

МОЩНЫЙ ИСТОЧНИК МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ Z-ПИНЧА ВЛОЖЕННЫХ СБОРОК ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ФИЗИКЕ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ

© 2024 г. К. Н. Митрофанов^{а,*}, А. Н. Грицук^а, В. В. Александров^а, А. В. Браницкий^а,
Е. В. Грабовский^а, И. Н. Фролов^а, В. В. Рыжаков^а

^а ГИЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Москва, Троицк, Россия

*e-mail: mitrofan@triniti.ru

Поступила в редакцию 29.03.2024 г.

После доработки 19.04.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Представлены результаты работ по созданию мощного источника мягкого рентгеновского излучения (МРИ, $h\nu > 100$ эВ) на основе Z-пинча компактных вложенныхборок. Одно из применений такого источника излучения возможно для радиационной абляции мишеней из различных веществ в экспериментах по физике высокой плотности энергии и экстремального состояния вещества, активно проводимых в настоящее время в мире. На мощной электрофизической установке Ангара-5-1 при уровне разрядного тока до 3.5 МА проведены эксперименты по сжатию плазмы двухкаскадных вложенныхборок смешанного состава с различным отношением радиусов каскадов. Внешний каскад состоял из волокон вещества с малым атомным номером (полипропилен), внутренний каскад — из вещества с высоким атомным номером (вольфрам). Было показано, что в случае вложенныхборок данной конструкции возможно получить существенное (в ~ 1.4 раз) повышение пиковой мощности МРИ по сравнению с одиночными W-борокми с теми же параметрами, что и у W-борокми во внутреннем каскаде. При этом спектральные данные, полученные при помощи спектрографа скользящего падения с «плоским полем», демонстрируют существенное уменьшение доли ионов вольфрама в отставшей плазме вокруг пинча вложенныхборок. Путем оптимизации линейной массы внешнего каскада и его радиуса получены мощные и короткие импульсы МРИ амплитудой ~ 10 ТВт, энергией ~ 130 кДж и длительностью ~ 4 – 5 нс. Это позволило увеличить падающую плотность мощности и флюенс на мишень вплоть до 1.55 ТВт/см² и 17 кДж/см², соответственно, в экспериментах по экстремальному состоянию вещества, проводимых в настоящее время на установке.

Ключевые слова: импlosionия многопроволочной сборки, вложенные проволочные сборки, магнитное поле, тонкие проволоки/волокна, отставшая плазма, Z-пинча, рентгеновское излучение

DOI: 10.31857/S0367292124060057, EDN: PSSPQV

1. ВВЕДЕНИЕ

Для исследований в области инерциального термоядерного синтеза (ИТС) [1–5], физики высокой плотности энергии (ФВПЭ) и экстремального состояния вещества (ЭСВ) [6–8] необходимо применение мощных источников излучения. Особую важность при таких исследованиях имеет интервал энергий фотонов 50–300 эВ в области т.н. вакуумного экстремального ультрафиолета (ЭУФ). основополагающие эксперименты по ФВПЭ требуют создания макроскопических количеств вещества, которое однородно нагрето до экстремальных условий. На установке Ангара-5-1 проводятся исследования спектральной зависимости коэффициентов пропускания в ЭУФ-диапазоне горячей плазмы различных веществ (Al, Sn, In, Bi, Au и др.), полученной при объемном нагреве рентгеновскими лучами Z-пинча мишеней из различных веществ площадью более 1 см² [9–14]. При выполнении

этих работ была создана платформа по исследованию спектральных свойств высокотемпературной плазмы и разработана оригинальная схема одновременного облучения мощным потоком рентгеновских фотонов Z-пинча двух образцов тонкой мишени из исследуемого вещества, которая обеспечивает равномерное пространственное распределение энергии и мощности облучения при плотности на мишени (т.н. энергетической или лучистой экспозиции) в диапазоне 3 – 7 кДж/см² и 0.3 – 0.6 ТВт/см², и позволяет в одном выстреле определять спектральный коэффициент пропускания плазмы мишени с учетом ее собственного излучения, а также динамику разлета плазмы мишени на фронтальной и тыльной сторонах. Указанные потоки излучения пинча позволяют нагреть плазму мишени до 40 – 45 эВ при плотности ~ 1 мг/см³ [13, 14]. Для повышения температуры плазмы требуются более высокие плотности потоков излучения на

мишени. Это можно сделать, увеличивая мощность и энергию импульса излучения пинча, а также уменьшая расстояние от пинча до мишени.

Целью экспериментов, результаты которых представлены в этой работе, являлось дальнейшее развитие идеи создания мощного источника ЭУФ-излучения на основе Z-пинча вложенныхборок смешанного состава [15–17] для повышения энергетического вклада в мишень с помощью создания мощного источника излучения из более компактной (меньшего размера) проволочной сборки для применения его в будущих экспериментах по ЭСВ.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На установке Ангара-5-1 при уровне разрядного тока до 3.5 МА проведена серия из ~30 выстрелов по сжатию плазмы двухкаскадных вложенныхборок и одиночных W-борок с параметрами, идентичными внутреннему каскаду вложенныхборок (см. табл. 1). Установка Ангара-5-1 [18] представляет собой генератор сверхвысокой электрической мощности, состоящий из восьми включенных параллельно модулей. Длительность формируемого каждым модулем импульса напряжения на полувысоте составляет 90 нс. Измеренная на радиусе 5 см от оси нагрузки амплитуда импульса тока на согласованной нагрузке составляла ~5 МА ($\tau = 100\text{--}120$ нс), а измеренная на радиусе

6 см от оси амплитуда напряжения — $0.5\div 0.7$ МВ.

Конструкция вложенныхборок смешанного состава состояла из двух каскадов (см. рис. 1а): внешний каскад представлял собой волоконную сборку радиусом $r_{out} = 6$ мм, состоящую из различного количества полипропиленовых (PP) 8 мкм волокон, внутренний каскад - проволочная сборка из 40 вольфрамовых (W) 6 мкм проволок линейной массы 220 мкг/см. В некоторых случаях W-сборка состояла из 80 проволок линейной массы 440 мкг/см. Радиус r_{in} внутреннего каскада вложенныхборок в этой серии экспериментов имел следующие значения 3 мм и 4 мм. Оптимизация рентгеновского излучения Z-пинча вложенныхборок с различным отношением радиусов каскадов r_{in}/r_{out} проводилась путем изменения линейной массы внешнего каскада m_{out} в широком диапазоне значений от ~3 до ~25 мкг/см. Проведены сравнительные эксперименты по генерации импульса МРИ по сжатию плазмы одиночных W-борок с теми же параметрами (количество проволок, радиус сборки и ее масса), что и у W-борок во внутреннем каскаде (PP-W) вложенныхборок.

Типичные временные зависимости полного тока $I_t(t)$, протекающего через нагрузку, показаны на рис. 1б. Из представленных кривых видно, что амплитуда тока лежит в диапазоне от 3.2 до 3.5 МА для данной серии экспериментов с вложеннымибороками.

Таблица 1. Параметры вложенныхборок

Выстрел	Параметры			Примечание
	внешнего каскада*	внутреннего каскада	r_{in}/r_{out}	
7096, 7098	8 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~3.2 мкг/см	40 W 6 мкм проволочка, 220 мкг/см, $r_{in} = 3$ мм	0.5	поиск параметров вложенныхборок вблизи максимальных выходов МРИ
7093, 7094, 7095	12 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~4.8 мкг/см			
7090, 7091, 7102	24 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~9.8 мкг/см			
7100, 7101	60 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~24.6 мкг/см			
7137	60 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~24.6 мкг/см	80 W 6 мкм проволочка, 440 мкг/см, $r_{in} = 3$ мм		
7092, 7097, 7104	—	40 W 6 мкм проволочка, 220 мкг/см, $r_{in} = 3$ мм	—	одиночная сборка для сравнения
7161, 7162	8 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~3.2 мкг/см	40 W 6 мкм проволочка, 220 мкг/см, $r_{in} = 4$ мм	0.67	поиск параметров вложенныхборок вблизи максимальных выходов МРИ
7150, 7152, 7153	12 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~4.8 мкг/см			
7143, 7144, 7147	24 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~9.8 мкг/см			
7139, 7140, 7142	60 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~24.6 мкг/см			
7142	60 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~24.6 мкг/см			
7138, 7159, 7160	—	40 W 6 мкм проволочка, 220 мкг/см, $r_{in} = 4$ мм	—	одиночная сборка для сравнения

Примечание: $r_{out} = 6$ мм — радиус внешнего каскада; $h = 16$ мм — высотаборок; * — линейная масса 8 мкм PP-волокон может отличаться из-за немного различающейся плотности пластика в зависимости от партии изготовления. Серым цветом выделены ячейки с параметрами одиночной цилиндрической W-борок.

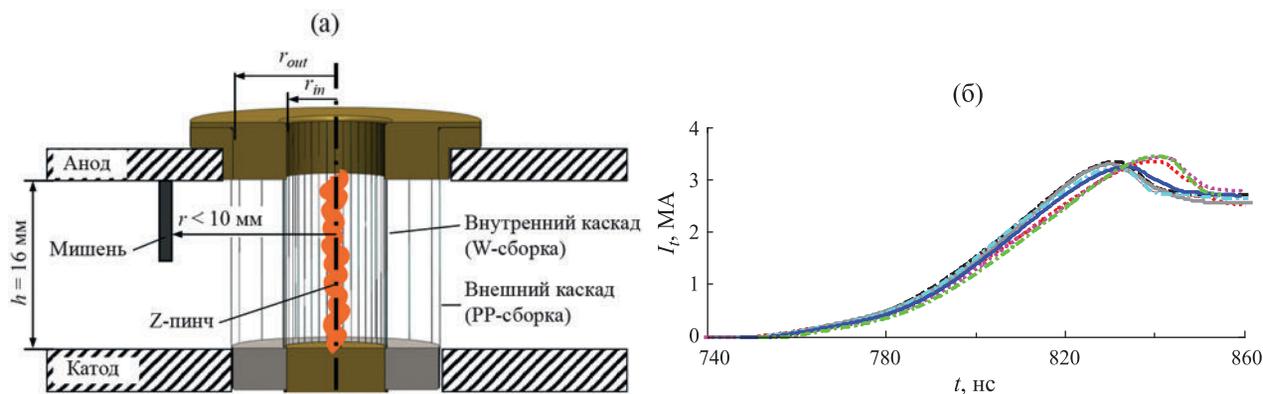


Рис. 1. Общий вид взаимного расположения вложенныхборок смешанного состава в межэлектродном зазоре установки Ангара-5-1 и облучаемой мишени (а) и типичные для представленной серии экспериментов временные зависимости полного тока $I_t(t)$, протекающего через нагрузку (б).

Для решения поставленных задач в экспериментах были использованы следующие диагностические методики: датчики излучения (вакуумные рентгеновские диоды (ВРД) и термопарный калориметр типа ВЧД-3), многокадровая рентгеновская камера СХР6 (10 кадров, 1 нс, $h\nu > 70$ эВ или $\lambda < 180$ Å) и квази-плоскопольный дифракционный ВУФ-спектрограф скользящего падения (QFF-VUV) с пространственным и временным разрешением (3 кадра, 1.5 нс, $\lambda/\Delta\lambda \sim 200$). Пространственное разрешение спектрографа в радиальном направлении (перпендикулярно оси пинча) составляло для энергии фотонов более 100 эВ порядка 300 мкм. В обычных спектрографах скользящего падения входная щель устанавливается на круге Роуланда, а плоскость детектора пересекается в одной точке плоскости Роуланда [19], в результате чего фокусировка происходит на одной длине волны, что приводит к ухудшению, за счет размывания изображения спектральных линий, спектрального разрешения на остальных длинах волн. Одним из способов решения данной проблемы является использование спектрографа скользящего падения с «плоским полем» (ССПП), в котором входная щель смещена относительно круга Роуланда [20]. Основными проблемами, препятствующими достоверному качественному и количественному восстановлению исходных рентгеновских спектров Z-пинча в области энергий квантов сотни эВ, являются наложение сигналов от разных порядков дифракции и сложный вид аппаратной функции прибора. Виртуальная модель рентгеновского спектрографа скользящего падения, разработанная в работе [21, 22], позволила выполнить подобный расчет полномасштабной виртуальной Монте-Карло модели ССПП, позволяющего минимизировать дефокусировку изображения спектральных линий в плоскости регистрации. В разработанной виртуальной модели спектрографа производится расчет распределения интенсивности излучения в различные порядки дифракции при взаимодействии с ди-

фракционной решеткой. При этом учитывается форма профиля штриха, материал и структура покрытия дифракционной решетки. Проведен расчет аппаратной функции спектрографа с «плоским полем» и найдено ее аналитическое приближение. С использованием полученной аппаратной функции спектрографа и итеративной методики было выполнено восстановление входного рентгеновского спектра излучения плазмы Z-пинча.

ВРД за разными фильтрами и термопарным калориметром ВЧД-3 регистрировался импульс мягкого рентгеновского излучения в спектральном диапазоне от 20 эВ вплоть до 1–2 кэВ на расстоянии ~ 3.5 м от пинча в радиальном направлении. По сигналам ВРД рассчитывалась мощность излучения в указанном диапазоне энергий квантов [23]. Погрешность измерения импульсов электромагнитной энергии термопарным калориметром ВЧД-3 не превышала $\sim 15\%$ [24].

Динамика сжатия плазмы вложенных и одиночныхборок регистрировалась по лазерным теневым изображениям. Трехкадровое теневое зондирование плазмы (с экспозицией кадра ~ 100 пс) осуществлялось световым пучком на второй гармонике частоты Nd:YAG-лазера ($\lambda = 532$ нм) в радиальном направлении с регистрацией двумерных изображений на цифровые фотоаппараты. Пространственное разрешение лазерной диагностики по объекту было не хуже 50–100 мкм. Также диагностический комплекс [25] установки Ангара-5-1 включал в себя электротехнические методы (датчики тока и напряжения): 8-ми петельный датчик производной полного тока и индуктивный делитель напряжения [26]. Места измерения напряжения и тока приблизительно соответствуют месту объединения токов отдельных модулей установки Ангара-5-1. Данные одновременного мониторинга профилей полного тока и напряжения вблизи нагрузки приблизительно в одной точке по радиусу позволили вычислять и исследовать временные про-

фили индуктивности лайнера на стадии финального сжатия плазмы в предположении малости сопротивления плазмы на данной стадии процесса.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Пространственно-временные характеристики динамики сжатия плазмы вложенныхборок смешанного состава с различным отношением радиусов каскадов

В экспериментах, выполненных на данном этапе исследований, использовались (PP-W) вложенные сборки с различным отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5$ и 0.67 у которых внешним каскадом была волоконная сборка радиусом $r_{out} = 6$ мм. В данном случае радиус внешнего каскада вложенныхборок был меньше, чем в наших предыдущих экспериментах ($r_{out} = 10$ мм, [15, 17]). Это было необходимо для оптимизации параметров импульса рентгеновского излучения в зависимости от массы внешнего каскада m_{out} и отношения радиусов каскадов r_{in}/r_{out} . Лайнеры с малым внешним радиусом используются в экспериментах на установке Ангара51 по радиационной абляции мишеней различных веществ [12, 13] по программе исследований по физике высокой плотности энергии, когда требуется как можно ближе располагать мишень к источнику излучения в радиальном направлении на расстояниях менее 10 мм.

Ниже, на рис. 2–8 представлены результаты экспериментов с (PP-W) вложенными сборками у которых линейная масса внешнего каскада менялась в диапазоне от ~ 3 мкг/см до ~ 25 мкг/см за счет изменения количества 8 мкм волокон N_{out} от 8 до 60. На данных рисунках в части (а) показаны временные зависимости производной полного тока dI_t/dt (кривая 1), напряжения U (кривая 2) и импульса мощности МРИ P_{SXR} (кривая 3) в наиболее представительном по энергии излучения спектральном диапазоне $h\nu > 100$ эВ. Там же могут быть показаны некоторые моменты времени: T_{pl}^{out} , T_{pl}^{in} — времена окончания плазмообразования на внешнем и внутреннем каскадах, T_f — время финального сжатия плазмы, соответствующее моменту пика мощности МРИ. Момент времени T_{pl}^{out} определяет начало процесса переключения тока внешнего каскада на внутренний каскад, а момент времени T_{pl}^{in} указывает на начало финальной стадии сжатия плазмы W-сборки во внутреннем каскаде вложенныхборок. На этой стадии процесса ($t > T_{pl}^{in}$) происходит быстрое сжатие плазмы с током к оси, которое сопровождается увеличением индуктивности разрядного контура. При этом нарушается подобие между формами производной полного тока и напряжения $U \approx L \cdot dI/dt$ (см. кривые 1 и 2), наблюдавшегося на стадии процесса плазмообразования PP-волокон внешнего и W-проволок внутреннего каскадов. Чем сильнее наблюдается расхождение кривых 1 и 2, тем эффективнее разрядный ток вме-

сте с плазмой проникает в приосевую область вложенныхборок, создавая условия для диссипации электромагнитной энергии цепи плазмой Z-пинча и получения высоких выходов рентгеновского излучения. Более подробно определение данных времен из электротехнических измерений тока, напряжения и индуктивности разряда, связанных с динамикой плазмы в многопроволочных сборках различных конструкций, представлено в работах [26–29]. Рядом с оциллограммами на рисунках показаны моменты времени регистрации кадровых рентгеновских (СХР6) и лазерных теневого (LAS) изображений, представленных в части рисунков (б) или (в).

Вложенные сборки с отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5$ ($\varnothing_{in}/\varnothing_{out} = 6$ мм/12 мм). С увеличением количества N_{out} с 8 до 60, что соответствовало увеличению линейной массы волокон во внешнем каскаде с ~ 3 мкг/см до ~ 25 мкг/см, по электротехническим измерениям производной тока dI/dt и напряжения U (см. кривые 1 и 2 на рис. 2а–5а) были определены времена окончания плазмообразования и начала сжатия плазмы внешнего и внутреннего каскадов. Время окончания плазмообразования и начала сжатия плазмы волокон внешнего каскада T_{pl}^{out} увеличивалось с увеличением массы их массы с 49 нс до 58 нс. Следует заметить, что параметры внутреннего каскада в большинстве выстрелов практически не менялись (40 W проволока, массой 220 мкг/см) и, поэтому, время T_{pl}^{in} было постоянным и лежало в диапазоне 66–70 нс. В выстрелах с увеличенной массой внутреннего каскада (80 W проволока, массой 440 мкг/см) время T_{pl}^{in} составляло бóльшую величину — около 80 нс. Согласование времен T_{pl}^{out} и T_{pl}^{in} , является необходимым условием синхронного сжатия плазмы внешнего и внутреннего каскадов для получения мощных импульсов МРИ малой длительности.

Как следует из рис. 2–5, при увеличении массы PP-сборки во внешнем каскаде с ~ 3 мкг/см до ~ 25 мкг/см наблюдается рост пиковой мощности МРИ с ~ 6 ТВт до 10 ТВт. Увеличение W-сборки в 2 раза массы во внутреннем каскаде не приводит к повышению пиковой мощности МРИ (см. рис. 5а). Это связано с компактностью сжатия плазмы к моменту T_f пиковой мощности МРИ (см. кривые 3). Действительно, на рентгеновских и лазерных кадровых изображениях видно, что в оптимальных по пиковой мощности излучения экспериментах, радиальный размер пинча составляет ~ 0.4 – 0.5 мм и ~ 0.5 – 0.6 мм, соответственно (см. рис. 3б, в). При этом вокруг пинча практически отсутствует отставшая плазма, способная шунтировать часть разрядного тока пинча. Это является следствием устойчивого сжатия плазмы W-сборки. На рентгеновский кадрах рис. 2б и 5б наблюдается сжатие плазмы внутреннего каскада без видимых неустойчивостей типа магнитной Релей-Тейлоровской неустойчивости, характерной для сжа-

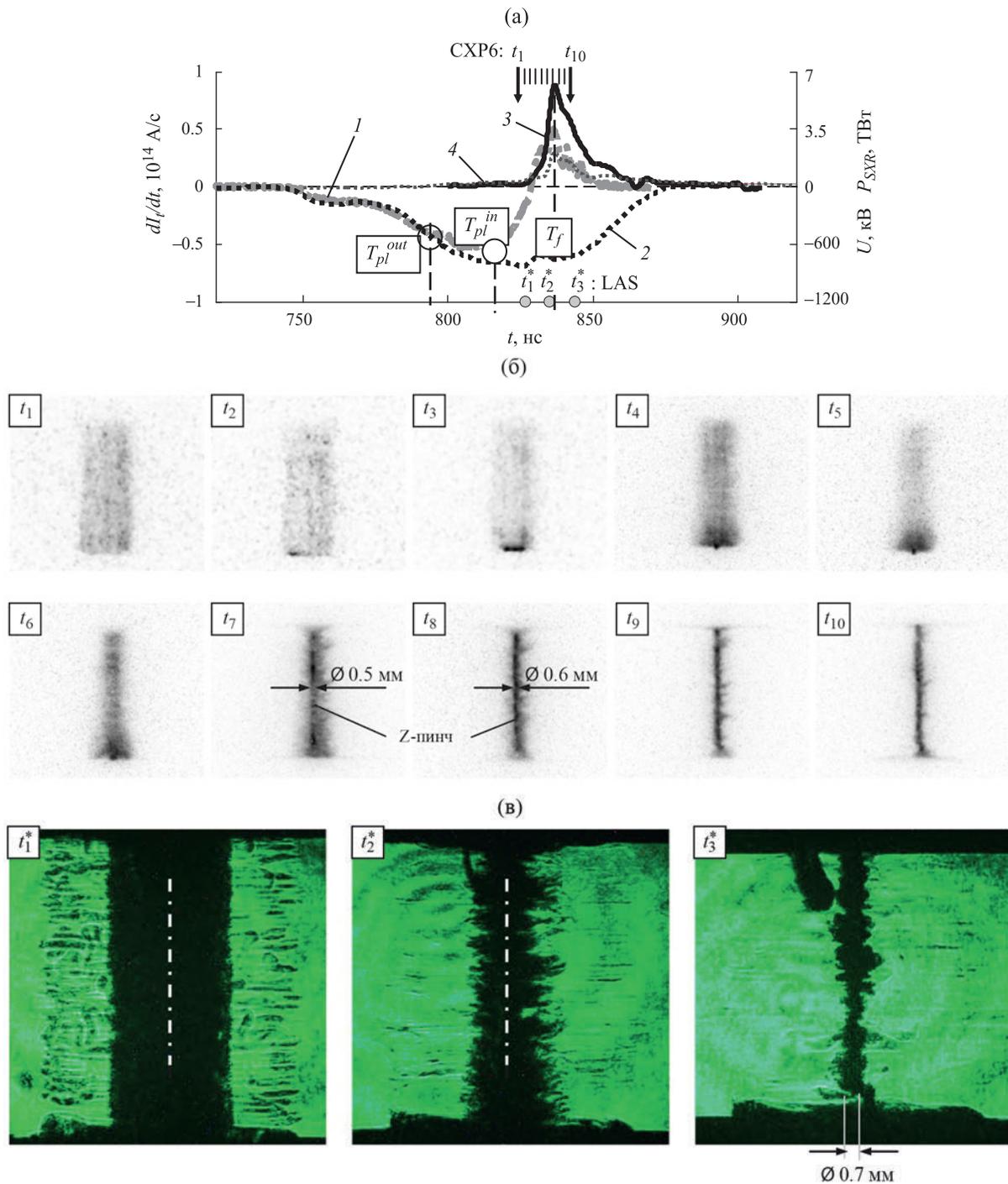


Рис. 2. Результаты эксперимента № 7098 с вложенными сборками: внешний каскад — сборка из 8 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы 3.2 мкг/см. Радиус сборки — 6 мм, высота — 16 мм; внутренний каскад — сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, погонной массы 220 мкг/см. Радиус сборки — 3 мм, высота — 16 мм: а) — временные зависимости: 1 — производной полного тока; 2 — напряжения; 3, 4 — импульса мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100$ эВ) в абс. ед. и ($h\nu > 20$ эВ) в отн. ед.; T_{pl}^{out} , T_{pl}^{in} — времена окончания плазмообразования на внешнем и внутреннем каскадах; T_f — время финального сжатия плазмы; б) — рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии вложенной сборки, синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми, где времена регистрации кадров t_1 – t_{10} указаны вертикальными стрелками (\downarrow СХР6). Анод — вверх, катод — внизу; в) — кадровые изображения (позитив) плазмы вложенныхборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров t_1^* – t_3^* указаны вертикальными стрелками (\bullet LAS) на рис. (а). Анод — вверх, катод — внизу.

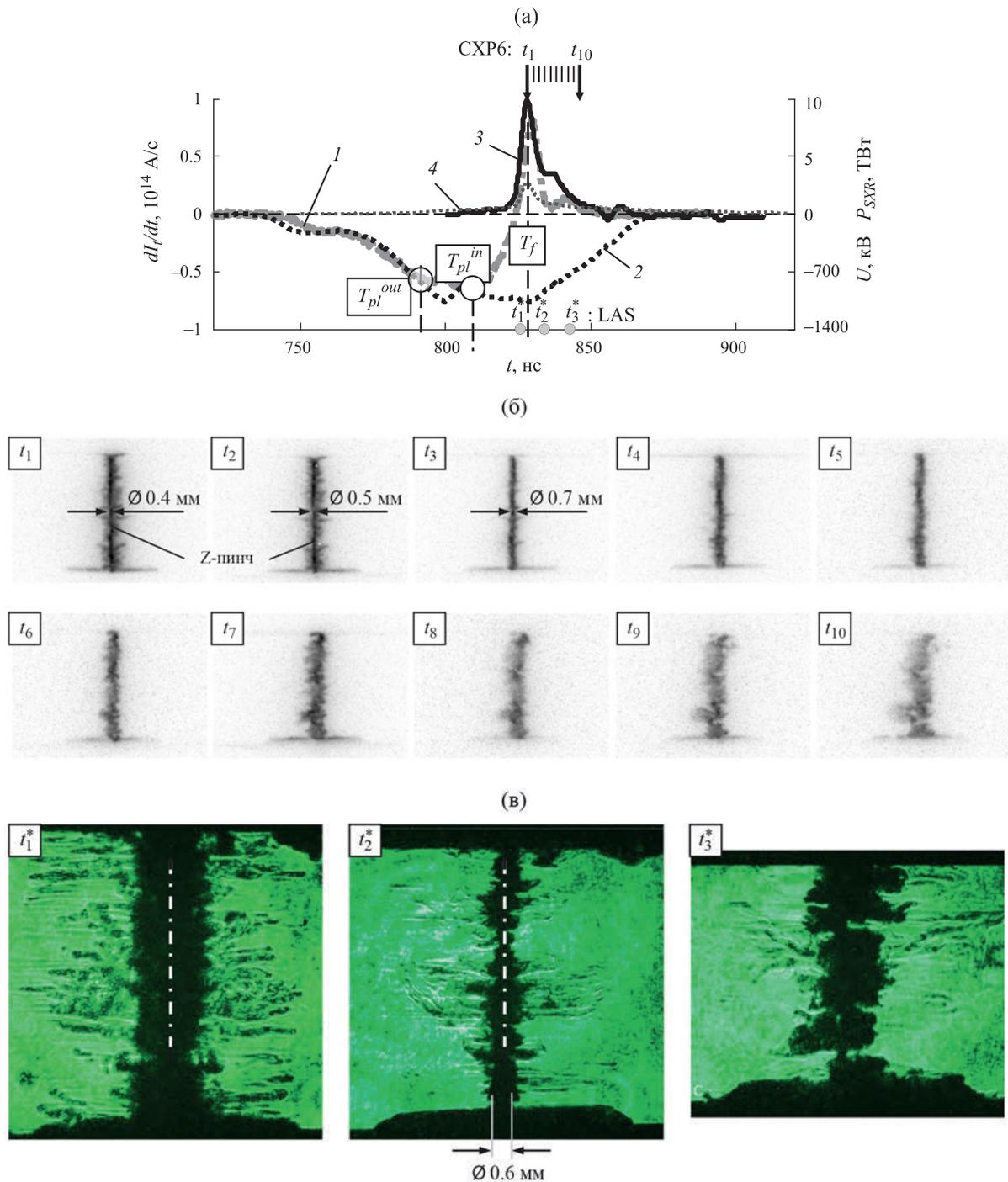


Рис. 3. Результаты эксперимента № 7090 с вложенными сборками: внешний каскад — сборка из 24 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы 9.8 мкг/см. Радиус сборки — 6 мм, высота — 16 мм; внутренний каскад — сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, погонной массы 220 мкг/см. Радиус сборки — 3 мм, высота — 16 мм: а) — временные зависимости: 1 — производной полного тока; 2 — напряжения; 3, 4 — импульса мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100 \text{ эВ}$) в абс. ед. и ($h\nu > 20 \text{ эВ}$) в отн. ед.; T_{pl}^{out} , T_{pl}^{in} — времена окончания плазмообразования на внешнем и внутреннем каскадах; T_f — время финального сжатия плазмы; б) — рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии вложенной сборки, синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми, где времена регистрации кадров t_1 – t_{10} указаны вертикальными стрелками (\downarrow СХР6). Анод — вверху, катод — внизу; в) — кадровые изображения (позитив) плазмы вложенныхборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров t_1^* – t_3^* указаны вертикальными стрелками (\bullet LAS) на рис. (а). Анод — вверху, катод — внизу.

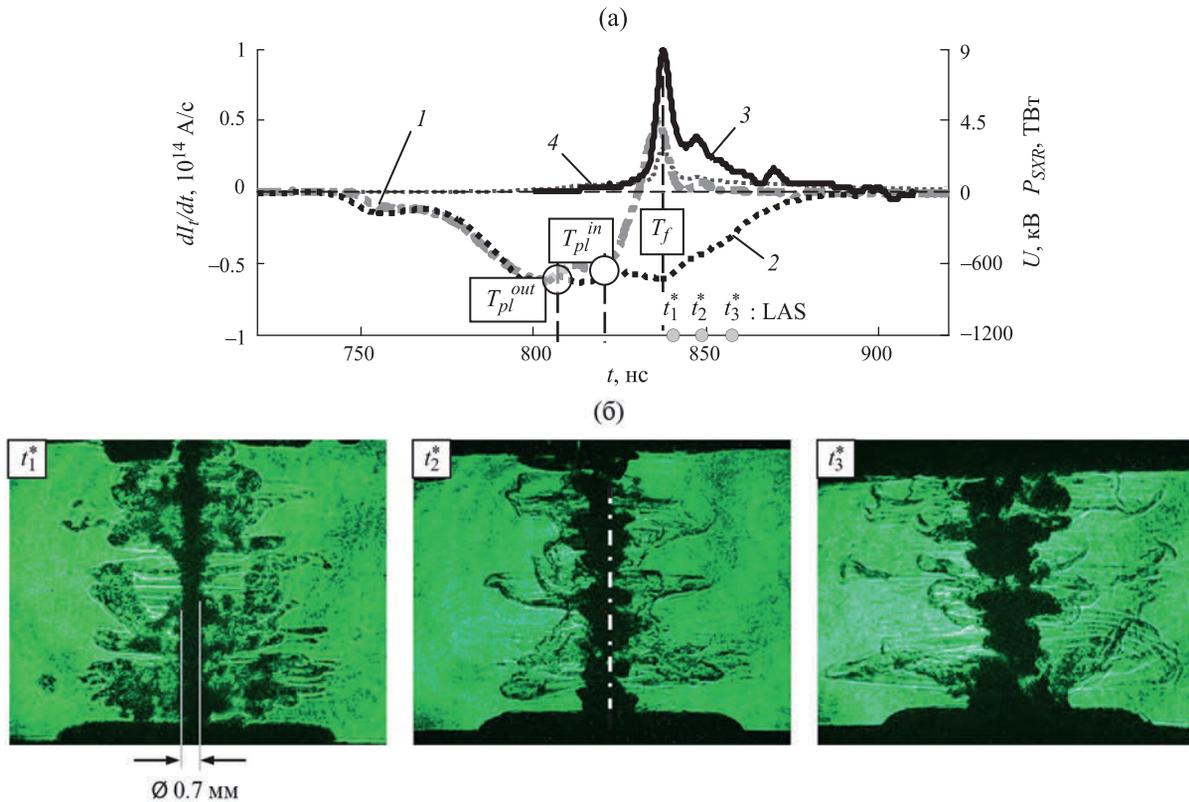


Рис. 4. Результаты эксперимента № 7101 с вложенными сборками: внешний каскад — сборка из 60 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы 24.6 мкг/см. Радиус сборки — 6 мм, высота — 16 мм; внутренний каскад — сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, погонной массы 220 мкг/см. Радиус сборки — 3 мм, высота — 16 мм: а) — временные зависимости: 1 — производной полного тока; 2 — напряжения; 3, 4 — импульса мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100$ эВ) в абс. ед. и ($h\nu > 20$ эВ) в отн. ед.; T_{pl}^{out} , T_{pl}^{in} — времена окончания плазмообразования на внешнем и внутреннем каскадах; T_f — время финального сжатия плазмы; б) — кадровые изображения (позитив) плазмы вложенныхборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров $t_1^* - t_3^*$ указаны вертикальными стрелками (●LAS) на рис. (а). Анод — вверх, катод — вниз.

тия одиночных W-борок. Воздействие плазменных потоков с волокон внешнего каскада приводит к уменьшению в несколько раз инкремента неустойчивости сжимающейся вольфрамовой плазмы внутреннего каскада (см. работу [30] и рис. 24 и 25 в работе [29]). В выстрелах с неоптимальной массой внешнего каскада (PP-W) вложенныхборок радиальный размер пинча был больше и составлял ~ 0.6 мм по рентгеновским изображениям (см. рис. 26) и ~ 0.7 мм по лазерным теневым изображениям (см. рис. 2в и 4в). В случае с увеличенной массой W-борки во внутреннем каскаде, радиальный размер пинча был еще больше $\sim 0.6-0.7$ мм и ~ 0.8 мм (см. рис. 5б, в, соответственно). В целом, подобная тенденция наблюдалась в наших прошлых экспериментах [15] с вложенными сборками смешанного состава с тем же отношением радиусов $r_{in}/r_{out} = 0.5$ (10 мм/20 мм), но с большим радиусом внешнего каскада — $r_{out} = 10$ мм.

Вложенные сборки с отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.67$ ($\varnothing_{in}/\varnothing_{out} = 8$ мм/12 мм). В данном разделе на рис. 6–9 представлены результаты экспериментов с вложенными сборками с увеличенным ра-

диусом внутреннего каскада (W-борки) $r_{in} = 4$ мм. Отношение радиусов каскадов в этом случае было ~ 0.67 . Данная серия экспериментов была сделана для сравнения с имплозией обычных одиночных вольфрамовыхборок, стандартно применяемых на установке Ангара-5-1. В целом, наблюдается та же тенденция роста пиковой мощности МРИ при изменении линейной массы PP-борки во внешнем каскаде, компактность сжатия пинча и устойчивость сжатия плазмы внутреннего каскада. При этом в случае увеличения в 2 раза массы W-проволок во внутреннем каскаде с 220 мкг/см до 440 мкг/см практически не приводит к повышению пиковой мощности МРИ (см. рис. 9а). Максимальный уровень пиковой мощности МРИ, достигнутый в этой серии выстрелов, составил около 10.4 ТВт.

Более подробно зависимости параметров импульса МРИ от параметров внешней сборки (m_{in} , r_{in}/r_{out}) обсуждаются ниже, в разделе «Зависимости параметров импульса МРИ от массы внешнего каскада».

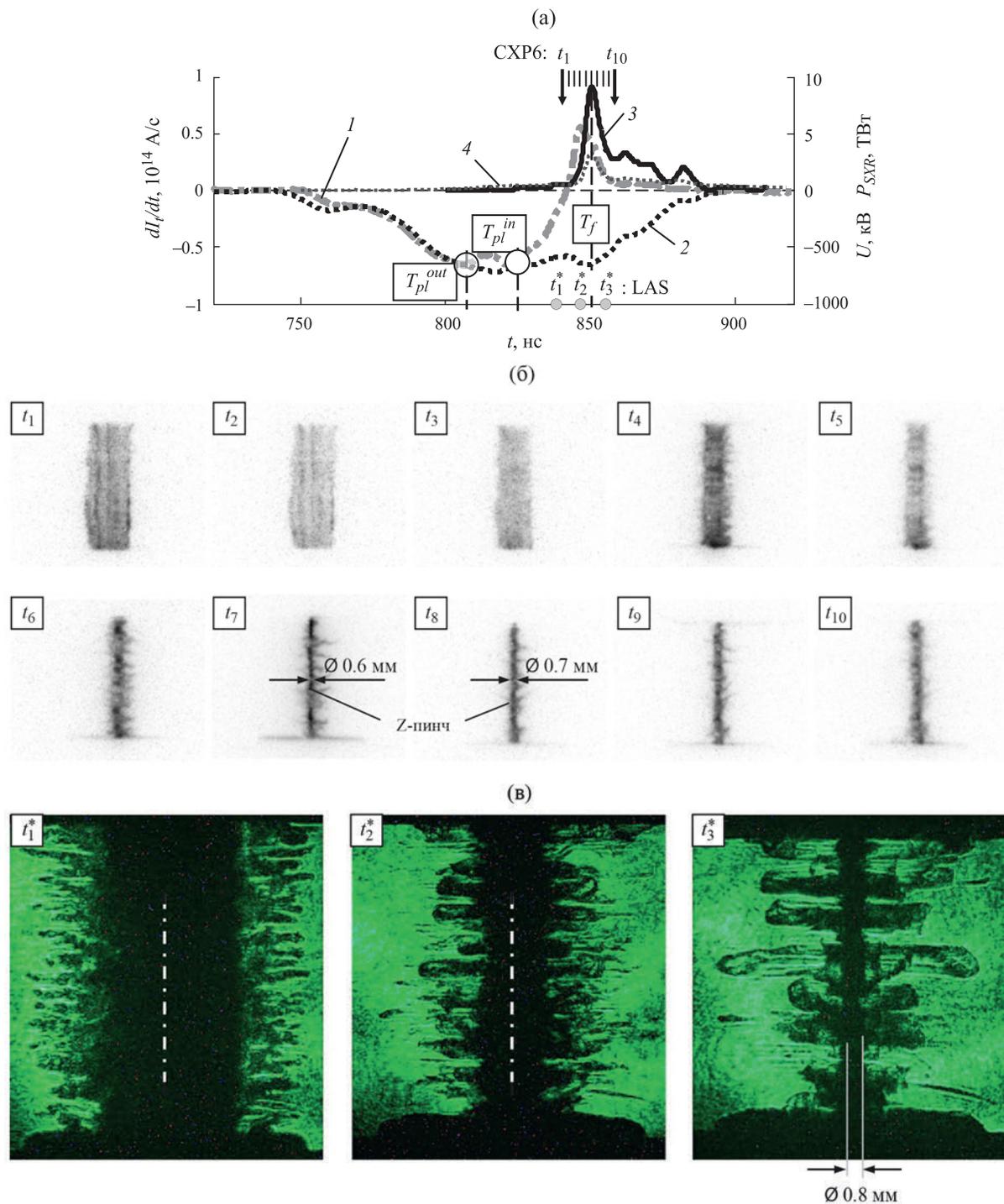


Рис. 5. Результаты эксперимента № 7137 с вложенными сборками: внешний каскад — сборка из 60 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы 24.6 мкг/см. Радиус сборки — 6 мм, высота — 16 мм; внутренний каскад — сборка из 80 вольфрамовых 6 мкм проволоки, погонной массы 440 мкг/см. Радиус сборки — 3 мм, высота — 16 мм: а) — временные зависимости: 1 — производной полного тока; 2 — напряжения; 3, 4 — импульсы мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100$ эВ) в абс. ед. и ($h\nu > 20$ эВ) в отн. ед.; T_{pl}^{out} , T_{pl}^{in} — времена окончания плазмообразования на внешнем и внутреннем каскадах; T_f — время финального сжатия плазмы; б) — рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии вложенной сборки, синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми, где времена регистрации кадров t_1 – t_{10} указаны вертикальными стрелками (\downarrow CXP6). Анод — вверху, катод — внизу; в) - кадровые изображения (позитив) плазмы вложенныхборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров t_1^* – t_3^* указаны вертикальными стрелками (\bullet LAS) на рис. (а). Анод — вверху, катод — внизу.

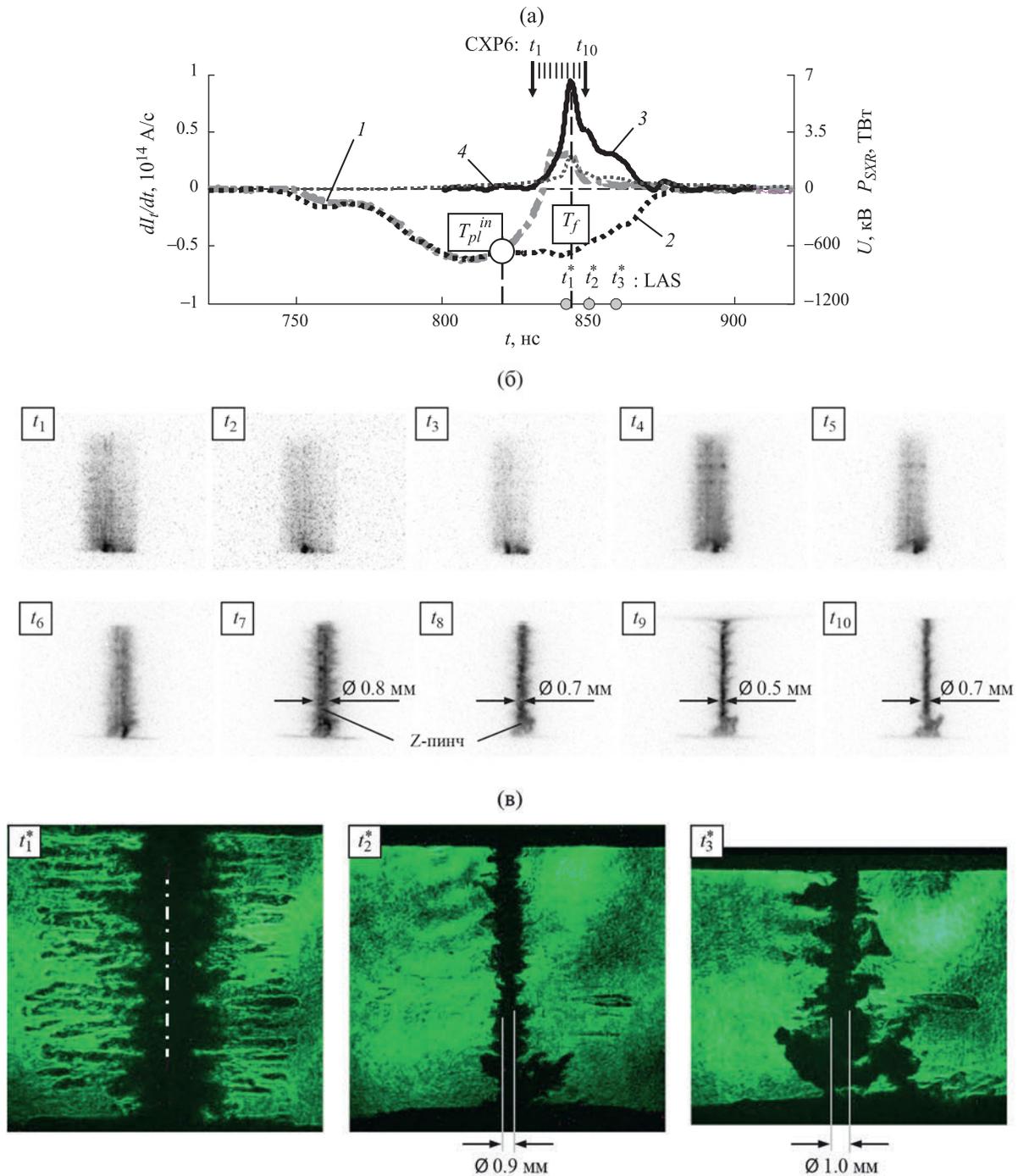


Рис. 6. Результаты эксперимента № 7162 с вложенными сборками: внешний каскад — сборка из 8 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы 3.2 мкг/см. Радиус сборки — 6 мм, высота — 16 мм; внутренний каскад — сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, погонной массы 220 мкг/см. Радиус сборки — 4 мм, высота — 16 мм: а) — временные зависимости: 1 — производной полного тока; 2 — напряжения; 3, 4 — импульса мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100 \text{ эВ}$) в абс. ед. и ($h\nu > 20 \text{ эВ}$) в отн. ед.; T_{pl}^{out} , T_{pl}^{in} — времена окончания плазмообразования на внешнем и внутреннем каскадах; T_f — время финального сжатия плазмы; б) — рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии вложенной сборки, синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми, где времена регистрации кадров t_1 – t_{10} указаны вертикальными стрелками (\downarrow СХР6). Анод — вверху, катод — внизу; в) — кадровые изображения (позитив) плазмы вложенных сборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров t_1^* – t_3^* указаны вертикальными стрелками (\bullet LAS) на рис. (а). Анод — вверху, катод — внизу.

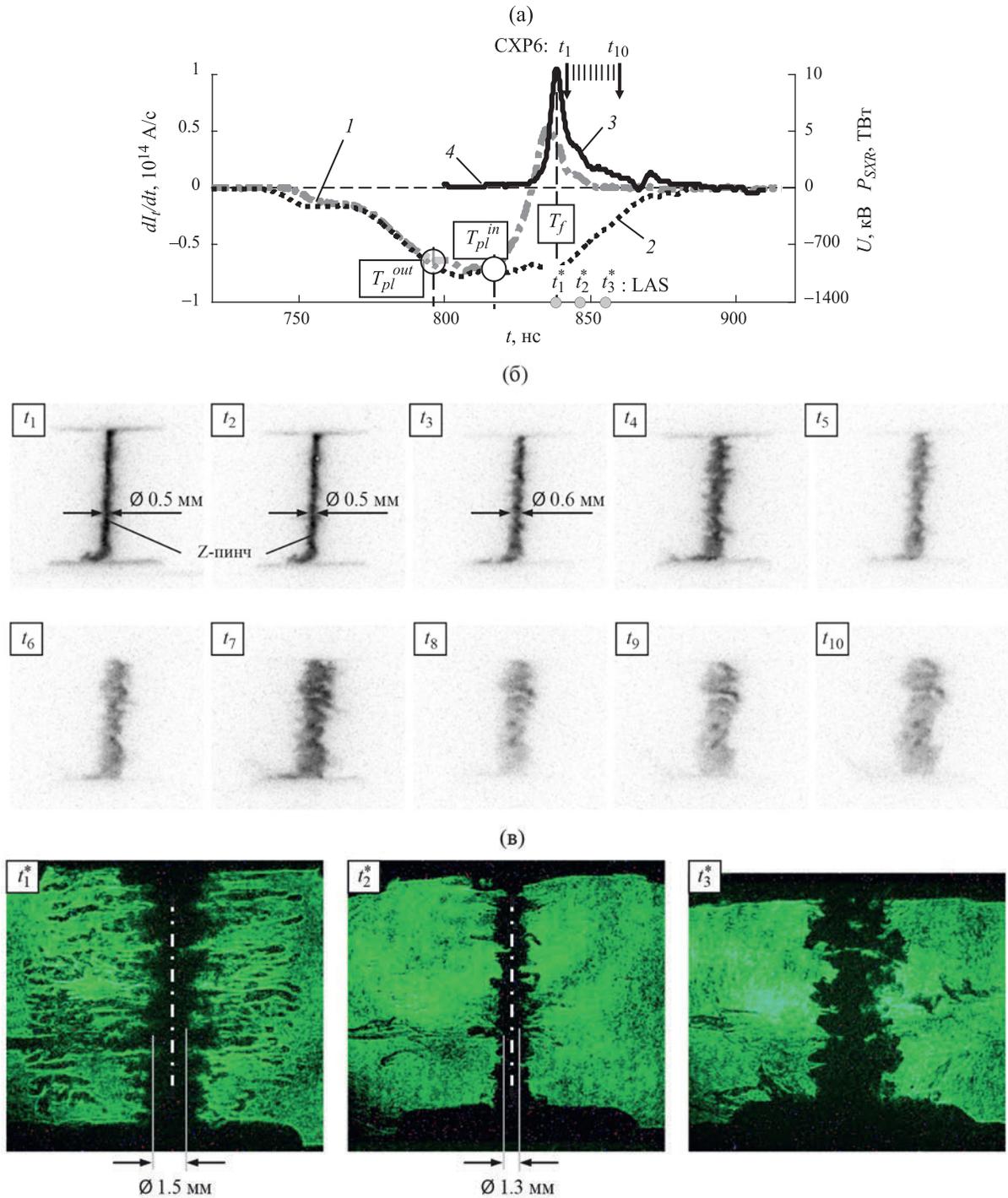


Рис. 7. Результаты эксперимента № 7143 с вложенными сборками: внешний каскад — сборка из 24 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы 9.8 мкг/см. Радиус сборки — 6 мм, высота — 16 мм; внутренний каскад — сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, погонной массы 220 мкг/см. Радиус сборки — 4 мм, высота — 16 мм: а) — временные зависимости: 1 — производной полного тока; 2 — напряжения; 3, 4 — импульса мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100$ эВ) в абс. ед. и ($h\nu > 20$ эВ) в отн. ед.; T_{pl}^{out} , T_{pl}^{in} — времена окончания плазмообразования на внешнем и внутреннем каскадах; T_f — время финального сжатия плазмы; б) — рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии вложенной сборки, синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми, где времена регистрации кадров t_1 – t_{10} указаны вертикальными стрелками (\downarrow СХР6). Анод — сверху, катод — внизу; в) — кадровые изображения (позитив) плазмы вложенныхборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров t_1^* – t_3^* указаны вертикальными стрелками (\bullet LAS) на рис. (а). Анод — сверху, катод — внизу.

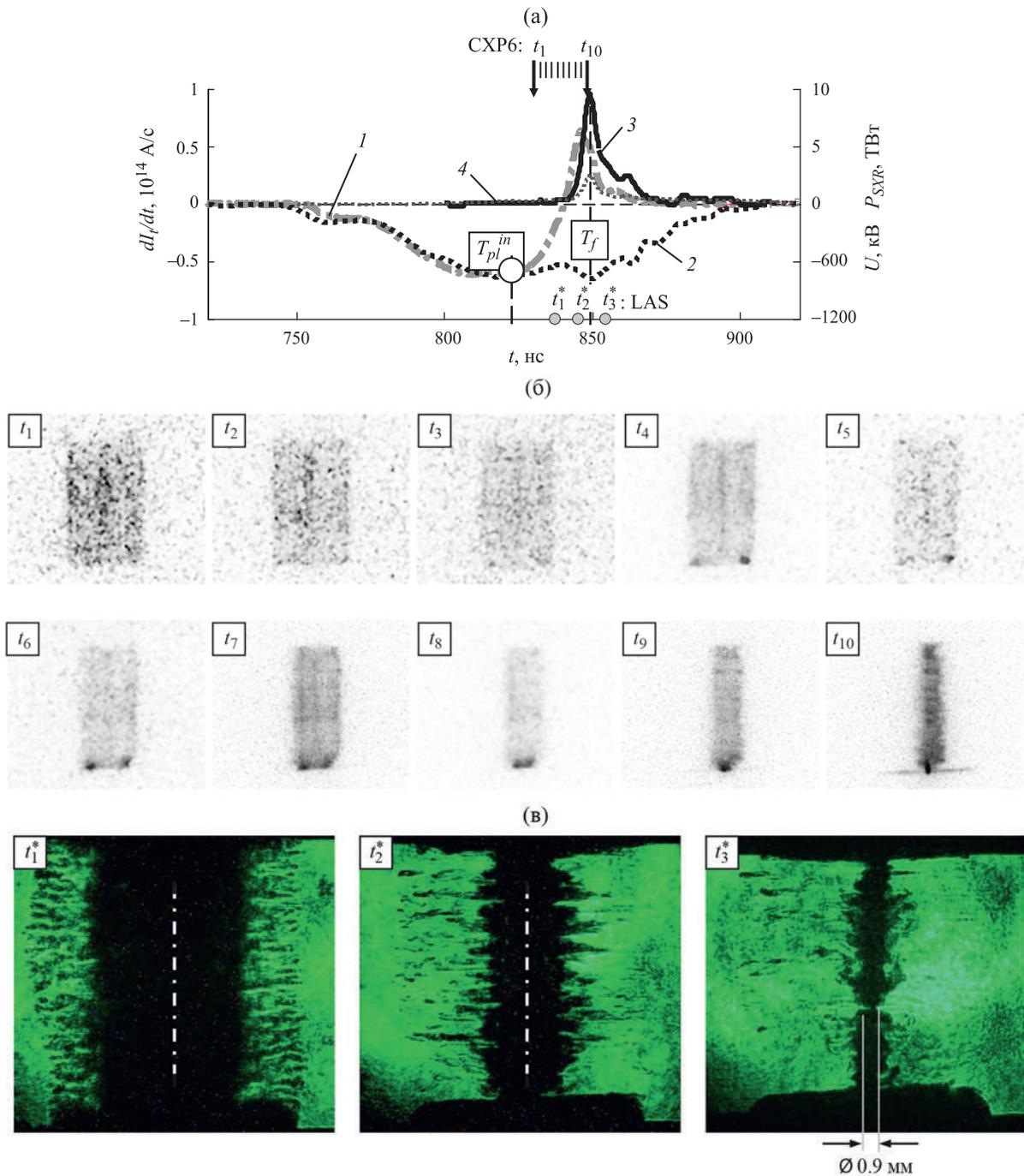


Рис. 8. Результаты эксперимента № 7139 с вложенными сборками: внешний каскад — сборка из 60 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы 24.6 мкг/см. Радиус сборки — 6 мм, высота — 16 мм; внутренний каскад — сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволоки, погонной массы 220 мкг/см. Радиус сборки — 4 мм, высота — 16 мм: а) — временные зависимости: 1 — производной полного тока; 2 — напряжения; 3, 4 — импульса мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100 \text{ эВ}$) в абс. ед. и ($h\nu > 20 \text{ эВ}$) в отн. ед.; T_{pl}^{out} , T_{pl}^{in} — времена окончания плазмообразования на внешнем и внутреннем каскадах; T_f — время финального сжатия плазмы; б) — рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии вложенной сборки, синхронизированные с представленными на рис. (а) кривыми, где времена регистрации кадров t_1 – t_{10} указаны вертикальными стрелками (\downarrow CXP6). Анод — сверху, катод — внизу; в) — кадровые изображения (позитив) плазмы вложенныхборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров t_1^* – t_3^* указаны вертикальными стрелками (\bullet LAS) на рис. (а). Анод — сверху, катод — внизу.

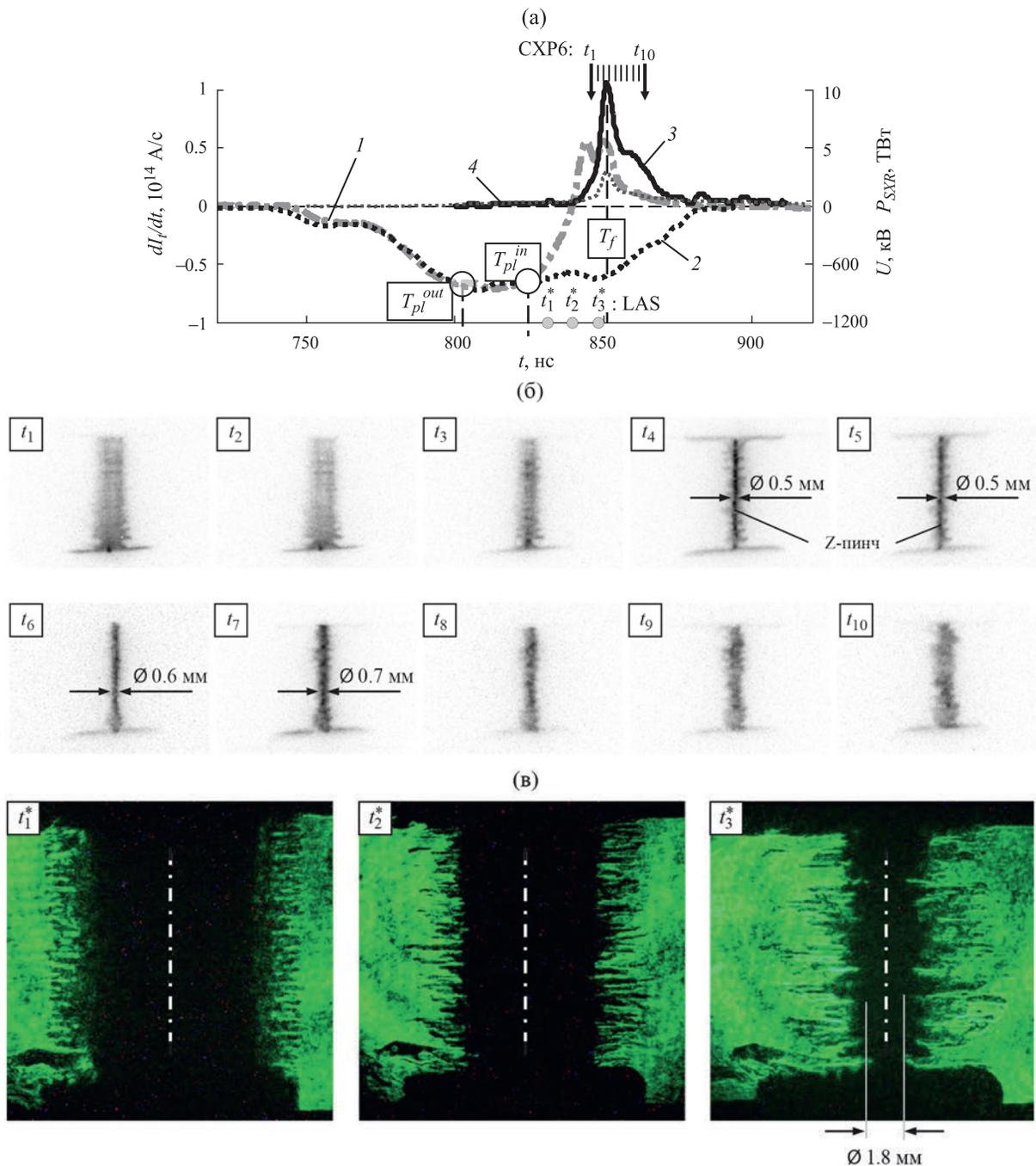


Рис. 9. Результаты эксперимента № 7142 с вложенными сборками: внешний каскад - сборка из 60 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы 24.6 мкг/см. Радиус сборки — 6 мм, высота — 16 мм; внутренний каскад — сборка из 80 вольфрамовых 6 мкм проволок, погонной массы 440 мкг/см. Радиус сборки — 4 мм, высота — 16 мм: а) — временные зависимости: 1 — производной полного тока; 2 — напряжения; 3, 4 — импульса мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100$ эВ) в абс. ед. и ($h\nu > 20$ эВ) в отн. ед.; T_{pl}^{out} , T_{pl}^{in} — времена окончания плазмообразования на внешнем и внутреннем каскадах; T_f — время финального сжатия плазмы; б) — рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии вложенной сборки, синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми, где времена регистрации кадров t_1-t_{10} указаны вертикальными стрелками (\downarrow CXP6). Анод — вверх, катод — внизу; в) — кадровые изображения (позитив) плазмы вложенных сборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров $t_1^*-t_3^*$ указаны вертикальными стрелками (\bullet LAS) на рис. (а). Анод — вверх, катод — внизу.

Одиночные вольфрамовые сборки радиусами 3 мм и 4 мм. Далее, рассмотрим результаты сравнительных экспериментов (см. рис. 10 и 11) с одиночными W-сборками с параметрами, идентичными параметрам внутреннего каскада в (PP-W) вложенных сборках.

По кадровым изображениям сжатия плазмы W-сборок определен радиальный размер пинча в момент пиковой мощности МРИ. Диаметр пинча составил 0.6–0.8 мм по рентгеновским изображениям (см. рис. 10б и 11б) и ~1.2 мм по лазерным теневым изображениям (см. 11в). При этом, что на лазерных, что на рентгеновских изображениях хорошо видно развитие магнитной Релей-Тейлоровской неустой-

чивости сжимающейся вольфрамовой плазмы и, как следствие этого, наличие отставшей и излучающей плазмы вокруг пинча. В приведенных на рис. 10а и 11а выстрелах пиковая мощность рентгеновского излучения составила меньшую величину 5.3 ТВт и 6.6 ТВт, соответственно, по сравнению с выстрелами с вложенными сборками.

Сравнение спектральных данных излучения Z-пинча вложенных и одиночныхборок. Спектральные измерения показали, что в оптимальных режимах сжатия плазмы вложенных проволочно-волоконныхборок (PP-W) наблюдается увеличение вклада энергии рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $\lambda \in (30, 40) \text{ \AA}$ в излучение пинча по сравнению

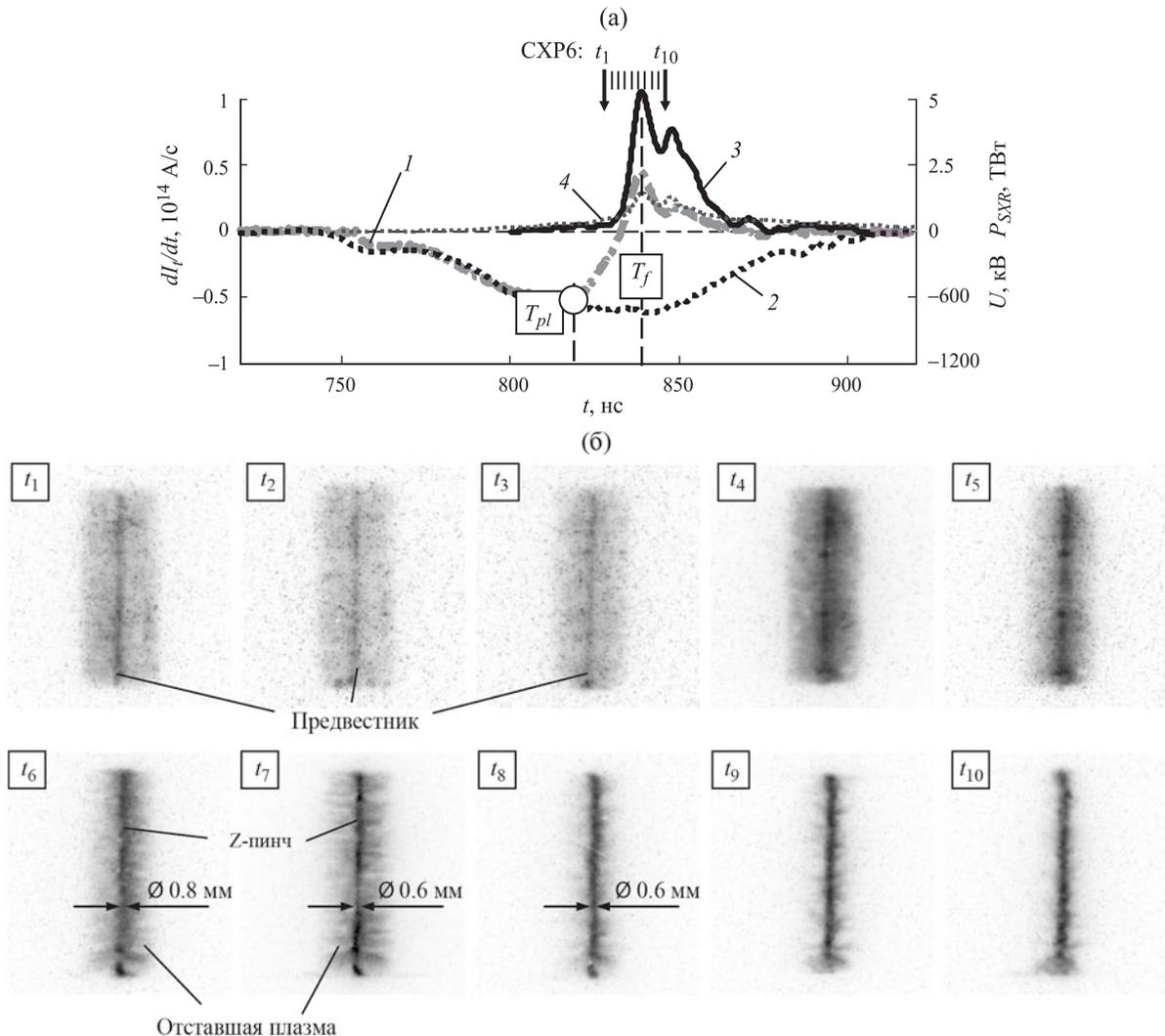


Рис. 10. Результаты эксперимента № 7097 с одиночной сборкой из 40 W 6 мкм проволоки, линейной массы 220 мкг/см. Радиус сборки — 3 мм, высота — 16 мм: а) — временные зависимости: 1 — производной полного тока; 2 — напряжения; 3, 4 — импульса мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100 \text{ эВ}$) в абс. ед. и ($h\nu > 20 \text{ эВ}$) в отн. ед.; T_{pl} — время окончания плазмообразования; T_f — время финального сжатия плазмы; б) — рентгеновские кадровые изображения (негатив) импlosionи вложенной сборки, синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми, где времена регистрации кадров t_1 – t_{10} указаны вертикальными стрелками (\downarrow CXRP6). Анод — сверху, катод — внизу. Анод — сверху, катод — внизу.

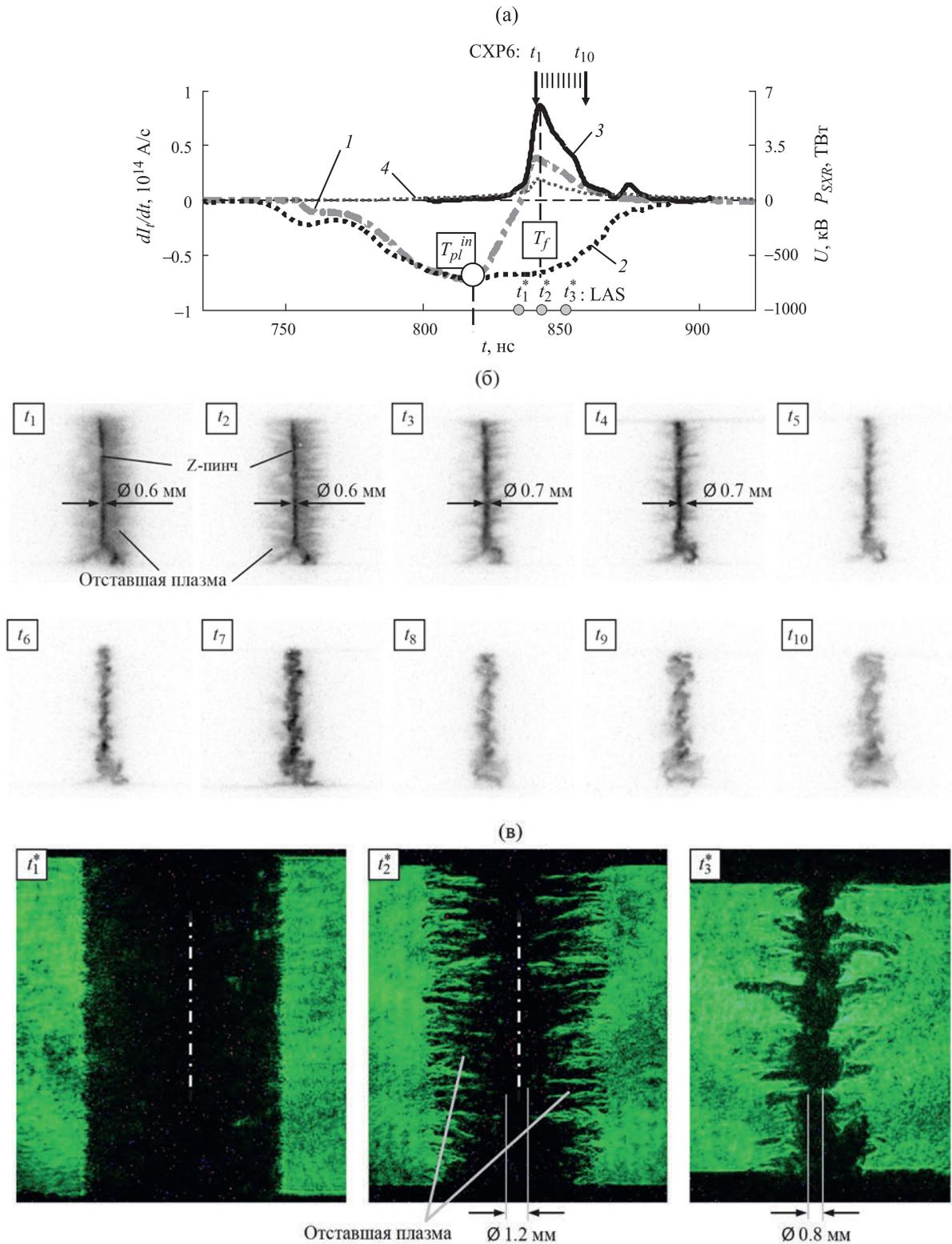


Рис. 11. Результаты эксперимента № 7138 с одиночной сборкой из 40 W 6 мкм проволоки, линейной массы 220 мкг/см. Радиус сборки — 4 мм, высота — 16 мм: а) — временные зависимости: 1 — производной полного тока; 2 — напряжения; 3, 4 — импульсы мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100$ эВ) в абс. ед. и ($h\nu > 20$ эВ) в отн. ед.; T_{pl} — время окончания плазмообразования; T_f — время финального сжатия плазмы; б) — рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии вложенной сборки, синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми, где времена регистрации кадров t_1-t_{10} указаны вертикальными стрелками (\downarrow СХР6). Анод — вверх, катод — внизу; в) — кадровые изображения (позитив) плазмы сборки, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров $t_1^*-t_3^*$ указаны вертикальными стрелками (\bullet LAS) на рис. (а). Анод — вверх, катод — внизу.

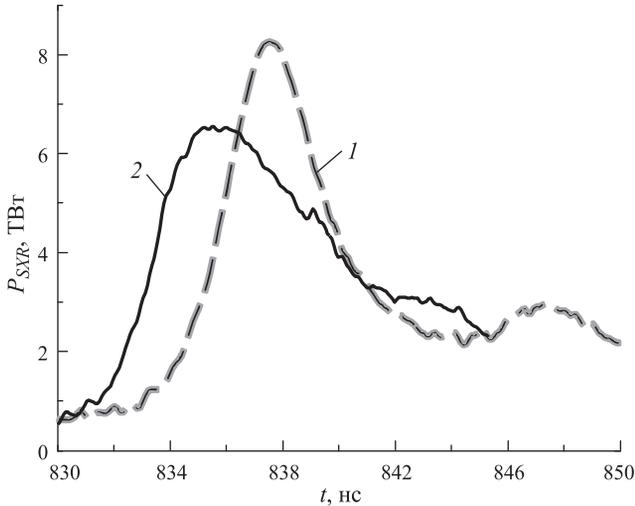


Рис. 12. Временные профили мощности излучения в выстрелах с вложенной волоконно-проволочной сборкой (выстрел № 7101, кривая 1) и одиночной сборкой (выстрел № 7104, кривая 2).

с одиночными W-сборками со схожими параметрами [15–17]. При этом отставшая плазма волоконной сборки внешнего каскада успевает сжаться в приосевую область до начала импульса МРИ, что скорее всего, свидетельствует об уменьшении влияния отставшей плазмы на эффективность транспортировки разрядного тока в приосевую область вложенныхборок. Для сопоставления спектральных данных излучения Z-пинчей одиночных и вложенных проволочно-волоконныхборок, и влияния отставшей массы плазмы пинча проведено сравнение спектров МРИ Z-пинча с радиальным пространственным и временным разрешением в выстрелах № 7101 и № 7104 (см. табл. 1).

В случае вложенной проволочно-волоконной сборки импульс мощности МРИ имеет меньшую полуширину на полувысоте и большую амплитуду (см. рис. 12). Эксперименты показывают [31], что спектр излучения многопроволочной вольфрамовой сборки является суперпозицией двух источников: компактного высокотемпературного пинча и т.н. «гало», отставшей плазмы, существенно большего поперечного размера, спектр излучения которого существенно мягче. Большой эффективный размер излучателя можно объяснить тем, что излучение сжатого компактного пинча переизлучается на отставшей плазме вольфрама, расположенной вне центральной части пинча [32]. На рис. 13 представлены спектры излучения Z-пинча в выстреле № 7101 на разных расстояниях от оси сборки, зарегистрированные в момент максимума излучения ($t_p - t_{\max} = 0$).

На рис. 14 представлены спектры излучения Z-пинча одиночной W-сборки в выстреле № 7104 на разных расстояниях от оси, также полученные в момент максимума излучения.

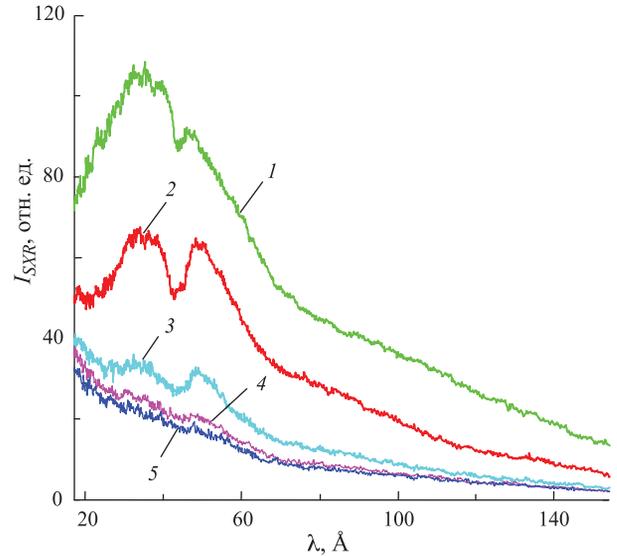


Рис. 13. Спектры излучения, полученные в выстреле № 7101 на различных радиусах r от оси пинча, время регистрации спектра $t_p - t_{\max} = 0$ нс: кривые 1 – на $r = 0.00 \pm 0.45$ мм, 2 – на $r = 0.9 \pm 0.25$ мм, 3 – на $r = 1.6 \pm 0.25$ мм, 4 – на $r = 2.29 \pm 0.25$ мм, 5 – на $r = 2.78 \pm 0.25$ мм.

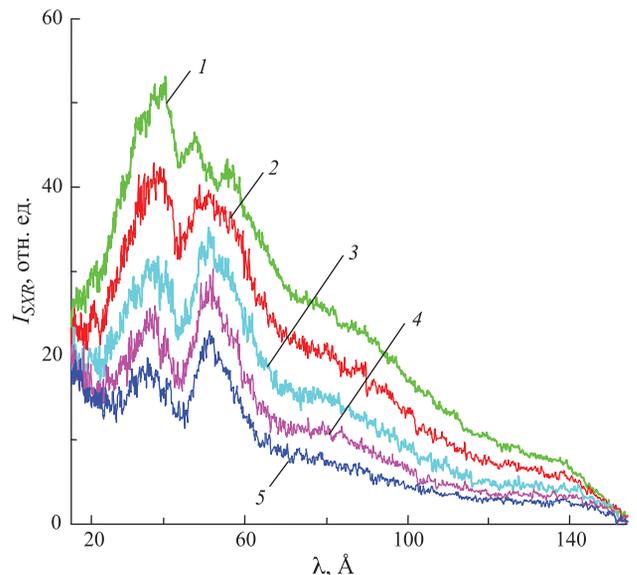


Рис. 14. Спектры излучения, полученные в выстреле № 7104 на различных радиусах r от оси пинча, время регистрации спектра $t_p - t_{\max} = 0$ нс: кривые 1 – на $r = 0.01 \pm 0.45$ мм, 2 – на $r = 0.95 \pm 0.25$ мм, 3 – на $r = 1.53 \pm 0.25$ мм, 4 – на $r = 2.05 \pm 0.25$ мм, 5 – на $r = 2.59 \pm 0.25$ мм.

Из рис. 13 и 14 видно, что спектральная плотность мощности (I_{SXR}) падает по мере увеличения расстояния от оси пинча, а основной источник излучения – центральная приосевая часть пинча диаметром ~ 1 мм, причем спектральная плотность мощности излучения пинча одиночной сборки меньше, чем в случае (PP-W) вложенныхборок, спектр которых смещен в более коротковолновый диапазон. На спек-

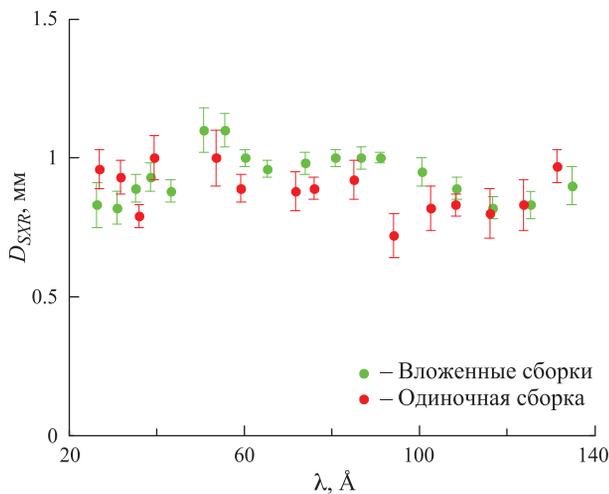


Рис. 15. Зависимость диаметра излучающей области пинча (D_{SXR}) от длины волны λ для одиночной и вложенныхборок (выстрелы № 7101 и № 7104), время регистрации спектра $t_p - t_{max} = 0$ нс (относительно пика МРИ).

трах излучения пинчей одиночных и вложенныхборок (см. рис. 13 и 14), выделяются полосы излучения ионов вольфрама в районе 38 \AA и 52 \AA , которые определяются массивами неразрешаемых переходов (УТА) в ионах с открытыми $4f$ - и $4d$ - подоболочками [33, 34], которые становятся особенно заметны в спектрах излучения отставшей массы на расстоянии $1\text{--}3$ мм от оси пинча (см. кривые 2–5 на рис. 13 и 14).

На рис. 15 показана зависимость диаметра излучающей области пинча D_{SXR} от длины волны λ для вложенной и одиночнойборок, полученная при оцифровке изображения спектра перпендикулярно линии дисперсии при различных длинах волн [32]. Диаметр излучаемой области на выбранной длине волны определяется как ширина пика на полувысоте интенсивности спектра.

Диаметр излучающей области составляет примерно одинаковую величину $0.7\text{--}1.1$ мм для обоих типовборок, а измеренная величина излучающей области согласуется с данными кадрового рентгеновского регистратора СХР6. На рис. 16 представлены спектры излучения отставшей плазмы одиночных и вложенных (PP-W)борок на расстоянии $r = 1.9$ мм от оси

пинча в разные моменты времени относительно пика импульса мощности МРИ. При сравнении спектров излучения отставшей плазмы пинчей одиночных и вложенных (PP-W)борок (см. рис. 16), можно заметить, что в обоих случаях полосы излучения ионов вольфрама в районе 38 \AA и 52 \AA [33, 34] становятся особенно заметны в момент пика импульса МРИ (см. кривые 4 и 5 на рис. 16а и кривые 3 и 4 на рис. 16б). Излучение центральной части вольфрамовой плазмы пинча переизлучается на отставшей плазме вольфрама [32], что регистрируется спектрографом с радиальным разрешением. На спектрах излучения отставшей массы одиночныхборок полосы излучения ионов вольфрама в области 38 \AA и 52 \AA более выражены по сравнению со спектрами для вложенных (PP-W)борок. Это связано с тем, что при имплозии вложенныхборок на этом расстоянии от оси ($r \sim 1.9$ мм) в отставшей плазме меньше ионов вольфрама за счет устойчивого сжатия W-борок внутреннего каскада вложенныхборок (см. напр. работы [29, 30]).

Зависимости параметров импульса МРИ от массы внешнего каскада. По совокупности проведенных экспериментов по сжатию вложенныхборок смешанного состава и одиночныхборок проанализированы зависимости основных параметров импульса МРИ (пиковой мощности P_{SXR} , энергии E_{SXR} и длительности на полувысоте импульса $FWHM$) от линейной массы m_{out} PP-волокон внешнего каскада. На рис. 17 слева представлены зависимости $P_{SXR}(m_{out})$, $E_{SXR}(m_{out})$ и $FWHM(m_{out})$ для вложенныхборок с отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5$ и отношением $r_{in}/r_{out} = 0.67$ — справа. Там же для сравнения кружками (o) представлены данные для одиночных 40W-борок, у которых параметры были идентичны параметрам W-борок во внутреннем каскаде (PP-W) вложенныхборок. Как следует из приведенных зависимостей, оптимальным диапазоном линейной массы волоконной сборки во внешнем каскаде является следующий — $\sim(10\text{--}25)$ мкг/см. Оптимальные параметры импульса МРИ, полученные в этой серии экспериментов, представлены в табл. 2. Из табличных данных видно, что в случае вложенныхборок достигается примерно в 1.4 бóльшая пиковая мощность по

Таблица 2. Параметры импульса МРИ

Отношения радиусов (диаметров) каскадов r_{in}/r_{out} ($\varnothing_{in}/\varnothing_{out}$)	Оптимальные значения параметров импульса МРИ			Примечания
	P_{SXR} , ТВт	E_{SXR} , кДж	$FWHM$, нс	
0.5 (6 мм/12 мм)	9.2 ± 0.3 (9.2*)	104.6 ± 9.9 (133.9*)	4.4 ± 0.1 (5.5*)	$N_{out} = 40, 80$
0.67 (8 мм/12 мм)	9.5 ± 1.3 (10.6*)	108.5 ± 4.9 (130.6*)	6.1 ± 2.3 (5.2*)	$N_{out} = 40, 80$
--- (6 мм/---)	6.5 ± 1.2	93.4 ± 9.5	12.1 ± 4.5	одиночные
--- (8 мм/---)	6.8 ± 0.3	99.0 ± 1.0	13.9 ± 1.7	W-борок

Примечание. Значения параметров со знаком (*) указаны для вложенныхборок, у которых во внутреннем каскаде использовалась W-сборка с увеличенным числом 6 мкм проволок $N_{out} = 80$.

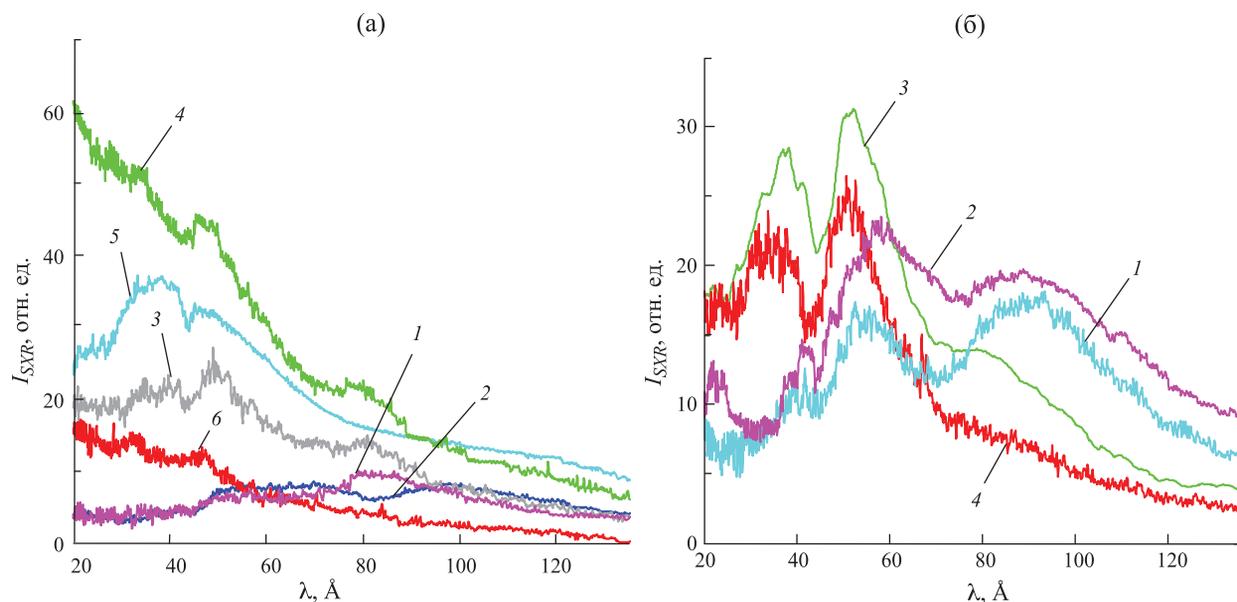


Рис. 16. Спектры излучения пинча вложенных (а) и одиночных (б) сборок на некоторых расстояниях r от оси пинча при различных временах регистрации $t_p - t_{\max}$ относительно пика МРИ: а) — на $r = 1.9 \pm 0.1$ мм, кривые 1 — 13 нс, 2 — 8 нс, 3 — 5 нс, 4 — 0 нс, 5 — +5 нс, 6 — +11 нс; б) — на $r = 1.9 \pm 0.1$ мм, кривые 1 — -12 нс, 2 — -5 нс, 3 — 0 нс, 4 — +2 нс.

сравнению с одиночными W-сборками с теми же параметрами (40W 6 мкм проволока, 220 мкг/см), что и W-сборка во внутреннем каскаде вложенных сборок. При этом энергия рентгеновского излучения увеличивается незначительно, не более чем на 10%. Следует заметить, что увеличение количества проволок во внутреннем каскаде в 2 раза — до $N_{out} = 80$ (440 мкг/см) практически не приводит к повышению пиковой мощности, однако, происходит увеличение энергии излучения на 20–30%.

Эксперименты на установке Ангара-5-1 по исследованию ЭСВ проводятся с проволочными нагрузками диаметром 10 мм из 60 W проволок $\varnothing 6$ мкм, при этом облучаемая мишень устанавливается в 11 мм от пинча [12–14]. Средняя пиковая мощность импульса излучения и стандартное отклонение для такой нагрузки (по последним 40 экспериментам) составляет 7.5 ± 0.9 ТВт, что соответствует плотности мощности на нагрузке 0.49 ТВт/см². Исследуемые в данной работе компактные нагрузки позволяют поместить мишень ближе к оси, в ≈ 7 мм, что с учетом более высокой пиковой мощности 9.5 ТВт дает втрое большую плотность мощности на нагрузке 1.55 ТВт/см². Наши расчеты [13] показывают, что спектральные характеристики плазмы заметно меняются при таком увеличении энергетического вклада в мишень.

ВЫВОДЫ

Выполнено сравнительное исследование токовой имплозии 2-х каскадных вложенных сборок смешанного состава (PP-W) и одиночной цилиндрической многопроволочной W-сборки, в которых

параметры внутреннего каскада вложенных сборок из W-проволок идентичны параметрам одиночной W-сборки. Исходя из сопоставления экспериментальных данных по токовому сжатию таких типов сборок (с малым радиальным размером ~ 3 мм и 4 мм), можно сделать следующие выводы:

1. Создан мощный источник мягкого рентгеновского излучения ~ 10 ТВт, энергией ~ 100 кДж на основе Z-пинча вложенных сборок короткой длительности ~ 5 нс для радиационной абляции мишеней различных веществ. Это позволяет увеличить падающую плотность мощности и флюенс на мишень вплоть до 1.55 ТВт/см² и 17 кДж/см², соответственно, путем уменьшения радиуса расположения мишени около источника излучения с 11 мм до 7 мм;

2. В случае вложенных сборок достигается примерно в 1.4 бóльшая пиковая мощность по сравнению с одиночными W-сборками с теми же параметрами. При этом энергия рентгеновского излучения увеличивается незначительно, не более чем на 10%;

3. Следует заметить, что увеличение количества проволок во внутреннем каскаде в 2 раза — до $N_{out} = 80$ (440 мкг/см) практически не приводит к повышению пиковой мощности, однако, происходит увеличение энергии излучения на 20–30% вплоть до ~ 130 кДж;

4. На спектрах излучения отставшей массы одиночных сборок полосы излучения ионов вольфрама в области 38 \AA и 52 \AA более выражены по сравнению со спектрами для вложенных (PP-W) сборок. Это связано с существенным уменьшением доли ионов вольфрама в отставшей плазме вокруг пинча вложенных

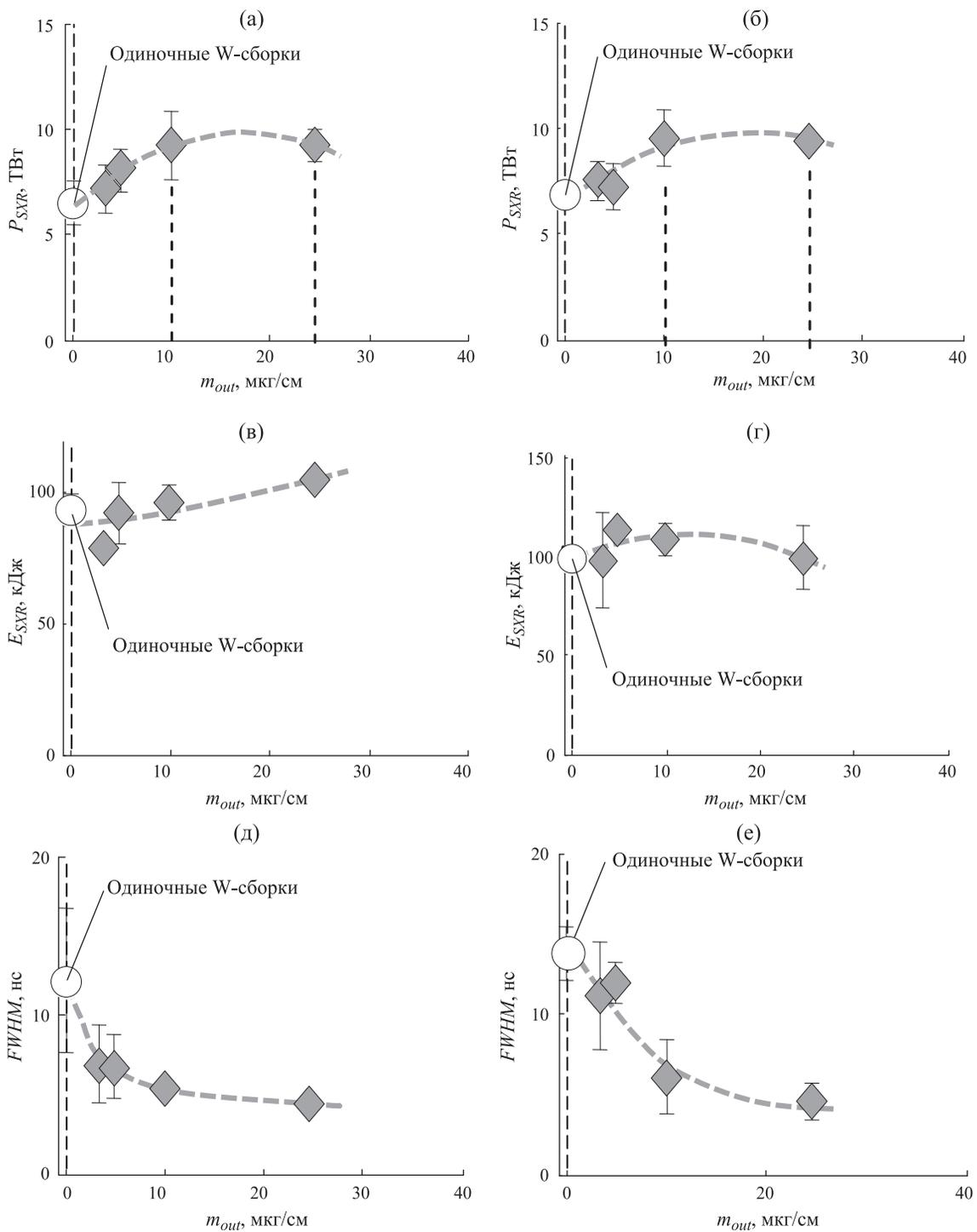


Рис. 17. Зависимость параметров импульса мощности МРИ (P_{SXR} , $P_{>600}$, $h\nu > 100$ эВ и $h\nu > 600$ эВ — пиковой мощности, E_{SXR} , $h\nu > 100$ эВ — энергии и $FWHM$ — ширины импульса на его полувысоте) от массы m_{out} PP-волокон внешней сборки ($r_{out} = 0.6$ см) для вложенных сборок смешанного состава (PP-W) с различным радиусом r_{in} внутреннего каскада: а), в), д), ж) — $r_{in} = 0.3$ см; б), г), е), з) — $r_{in} = 0.4$ см. \diamond — для $N_{in} = 40$ W-проволок линейной массы 220 мкг/см. Кружками (o) представлены данные для одиночных 40W-сборок.

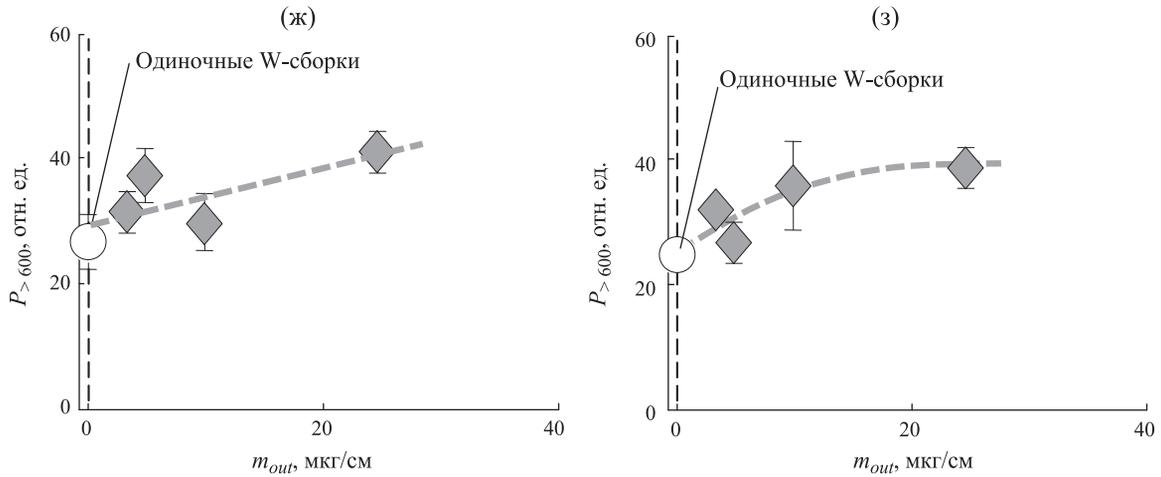


Рис. 17. Окончание. Зависимость параметров импульса мощности МРИ (P_{SXR} , $P_{>600}$, $h\nu > 100$ эВ и $h\nu > 600$ эВ — пиковой мощности, E_{SXR} , $h\nu > 100$ эВ — энергии и $FWHM$ — ширины импульса на его полувысоте) от массы m_{out} PP-волокон внешней сборки ($r_{out} = 0.6$ см) для вложенныхборок смешанного состава (PP-W) с различным радиусом r_{in} внутреннего каскада: а), в), д), ж) — $r_{in} = 0.3$ см; б), г), е), з) — $r_{in} = 0.4$ см. \blacklozenge — для $N_{in} = 40$ W-проволок линейной массы 220 мкг/см. Кругами (о) представлены данные для одиночных 40W-борок.

борок, что приводит к увеличению пиковой мощности излучения для таких нагрузок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллективу установки Ангара-5-1 за инженерно-техническое сопровождение экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Olson C., Rochau G., Slutz S., Morrow C., Olson R., Cuneo M., Hanson D., Bennett G., Sanford T., Bailey J., Stygar W., Vesey R., Mehlhorn T., Struve K., Mazarakis M., Savage M., Pointon T., Kiefer M., Rosenthal S., Cochrane K., Schneider L., Glover S., Reed K., Schroen D., Farnum C., Modesto M., Oscar D., Chhabildas L., Boyes J., Vigil V., Keith R., Turgeon M., Cipiti M., Lindgren E., Dandini V., Tran H., Smith D., McDaniel D., Quintenz J., Matzen M.K., VanDeventer J.P., Gauster W., Shephard L., Walck M., Renk T., Tanaka T., Ulrickson M., Meier W., Latkowski J., Moir R., Schmitt R., Reyes S., Abbott R., Peterson R., Pollock G., Ottinger P., Schumer J., Peterson P., Kammer D., Kulcinski G., El-Guebaly L., Moses G., Sviatoslavsky I., Sawan M., Anderson M., Bonazza R., Oakley J., Meekunasombat P., De Groot J., Jensen N., Abdou M., Ying A., Calderoni P., Morley N., Abdelkhalik S., Dillon C., Lascar C., Sadowski D., Curry R., McDonald K., Barkey M., Szaroletta W., Gallix R., Alexander N., Rickman W., Charman C., Shatoff H., Welch D., Rose D., Panchuk P., Louie D., Dean S., Kim A., Nedoseev S., Grabovsky E., Kingsep A., Smirnov V. *Development Path for Z-Pinch IFE*. // Fusion Science and Technology. 2005. V. 47. N. 3. P. 633–640.
- Sangster T.C., McCrory R.L., Goncharov V.N., Harding D.R., Loucks S.J., McKenty P.W., Meyerhofer D.D., Skupsky S., Yaakobi B., MacGowan B.J., Atherton L.J., Hammel B.A., Lindl J.D., Moses E.I., Porter J.L., Cuneo M.E., Matzen M.K., Barnes C.W., Fernandez J.C., Wilson D.C., Kilkenny J.D., Bernat T.P., Nikroo A., Logan B.G., Yu S., Petrasso R.D., Sethian J.D., Obenschain S. // Nuclear Fusion. 2007. V. 47. N. 10. P. S686–S695.
- Abu-Shawareb H., R. Acree, Adams P. et. al. // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 129. N. 8. P. 075001-1–075001-15.
- Lindl J.D., Amendt P., Berger R.L., Glendinning S.G., Glenzer S.H., Haan S.W., Kauffman R.L., Landen O.L., Suter L.J. // Phys. Plasmas. 2004. V. 11. N. 2. P. 339–491.
- Lawrence Livermore National Laboratory, 2022, <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-achieves-fusion-ignition>
- Remington B.A., Drake R.P. and Ryutov D.D. // Rev. Mod. Phys. 2006. V. 78. N. 8. P. 755.
- Фортвов В.Е. // УФН. 2009. Т. 179. № 6. С. 653–687.
- Drake R.P. // Springer Science & Business Media. 2006. 518 с.
- Грабовский Е.В., Сасоров П.В., Шевелько А.П., Александров В.В., Андреев С.Н., Баско М.М., Браницкий А.В., Грицук А.Н., Волков Г.С., Лаухин Я.Н., Митрофанов К.Н., Новиков В.Г., Олейник Г.М., Саломхин А.А., Смирнов В.П., Толстихина И.Ю., Фролов И.Н., Якушев О.Ф. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 5. С. 394–401.
- Grabovsky E.V., Sazorov P.V., Shevelko A.P., Aleksandrov V.V., Andreev S.N., Basko M.M., Branitski A.V., Gritsuk A.N., Volkov G.S., Laukhin Ya.N., Mitrofanov K.N., Oleinik G.M., Samokhin A.A., Smirnov V.P., Tolstikhina I.Yu.,

- Frolov I.N., Yakushev O.F.* // Matter and Radiation at Extremes. 2017. V. 2. № 3. P. 129–138.
11. *Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Фролов И.Н., Браницкий А.В., Лаухин Я.Н.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 4. С. 367–382.
 12. *Александров В.В., Баско М.М., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Сасоров П.В., Фролов И.Н.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 7. С. 613–650.
 13. *Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Баско М.М.* // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 9. С. 847–870.
 14. *Gritsuk A.N., Mitrofanov K.N., Aleksandrov V.V., Branitskiy A.V., Grabovskiy E.V., Oleinik G.M., Frolov I.N., Basko M.M., Grushin A.S., Solomyannaya A.D., Rodionov N.B.* // Plasma Physics Reports. 2024. V. 50. N. 2. P. 206–224.
 15. *Митрофанов К.Н., Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 10. С. 887–920.
 16. *Mitrofanov K.N., Aleksandrov V.V., Branitskiy A.V., Grabovskiy E.V., Gritsuk A.N., Oleinik G.M., Frolov I.N., Samokhin A.A., Olkhovskaya O.G., Gasilov V.A.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2022. V. 64., N. 4. P. 045007-1–045007-24.
 17. *Митрофанов К.Н., Грицук А.Н., Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Олейник Г.М., Фролов И.Н.* // Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 7. С. 647–670.
 18. *Альбикиев З.А., Велихов Е.П., Веретенников А.И., Глухих В.А., Грабовский Е.В., Грязнов Г.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. 26–35.
 19. *Малышев В.И.* Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука, 1979.
 20. *Antsiferov P.S., Dorokhin L.A. and Krainov P.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 87. N. 5. P. 053106.
 21. *Скобляков А.В., Колесников Д.С., Канцырев 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. № 6. С. 558–575.
 22. *Skobliakov A.V., Kolesnikov D.S., Kantsyrev A.V., Golubev A.A., Plyicheva M.V., Gritsuk A.N., Grabovskii E.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2023. V. 94. N. 11. P. 113102.
 23. *Браницкий А.В., Олейник Г.М.* // Приборы и техника эксперимента (ПТЭ). 2000. №4. С. 58–64.
 24. *Александров В.В., Волков Г.С., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Лахтюшко Н.И., Медовицков С.Ф., Олейник Г.М., Светлов Е.В.* // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 2. С. 160–171.
 25. *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.* // Приборы и техника эксперимента (ПТЭ). 2004. № 2. С. 74–81.
 26. *Олейник Г.М.* // Приборы и техника эксперимента (ПТЭ). 2000. № 3. С. 49–51.
 27. *Александров В.В., Грабовский Е.В., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Смирнов В.П., Сасоров П.В., Фролов И.Н.* // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 7. С. 615–629.
 28. *Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грицук А.Н., Грабовский Е.В., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н., Брешков С.С.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 2. С. 134–157.
 29. *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. № 2. С. 157–192.
 30. *Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Браницкий А.В., Грицук А.Н., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 9. С. 751–764.
 31. *Cuneo M.E., Waisman E.M., Lebedev S.V., Chittenden J.P., Stygar W.A., Chandler G.A., Vesey R.A., Yu E.P., Nash T.J., Bliss D.E., Sarkisov G.S., Wagoner T.C., Bennett G.R., Sinars D.B., Porter J.L., Simpson W.W., Ruggles L.E., Wenger D.F., Garasi C.J., Oliver B.V., Aragon R.A., Fowler W.E., Hettrick M.C., Idzorek G.C., Johnson D., Keller K., Lazier S.E., McGurn J.S., Mehlhorn T.A., Moore T., Nielsen D.S., Pyle J., Speas S., Struve K.W., Torres J.A.* // Phys. Rev. E. 2005. V. 71. P. 046406-1–046406-43.
 32. *Gritsuk A.N., Aleksandrov V.V., Grabovskiy E.V., Laukhin Y., Mitrofanov K.N., Oleinik G.M., Volkov G.S., Frolov I.N. and Shevel'ko A.P.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. V. 41. N. 11. P. 3184–3189.
 33. *Vichev I.Yu., Novikov V.G., Solomyannaya A.D.* // Mathematical Models and Computer Simulations. 2009. V. 1, N. 4. P. 470–481.
 34. *Colm S Harte, Higashiguchi T., Otsuka T., D'Arcy R., Kilbane D. and O'Sullivan G.* // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2012. V. 45. N. 20. P. 205002.

POWERFUL SOURCE OF SOFT X-RAY RADIATION BASED ON Z-PINCH OF NESTED ARRAYS FOR EXPERIMENTS IN HIGH-ENERGY DENSITY PHYSICS

K. N. Mitrofanov^{a,*}, A. N. Gritsuk^a, V. V. Aleksandrov^a, A. V. Branitsky^a,
E. V. Grabovski^a, I. N. Frolov^a, and V. V. Ryzhakov^a

^aTroitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk, Moscow, 142190 Russia

*e-mail: mitrofan@triniti.ru

The results of research on the creation of a powerful source of soft X-ray radiation (SXR, $h\nu > 100$ eV) based on the Z-pinch of compact nested arrays are presented. One of the applications of such an SXR source can be radiation ablation of targets made of various substances in experiments on high-energy density physics and extreme states of matter, which are currently being actively carried out worldwide. Experiments are carried out on plasma implosion of combined nested arrays with different ratios of array radii at a discharge current level of up to 3.5 MA at the pulse power facility Angara-5-1. The outer array consisted of fibers of a substance with a low atomic number (polypropylene) and the inner array consisted of a substance with a high atomic number (tungsten). It is shown that in the case of nested arrays of this design, it is possible to obtain a significant (~ 1.4 times) increase in the peak SXR power compared to single W arrays with the same parameters as the W array in the inner array. At the same time, spectral data obtained using a “flat field” grazing incidence spectrograph demonstrate a significant decrease in the fraction of tungsten ions in the trailing plasma around the pinch of nested arrays. By optimizing the linear mass of the outer array and its radius, powerful and short SXR pulses with amplitude of ~ 10 TW, energy of ~ 130 kJ and duration of ~ 4 – 5 ns are obtained. This made it possible to increase the incident power density and fluence on the target up to 1.55 TW/cm² and 17 kJ/cm², respectively, in experiments on extreme states of matter currently being carried out at the facility.

Keywords: implosion of multi-wire array, nested wire arrays, magnetic field, thin wires/fibers, trailing plasma, Z-pinch, X-ray emission