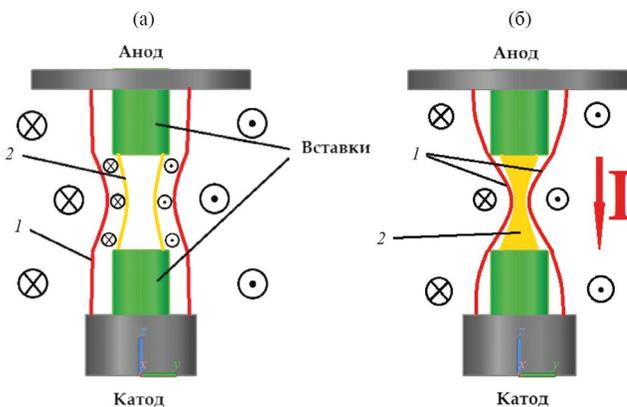


Рис. 10. Динамика взаимодействия каскадов сборки: 1 — плазменная оболочка внешней сборки; 2 — плазменная оболочка внутренней сборки.

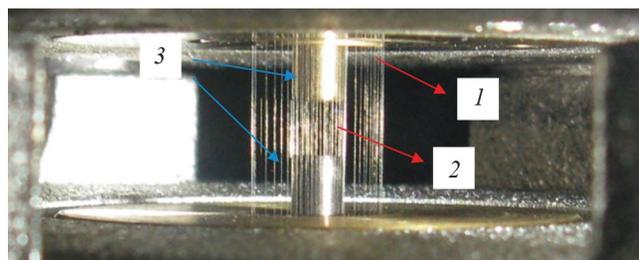


Рис. 11. Эксперимент № 6903. Фотография нагрузки, установленной в выходной части ускорителя: 1 — внешняя многопроволочная сборка; 2 — внутренняя многопроволочная сборка; 3 — электродные вставки.

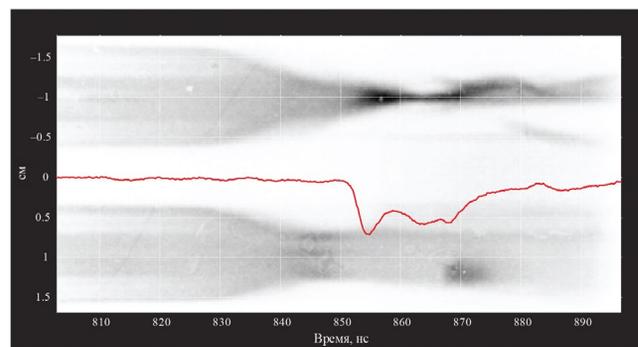


Рис. 12. Эксперимент № 6903. Радиальные оптические развертки сжатия каскадной сборки с уменьшенной длиной внутренней сборки. Верхняя развертка соответствует сжатию между анодной и катодной вставками внутреннего каскада. Нижняя развертка соответствует сжатию в области катодной вставки внутреннего каскада. На развертку наложен сигнал ВРД датчика $s2e$ ($h\nu > 100$ эВ) (временная шкала соответствует шкале на рис. 8).

Таблица 2. Результаты экспериментов с укороченными сборками с длиной внутреннего каскада 10 мм и изменением погонной массы внутреннего каскада в пределах 110–330 мкг/см

№ эксп.	Внешняя сборка	Внутренняя сборка	Мощность излучения, ТВт	Длительность импульса первого пика излучения, нс	Энергия излучения, кДж	Удельная мощность излучения, ТВт/см.	Амплитуда тока пинча, МА
7087	40 W пров. на Ø 12 мм 220 мкг/см	60 W пров. на Ø 5 мм 330 мкг/см	11	5.0	135÷140	11	3.60
7088	40 W пров. на Ø 12 мм 220 мкг/см	40 W пров. на Ø 5 мм 220 мкг/см	9.4	7.5	130÷135	9.4	3.65
7089	40 W пров. на Ø 12 мм 220 мкг/см	20 W пров. на Ø 5 мм 110 мкг/см	7.5	9.0	120÷125	7.5	3.60

учет проводимости внешней сборки существенен для расчета перераспределения тока в каскадах нагрузки.

Расчеты, проведенные по одномерному трехтемпературному РМГД-коду для параметров установки «Ангара-5-1» и двухкаскадной цилиндрической многопроволочной сборки из вольфрамовых проволочек (внешний каскад диаметром 12 мм, 40 W проволочек диаметром 6 мкм, длина 1.6 см, и внутренний каскад-сборка диаметром 6 мм, 20 W проволочек диаметром 6 мкм и длиной 1.6 см), показывают, что непосредственно перед соударением оболочек по внутренней сборке протекает около 20% от полного тока [17]. Как показывают расчеты, 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 магнитный поток тока, протекающего по внутренней сборке, сжимается внешней токовой оболочкой. В этом случае сжатие внутренней сборки происходит раньше сжатия внешней плазменной оболочки.

Измерения тока, протекающего по внутренней сборке каскадной многопроволочной нагрузки магнитными зондами, показали, что ток начинает протекать одновременно по внешней и внутренней сборкам [18]. Доля тока, протекающего по внутренней сборке до прихода плазмы от внешней сборки, составляет 3–5% от полного тока до 40-й нс от начала тока.

На начальной стадии имплозии каскадной нагрузки 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 (это подтверждается и спектрами, которые на начальном этапе за ~10 нс до пика импульса слабо меняются с высотой вдоль нагрузки). При сохранении величины магнитного потока в контуре между сборками ток через внутреннюю сборку растет обратно пропорционально ее индуктивности (длине). Соответственно, для нагрузки с укороченной внутренней сборкой доля от полного тока, протекающего по ней, должна увеличиться приблизительно в 1.5 раза и составлять порядка 30%.

Наиболее важным полученным экспериментальным результатом является сохранение полного выхода излучения даже при значительном

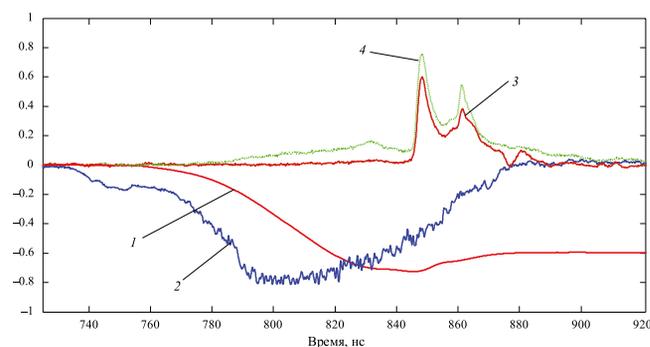


Рис. 13. Эксперимент № 7087. Синхронизированные осциллограммы сигналов рентгеновского излучения, напряжения и тока: 1 — ток I через пинч $I/5 \cdot 10^6$ А; 2 — напряжение U на пинче $U/10^6$ В; 3 — сигнал с вакуумного рентгеновского диода $s2e/2 \cdot 10^4$ В ($100 \text{ эВ} < h\nu < 280 \text{ эВ}$ и $h\nu > 400 \text{ эВ}$); 4 — сигнал с вакуумного рентгеновского диода $s3e/5$ В ($h\nu > 20 \text{ эВ}$). Мощность излучения в первом пике 11 ТВт (по ВРД $s2e$), полный выход излучения 130–140 кДж. Нагрузка: внешняя сборка: 40 W проволочек диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренняя сборка с уменьшенной индуктивностью: 60 W проволочек диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 330 мкг/см.

уменьшении длины внутренней сборки (длины пинча). Этот результат был получен ранее в работе по сжатию каскадных вольфрамовых сборок, имеющих уменьшенную индуктивность на конечной стадии пинчевания [19]. Однако в этой работе полученная удельная мощность мягкого рентгеновского излучения не превышала 5 ТВт/см, что соответствует мощности излучения с пинча стандартной длины 1.6 см на уровне 8 ТВт.

Если пренебречь омическим сопротивлением сжимаемых оболочек, то на стадии сжатия ток через внутреннюю сборку растет обратно пропорцио-

нально ее индуктивности, так как должна сохраняться величина потока магнитного поля в контуре между сборками. При этом ток через внешнюю сборку падает. Сжатие магнитного потока происходит по всей длине внутренней нагрузки, включая электродные вставки, за счет которых уменьшается индуктивность пинча на конечной стадии сжатия. Таким образом, часть кинетической энергии ускоренной внешней оболочки расходуется на увеличение энергии магнитного поля тока внутренней сборки. Эта энергия, при сохранении величины потока магнитного поля в контуре между сборками

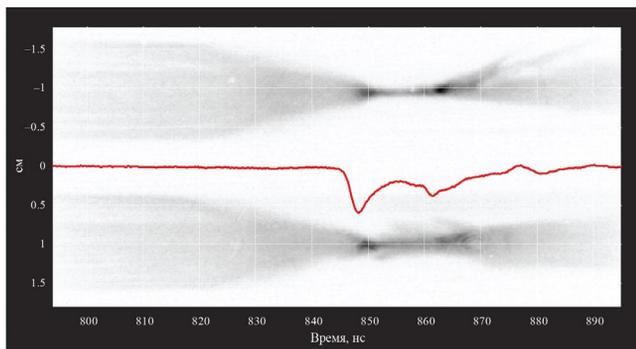


Рис. 14. Эксперимент № 7087. Радиальные оптические щелевые развертки с наложенным на них синхронизованным сигналом мягкого рентгеновского излучения ВРД $s2e/5 \cdot 10^1$ В ($h\nu \geq 100$ эВ).

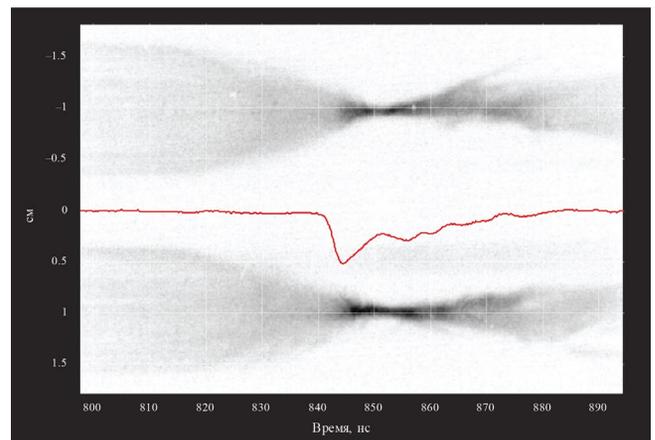


Рис. 16. Эксперимент № 7088. Радиальные оптические щелевые развертки с наложенным на них синхронизованным сигналом мягкого рентгеновского излучения ВРД $s2e/5 \cdot 10^1$ В ($h\nu \geq 100$ эВ).

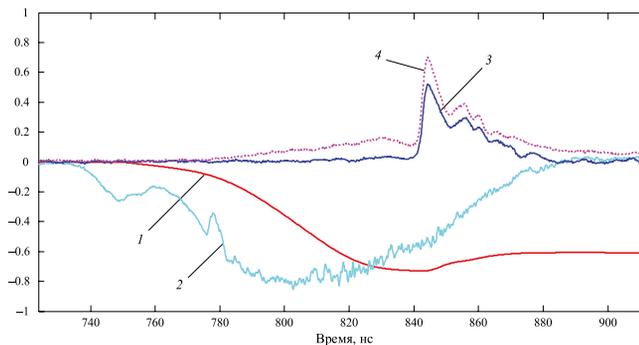


Рис. 15. Эксперимент № 7088. Синхронизованные осциллограммы сигналов рентгеновского излучения, напряжения и тока: 1 — ток I через пинч $I/5 \cdot 10^6$ А; 2 — напряжение U на пинче $U/10^6$ В; 3 — сигнал с вакуумного рентгеновского диода $s2e/5 \cdot 10^1$ В ($h\nu > 100$ эВ); 4 — сигнал с вакуумного рентгеновского диода $s3e/5$ В ($h\nu > 20$ эВ). Мощность излучения в первом пике 9.4 ТВт, полный выход излучения ~ 130 кДж. Внешняя сборка: 40 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 12 мм и погонной массой 220 мкг/см; внутренняя сборка с уменьшенной индуктивностью: 40 W провололок диаметром 6 мкм на диаметре 5 мм с погонной массой 220 мкг/см.

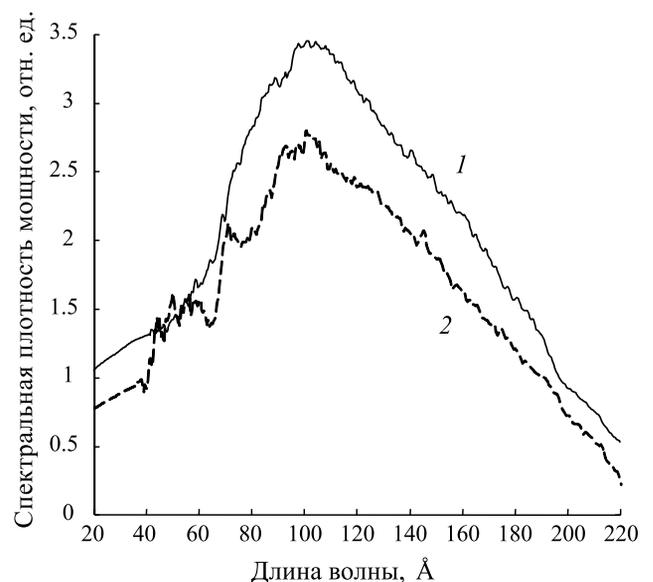


Рис. 17. Выстрел № 7002. Спектры излучения нагрузки генератора из середины нагрузки (1) и области катодной электродной вставки (2), зарегистрированные за $t_p - t_{\max} = -12$ нс до максимума излучения пинча.

($LI = \text{const}$), обратно пропорциональна индуктивности внутренней сборки ($E_{\text{mag}} = 0.5(LI)^2/L$). Полученные высокие полная и удельная мощности излучения связаны как с формированием квази-сплошной компактной оболочки из внутренней сборки за счет начального межпроволочного расстояния всего 260–390 мкм и быстром нарастании тока через нее, так и передачей импульса (кинетической энергии) от внешней оболочки при столкновении.

Удельная и полная мощности излучения пинча длиной 1 см (~ 10 – 11 ТВт/см), полученные при сжатии каскадной нагрузки с уменьшенной индуктивностью, превышают удельную и полную мощности излучения пинча, полученные при сжатии «стандартной сборки» длиной 16 мм (~ 5 ТВт/см и 7.6 ТВт) с теми же параметрами. Большая длительность импульса мягкого рентгеновского излучения (~ 15 – 18 нс) связана, скорее всего, с большей величиной тока, генерируемого на внутреннем укороченном каскаде сборки при взаимодействии с внешней сборкой, по сравнению с током, генерируемым на внутренней не укороченной сборке. В результате этого увеличивается задержка сжатия внешней сборки относительно сжатия внутренней сборки.

Для сборки, имеющей внутренний каскад длиной, равной длине внешнего каскада (1.6 см), динамика взаимодействия каскадов также должна осуществляться через сжатие магнитного потока тока внутреннего каскада. При этом длительность импульса мягкого рентгеновского излучения сокращается до 6–8 нс, что можно объяснить меньшей величиной тока, генерируемого на внутренней сборке и, как следствие, уменьшением задержки сжатия внешней сборки относительно сжатия внутренней сборки.

Таким образом, динамика сжатия каскадной сборки с уменьшенной индуктивностью внутреннего каскада показывает увеличение роли магнитного поля тока внутреннего каскада по сравнению со сжатием «стандартной» каскадной сборки. С точки зрения генерации максимальной удельной мощности излучения наиболее оптимальными оказались нагрузки с близкими погонными массами внутренней и внешней сборки.

Отметим, что режим сжатия через взаимодействие каскадов через магнитное поле наблюдался в экспериментах с каскадными сборками на установке MAGPIE [20]. В этих экспериментах величина тока через внутреннюю сборку оценивалась из численных расчетов и составляла величину на уровне 20% от величины полного тока в нагрузке.

На рис. 21а, б показан вариант использования взаимодействия оболочек каскадной сборки через магнитное поле тока внутреннего каскада применительно к схеме статического «хольраума» с непрямым облучением сферических мишеней. В схеме возможен захват части тока внутренней сборкой, удерживающей статический «хольраум». В этом случае при взаимодействии каскадов практически всю кинетическую энергию внешней

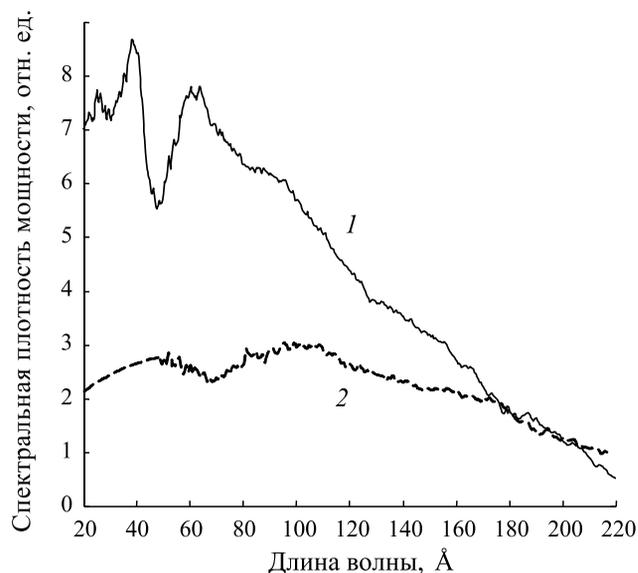


Рис. 18. Выстрел № 7002. Спектры излучения нагрузки генератора из середины нагрузки (1) и области катодной вставки (2), зарегистрированные за $t_p - t_{\text{max}} = -12$ нс до максимума излучения пинча.

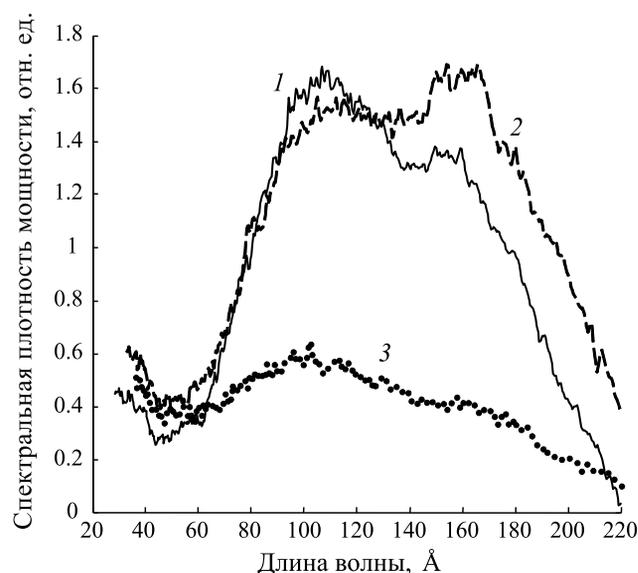


Рис. 19. Выстрел № 6786. Спектры излучения плазмы прикатодной вставки в разные моменты времени $t_p - t_{\text{max}} = -5$ (1), 0 (2), +5 нс (3).

ускоренной оболочки можно использовать для генерации излучения в «хольрауме» двумя образующимися приэлектродными пинчами. Следует отметить, что предлагаемая схема не является идентичной схеме каскадной сборки с уменьшенной индуктивностью на конечной стадии сжатия пинча, исследованной в данной работе, и нуждается в экспериментальной проверке. Дополнительно нужно учитывать неодновременность сжатия пинча по длине цилиндрической многопроволочной нагрузки («зиппер»-эффект) на работу предлагаемого варианта нагрузки [21]. В этой работе на установке *Z* исследовалось влияние зиппер-эффекта на синхронность выхода рентгеновского излучения в радиальном и аксиальном направлениях вложенных проволочныхборок с целью применения их в схеме динамического «хольраума» для ИТС.

5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

При сжатии каскадных многопроволочных вольфрамовыхборок, имеющих уменьшенную индуктивность на конечной стадии сжатия, получена мощность мягкого рентгеновского излучения ~ 10 – 11 ТВт с выходом рентгеновского излучения порядка 130 – 140 кДж для пинча длиной 1 см. Удельная и полная мощности излучения пинча длиной 1 см, полученные при сжатии каскадной нагрузки с уменьшенной индуктивностью (~ 10 – 11 ТВт/см), превышают удельную и полную мощности излучения пинча, полученные при сжатии «стандартной сборки» длиной 1.6 см (~ 5 ТВт/см и 7.6 ТВт) с теми же параметрами. Динамика сжатия такой нагрузки свидетельствует об увеличении во взаимодействии каскадов роли магнитного поля тока, протекающего по внутреннему каскаду. Большая длительность импульса мягкого рентгеновского излучения (~ 15 – 18 нс) связана, скорее всего, с большей величиной тока, генерируемого на внутреннем укороченном каскаде сборки в процессе взаимодействия с внешним каскадом, по сравнению с током, генерируемом на внутреннем каскаде не укороченной сборки. В результате этого увеличивается задержка сжатия внешней сборки относительно сжатия внутренней сборки. Полученные высокие полная и удельная мощности излучения связаны как с формированием квазисплошной компактной оболочки из внутренней сборки за счет начального межпроволочного расстояния всего 260 – 390 мкм и быстром нарастании тока через нее, так и с эффективной передачей импульса (кинетической энергии) от внешней оболочки при столкновении.

Предложен вариант использования взаимодействия оболочек каскадной сборки через магнитное поле тока внутреннего каскада применительно к схеме статического «хольраума» для непрямого облучения сферических мишеней. В схеме возможен захват части тока внутренней сборкой, удерживающей статический «хольраум». В этом случае при взаимодействии каскадов практически вся кинетическая энергия внешней ускоренной оболочки может быть преобразована в мягкое рентгеновское излучение двумя образующимися приэлектродными пинчами.

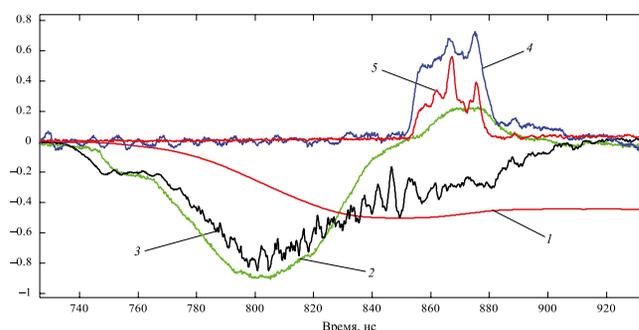


Рис. 20. Синхронизованные осциллограммы сигналов эксперимента № 6591: 1 — ток пинча $I/5 \cdot 10^6$ А; 2 — производная тока пинча; 3 — напряжение на пинче $U/10^6$ В; 4 — сигнал ВРД-датчика $s2e/10^1$ В ($h\nu > 100$ эВ); 5 — сигнал ВРД датчика $s4e/2 \cdot 10^1$ В ($h\nu > 600$ эВ). Нагрузка: внешний 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.

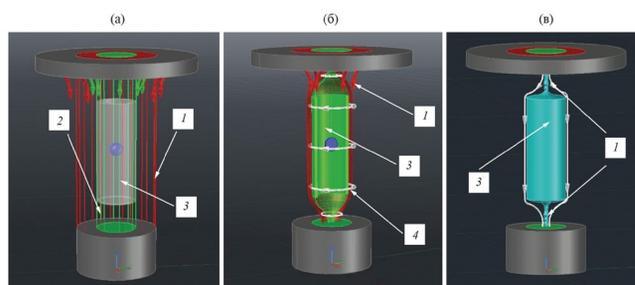


Рис. 21. Вариант схемы нагрузки статического «хольраума» с каскадной многопроволочной сборкой (а): 1 — внешняя сборка; 2 — внутренняя сборка; 3 — статический «хольраум»; сжатие нагрузки через взаимодействие каскадов через магнитное поле внутреннего каскада (б): 1 — внешняя сборка; 3 — статический «хольраум»; 4 — магнитное поле тока внутреннего каскада; сжатие нагрузки через взаимодействие каскадов через магнитное поле внутреннего каскада с образованием двух излучающих приэлектродных пинчей (в): 1 — приэлектродные излучающие пинчи; 3 — «хольраум».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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 T.W.L., Seaman 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., Peterson D.L.* // *Phys. Plasma*. 1998. V. 5. P. 2105.
2. *Jones M.C., Ampleford D.J., Cuneo M.E., Hohlfelder R., Jennings C.A., Johnson D.W., Jones B., Lopez M.R., MacArthur J., Mills J.A., Preston T., Rochau G.A., Savage M., Spencer D., Sinars D.B., Porter J.L.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2014. V. 85. P. 083501.
3. *Smirnov V.P.* // *Plasma Phys. Control Fusion*. 1991. V. 33. P. 1697.
4. *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., Gibson C.R.* // *Fusion Technol.* 1999. V.35. P. 260.
5. *Wessel F.J., Etlicher B., Choi P.* // *Phys. Rev. Lett.* 1992. V. 69. P. 3181.
6. *Захаров С.В., Смирнов В.П., Гасилов В.А., Круковский А.Ю., Скороваров К.В.* Препринт ИАЭ, 4587/6. М.: 1988.
7. *Захаров С.В., Новиков В.Г.* Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша, № 061, 2002.
8. *Альбикиов 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. С. 26.
9. *Олейник Г.М.* // *ПТЭ*. 2000. № 3. С. 49.
10. *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.
11. *Олейник Г.М., Браницкий А.В.* // *ПТЭ*. 2000. № 4. С. 58.
12. *Александров В.В., Волков Г.С., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Лахтюшко Н.И., Медовщиков С.Ф., Олейник Г.М., Светлов Е.В.* // *Физика плазмы*. 2014. Т. 40. С. 160.
13. <http://www.vniia.ru/production/bystroprotekaushie-processy/apparatura-dlya-registratsii-bystroprotekaushchikh-protsessov.php>
14. *Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Сасоров П.В.* // *Физика плазмы*. 2006. Т. 32. С. 33.
15. *Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грицук А.Н., Браницкий А.В., Фролов И.Н., Грабовский Е.В., Сасоров П.В., Ольховская О.Г., Зайцев В.И.* // *Физика плазмы*. 2018. Т. 44. С. 157.
16. *Скобляков А.В., Колесников Д.С., Каницырев А.В., Голубев А.А., Рудской И.В., Грицук А.Н., Грабовский Е.В., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М.* // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. С. 558.
17. *Ning Cheng, Ding Ning, Liu Quan, Yang Zhen-Hua, Fan Wen-Bin, Zhang Yang* // *Chinese Phys. Lett.* 2006. V. 23. P. 1857.
18. *Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Сасоров П.В.* // *Физика плазмы*. 2006. Т. 32. С. 33.
19. *Волков Г.С., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Комаров Г.Л., Рупасов А.А., Фролов И.Н., Хилько М.В.* // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. С. 317.
20. *Lebedev S.V., Chittenden J.P., Aliaga-Rossel R., Bland S.N., Dangor A.E., Haines M.G.* // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. P. 1709.
21. *Sanford T.W.L., Jennings C.A., Rochau G.A., Rosenthal S.E., Sarkisov G.S., Satorov P.V., Stygar W.A., Bennett L.F., Bliss D.E., Chittenden J.P., Cuneo M.E., Haines M.G., Leeper R.J., Mock R.C., Nash T.J., Peterson D.L.* // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98. P. 065003-1.

INCREASE IN POWER OF RADIATION AND SPECIFIC CONCENTRATION OF ENERGY OF PLASMA OF THE HIGH-CURRENT Z-PINCHES DUE TO COMPRESSION OF THE CASCADE WIRE ARRAYS INTERACTING VIA MAGNETIC FIELD

G. S. Volkov^{a, b, *}, E. V. Grabovskii^a, A. N. Gritsuk^a, K. N. Mitrofanov^a,
A. A. Rupasov^{c, **}, I. N. Frolov^a

^aTroitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk, Moscow oblast, 108840 Russia

^bRussian Technological University Moscow Institute of Radiotechnics, Electronics, and Automation (MIREA),
Moscow, 123308 Russia

^cLebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: volkov@triniti.ru

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

Abstract—Experiments on compression of cascade tungsten wire arrays with reduced inductance at the final stage of pinching aimed at increasing the specific concentration of plasma energy of the high-current Z-pinches were carried out. The experiments were conducted at the Angara-5-1 facility at load current of up to 4 MA. The highest radiation power per unit pinch length were obtained using the cascade wire arrays in which mass per unit length of the inner wire array with reduced inductance was in the range between 1 and 1.5 that of the outer wire array. The soft X-ray radiation power of $P \sim 11$ TW was obtained from the 1-cm-long pinch. The specific yield of the soft X-ray radiation was in the range of 130–140 kJ/cm. The total and specific powers of the pinch radiation obtained upon compression of the cascade load with reduced inductance exceeded the total and specific powers of the pinch radiation obtained by compression of a “standard” wire array with a length of 1.6 cm with the same parameters (7–8 TW and 5 TW/cm, respectively). The yield of the soft X-ray radiation did not change upon reduction in the length of the emitting pinch from 1.6 to 0.6 cm. The compression dynamics of such a load is indicative of an increased role played by the magnetic field of the current flowing in the inner cascade in interaction of the cascades. A variant of using interaction of the cascade-array shells via the magnetic field of the inner-cascade current as applied to the scheme of the statistical «hohlraum» with indirect irradiation of spherical targets is proposed. The scheme enables entrainment of part of the current by the inner wire array that confines the statistical «hohlraum». In this case, interaction of cascades allows using nearly entire kinetic energy of the accelerated outer shell for generation of radiation in the statistical «hohlraum» by two forming near-electrode pinches.

Keywords: high current Z-pinch, multiwire cascade assemblies, specific radiation power, magnetic field of the internal cascade current, pinch inductance, statistical hohlraum