

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ
В ИЗЛУЧЕНИЕ Z-ПИНЧА ВЛОЖЕННЫХ СБОРОК СМЕШАННОГО
СОСТАВА НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1© 2023 г. К. Н. Митрофанов^{a,*}, А. Н. Грицук^a, В. В. Александров^a,
А. В. Браницкий^a, Е. В. Грабовский^a, Г. М. Олейник^a, И. Н. Фролов^a^a ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”, Москва, Россия

*e-mail: mitrofan@triniti.ru

Поступила в редакцию 13.02.2023 г.

После доработки 07.04.2023 г.

Принята к публикации 24.04.2023 г.

Представлены результаты экспериментов по исследованию генерации мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ) с энергией квантов более 100 эВ (в спектральном диапазоне с длинами волн λ короче 120 Å) при сжатии плазмы двухкаскадных вложенныхборок смешанного состава с различным отношением радиусов каскадов, проведенных на мощной электрофизической установке Ангара-5-1 при уровне разрядного тока до 3.5 МА. Внешний каскад состоял из волокон вещества с малым атомным номером (пластик), внутренний каскад – из вещества с высоким атомным номером (вольфрам, W). В случае вложенныхборок данной конструкции получено существенное повышение пиковой мощности МРИ по сравнению с одиночными W-борокми с теми же параметрами, что и у W-борокми во внутреннем каскаде. Путем оптимизации линейной массы внешнего каскада и отношения радиусов каскадов получены мощные импульсы МРИ с высокой импульсной мощностью до 18 ТВт, энергией в импульсе ~ 140 кДж и короткой длительностью импульса ~ 5 нс. Показано, что путем оптимизации линейной массы внешнего каскада (волоконной сборки) можно достигнуть $\sim 90\%$ преобразования электромагнитной энергии, закачанной в окрестность лайнера, в энергию рентгеновского излучения пинча. При этом доля кинетической энергии сжатия плазмы в энергии излучения составляет не выше 30%. В оптимальных по выходной мощности МРИ выстрелах зарегистрировано увеличение доли энергии рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $\lambda \in (30, 40)$ Å, что на 30–100% выше по сравнению с одиночными W-борокми со схожими параметрами.

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

DOI: 10.31857/S0367292123600176, EDN: VXMSDK

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение вложенныхборок в экспериментальных исследованиях по программе инерционного термоядерного синтеза (ИТС) на мощных электрофизических установках, таких как Ангара-5-1 (Россия), ZR (США), Julong-1 (КНР), позволило повысить мощность и энергию источника мягкого рентгеновского излучения (МРИ, энергии квантов $h\nu > 100$ эВ), а также сократить длительность его импульса по сравнению с одиночными многопроволочными борокми [1–3]. Эксперименты с вложенными борокми продемонстрировали лучшую воспроизводимость параметров импульса МРИ в отличии от одиночных многопроволочныхборокми.

В работах, указанных выше, эксперименты проводились с вольфрам-вольфрамовыми (W-W)

вложенными проволочными борокми. В частности, на установке ZR [1] для увеличения мощности и уменьшения длительности импульса МРИ наращивалась как линейная масса m_{out} внешнего каскада (W-борокми) с 900 мкг/см до 1850 мкг/см, так и линейная масса m_{in} внутреннего каскада (W-борокми) с 470 мкг/см до 1900 мкг/см. В такой постановке эксперимента для получения высокого выхода МРИ использовались конструкции (W-W) вложенныхборокми с большой массой внешней сборки по отношению к массе внутренней сборки – $m_{out}/m_{in} = 2$. При этом было получено увеличение амплитуды импульса мощности излучения на 40% до (280 ± 40) ТВт, уменьшение ширины импульса на половине его высоты на 30% ($FWHM \sim 4$ нс) и уменьшение финального диаметра пинча в 1.5 раза (до 1 мм) по сравнению с одиночными W-борокми с линейной массой

проволок около 2050 мкг/см. Следует заметить, что в этих экспериментах полная линейная масса вложенныхборок отличалась от линейной массы проволок одиночной сборки, которая была выбрана для сравнения, и была в 1.4 раза больше. Данный подход основан на подавлении магнитной Релей-Тейлоровской (МРТ) неустойчивости, как одного из основных типов неустойчивостей, возникающих при имплозии проволочныхборок различных конструкций [4–6], за счет взаимодействия плазмы внешнего каскада с плазмой внутреннего каскада. При этом плазма внешнего каскада из вещества с высоким атомным номером и с высокой излучательной способностью остается частично подверженной МРТ-неустойчивости. Это способствует образованию т.н. “отставшей плазмы” (“*trailing mass*”) [7]. Известно, что образование отставшей плазмы в результате развития неустойчивостей на финальной стадии сжатия плазмы негативно влияет на параметры импульса МРИ. Это ограничивает его амплитуду и увеличивает длительность за счет прилета отставшей плазмы с током после момента образования пинча. Для получения мощных импульсов рентгеновского излучения необходимо оптимизировать конструкцию лайнеров с целью уменьшения отставшей плазмы многозарядных ионов.

Поэтому наш новый подход для получения мощных выходов МРИ заключается в использовании двухкаскадных вложенныхборок смешанного состава, у которых вещество внешнего каскада заменено на вещество с малым атомным номером (с невысокой излучательной способностью в рентгеновском диапазоне спектра $h\nu > 100$ эВ). Данный подход основан на последних экспериментальных данных об интенсивности плазмообразования различных веществ \dot{m} (в мкг/(см² · нс)) [8] и на особенностях динамики сжатия плазмы в таких сборках [9]. Внешний каскад представляет собой сборку, изготовленную из тонких пластиковых волокон; внутренний каскад – обычная вольфрамовая проволочная сборка. Такой дизайн вложенныхборок позволил существенно замедлить развитие МРТ-неустойчивости на финальной стадии сжатия плазмы W-сборки внутреннего каскада [10, 11]. При этом подверженная неустойчивости плазма внешнего каскада не оказывает существенного влияния на параметры импульса МРИ.

В экспериментах на установке Ангара-5-1 по сжатию плазмы вложенныхборок использовались сборки смешанного состава с отношением радиусов внутреннего и внешнего каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5$. При этом, варьируя массу пластиковых волокон внешнего каскада при уровне разрядного тока 2.5–3 МА, удалось достичь двукратного увеличения пиковой мощности МРИ 10 ТВт и сокращения длительности импульса излучения

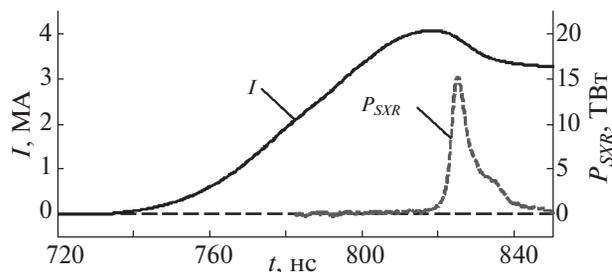


Рис. 1. Типичные временные зависимости полного тока I и импульса мощности МРИ P_{SXR} в экспериментах по сжатию вложенныхборок смешанного состава на установке Ангара-5-1.

до 5 нс по сравнению с одиночными сборками с идентичными значениями линейной массы вольфрамовых проволок, их количества и начального радиуса сборки [12, 13]. Последние эксперименты показывают, что возможно достижение прогнозируемого предельного уровня пиковой мощности МРИ 15 ТВт (см. рис. 1) и несколько более для вложенныхборок с оптимальной массой внешнего каскада [14]. Таким образом, в условиях эксперимента на установке Ангара-5-1 показана принципиальная возможность существенного повышения пиковой мощности излучения при использовании одной и той же массы W-сборки при одном и том же уровне разрядного тока около 3 МА. Это открывает новые перспективы генерации мощных импульсов рентгеновского излучения на существующих в настоящее время электрофизических установках.

Данная статья является естественным продолжением цикла работ по оптимизации различных параметров вложенныхборок для получения мощных выходов рентгеновского излучения. Целями настоящей работы являлось дальнейшее развитие схемы имплозии плазмы на основе двухкаскадных вложенныхборок (внешний каскад – волокна из полипропилена PP, внутренний каскад – вольфрамовые тонкие проволочки W, PP-W) смешанного состава, которое заключалось:

– в экспериментальном определении оптимальных значений параметров (линейной массы волокон m_{out} и их количества N_{out}) внешнего каскада вложенныхборок с различным отношением радиусов каскадов r_{in}/r_{out} , изготовленного из тонких пластиковых волокон, для получения максимальной пиковой мощности и минимальной длительности импульса МРИ по сравнению с одиночными вольфрамовыми сборками с теми же параметрами, что и у W-сборки во внутреннем каскаде;

– в изучении спектральных особенностей излучения Z-пинча в оптимальных по выходу МРИ импульсах;

– в определении эффективности вклада электромагнитной энергии, запасенной в центральной части установки, в сжимающуюся плазму вложенных сборок.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА. ПАРАМЕТРЫ ВЛОЖЕННЫХ СБОРОК И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

На установке Ангара-5-1 при уровне разрядного тока 3–3.5 МА проведена серия из 60 выстрелов по сжатию плазмы двухкаскадных вложенных сборок и одиночных W-сборок с параметрами, идентичными внутреннему каскаду вложенных сборок (см. табл. 1). Установка Ангара-5-1 [15] 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 составляла 3–4 МА ($\tau = 100$ –120 нс), а измеренная на радиусе 6 см от оси амплитуда напряжения – 0.5–0.7 МВ (рис. 1).

Конструкция вложенных сборок смешанного состава состояла из двух каскадов (см. рис. 2): внешний каскад представлял собой волоконную сборку радиусом $r_{out} = 10$ мм, состоящую из различного количества полипропиленовых (PP, $(C_3H_6)_n$) волокон диаметром около 8 мкм, внутренний каскад – проволочная сборка из 40 или 60 вольфрамовых (W) проволок диаметром 6 мкм и линейной массы 220 мкг/см и 330 мкг/см, соответственно. Радиус r_{in} внутреннего каскада вложенных сборок в этой серии экспериментов имел следующие значения 5 мм, 6.5 мм и 8 мм. Оптимизация рентгеновского излучения Z-пинча вложенных сборок с различным отношением радиусов каскадов r_{in}/r_{out} проводилась путем изменения линейной массы внешнего каскада m_{out} в широком диапазоне значений от 3 мкг/см до 100 мкг/см. Проведены сравнительные эксперименты по генерации импульса МРИ по сжатию плазмы одиночных W-сборок с теми же параметрами (количество проволок, радиус сборки и ее масса), что и у W-сборки во внутреннем каскаде (PP-W) вложенных сборок.

Для решения поставленных задач в экспериментах были использованы следующие диагностические методики: датчики излучения – вакуумные рентгеновские диоды (ВРД) и термодатчик типа ВЧД-3, многокадровая рентгеновская камера СХР6 (регистровала 10 кадров за импульс, длительность временной экспозиции каждого кадра 1 нс, регистрируемая

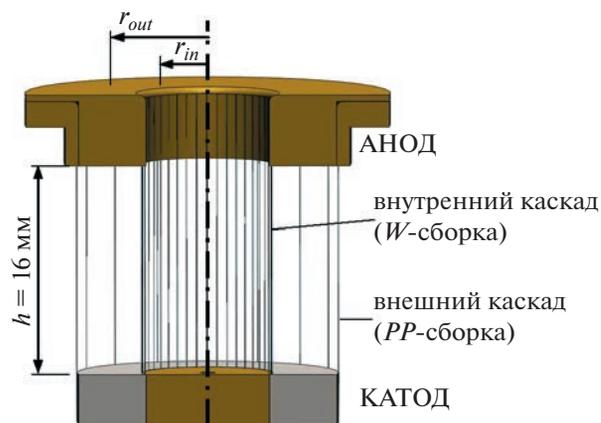


Рис. 2. Общий вид конструкции вложенных сборок смешанного состава в межэлектродном зазоре установки Ангара-5-1.

энергия квантов $h\nu > 70$ эВ или излучение с длинами волн $\lambda < 180$ Å), дифракционный ВУФ-спектрограф скользящего падения (GIS-3d) с пространственным и временным разрешением с регистрацией 3 кадров, при длительности каждого кадра 1.5 нс, с разрешением по длинам волн $\lambda/\Delta\lambda \sim 100$. Пространственное разрешение спектрографа в аксиальном направлении вдоль оси пинча для излучения с энергией фотонов более 100 эВ составляло около 250 мкм. ВРД за разными фильтрами на входе регистрировали импульс мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергии квантов от 20 эВ вплоть до 2 кэВ, также как сигналы термодатчика ВЧД-3 располагались на расстоянии ~ 3.5 м от пинча в радиальном направлении. По сигналам ВРД рассчитывалась мощность излучения в указанном диапазоне энергий квантов [16]. Погрешность измерения импульсов электромагнитной энергии термодатчиком ВЧД-3 не превышала 15% [17]. Динамика сжатия плазмы вложенных и одиночных сборок регистрировалась по лазерным теневым изображениям. Трехкадровое теневое зондирование плазмы (с экспозицией каждого кадра 100 пс) осуществлялось световым пучком на второй гармонике частоты Nd:YAG-лазера (длина волны лазерного излучения $\lambda = 532$ нм) в радиальном направлении с регистрацией двумерных изображений на цифровые фотоаппараты. Пространственное разрешение лазерной диагностики по объекту было не хуже 50 мкм. Также диагностический комплекс [18] установки Ангара-5-1 включал в себя электротехнические методы регистрации тока и напряжения, включая 8-петельный датчик производной полного тока и индуктивный делитель напряжения [19].

Таблица 1. Параметры вложенных сборок

| Выстрел | Параметры | | | Примечание/назначение |
|---|---|--|------------------|--|
| | внешнего каскада* | внутреннего каскада | r_{in}/r_{out} | |
| 6793, 6795 | 24 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~9.8 мкг/см | 40 W 6 мкм проволока, 220 мкг/см, $r_{in} = 5$ мм | 0.5 | поиск параметров вложенных сборок вблизи максимальных выходов МРИ |
| 7017, 7019, 7021, 7023, 7027–7029 | | 60 W 6 мкм проволока, 330 мкг/см, $r_{in} = 5$ мм | | |
| 6641–6643, 7030, 7034, 7044, 7046, 7052 | 60 W 6 мкм проволока, 330 мкг/см, $r = 5$ мм | | – | одиночная сборка для сравнения с (PP-W) вложенными сборками |
| 6995, 6997, 7003, 7013, 7016 | 8 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~3.3 мкг/см | 40 W 6 мкм проволока, 220 мкг/см, $r_{in} = 6.5$ мм | 0.65 | сопоставление эффективности генерации импульсов МРИ с одиночными W-сборками поиск параметров вложенных сборок вблизи максимальных выходов МРИ |
| 6986, 6994 | 12 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~4.9 мкг/см | 60 W 6 мкм проволока, 330 мкг/см, $r_{in} = 6.5$ мм | | |
| 6982, 6985 | 24 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~9.8 мкг/см | | | сопоставление эффективности генерации импульсов МРИ с одиночными W-сборками |
| 6981, 7005, 7008 | 40 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~16.4 мкг/см | 40 W 6 мкм проволока, 220 мкг/см, $r_{in} = 6.5$ мм | | |
| 6978–6980 | | 60 W 6 мкм проволока, 330 мкг/см, $r_{in} = 6.5$ мм | | сопоставление эффективности генерации импульсов МРИ с одиночными W-сборками |
| 7009–7011 | | 40 W 6 мкм проволока, 220 мкг/см, $r_{in} = 6.5$ мм | | |
| 7012 | 60 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~24.6 мкг/см | | | сопоставление эффективности генерации импульсов МРИ с одиночными W-сборками |
| 7004 | 80 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~32.8 мкг/см | 40 W 6 мкм проволока, 220 мкг/см, $r_{in} = 6.5$ мм | | |
| 6987, 6990 | 40 W 6 мкм проволока, 220 мкг/см, $r_{in} = 6.5$ мм | | – | одиночная сборка для сравнения с (PP-W) вложенными сборками |
| 7014, 7015 | 60 W 6 мкм проволока, 330 мкг/см, $r_{in} = 6.5$ мм | | | |
| 6797, 6803 | 24 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~8.4 мкг/см | 40 W 6 мкм проволока, 220 мкг/см, $r_{in} = 8$ мм | 0.8 | сопоставление эффективности генерации импульсов МРИ с одиночными W-сборками поиск параметров вложенных сборок вблизи максимальных выходов МРИ |
| 6935, 6941 | 30 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~11.6 мкг/см | | | |
| 6917, 6918, 6927 | 40 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~16.0 мкг/см | | | сопоставление эффективности генерации импульсов МРИ с одиночными W-сборками |
| 6928, 6929 | 60 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~23.6 мкг/см | | | |
| 6942, 6943 | 80 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~32.8 мкг/см | | | сопоставление эффективности генерации импульсов МРИ с одиночными W-сборками |
| 6976, 6977 | 120 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~49.2 мкг/см | | | |
| 7020 | 240 PP-волокон $\varnothing 8$ мкм, ~98.4 мкг/см | | | одиночная сборка для сравнения |
| 6930, 6931, 6933, 6936, 6937 | 40 W 6 мкм проволока, 220 мкг/см, $r_{in} = 8$ мм | | – | |

Примечание: $r_{out} = 10$ 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.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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

В этом разделе приведены результаты экспериментов с (PP-W) вложенными сборками с различным отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5, 0.65$ и 0.8 . Более подробно оптимизация мощности МРИ от отношения радиусов каскадов r_{in}/r_{out} и массы m_{out} волокон внешнего каскада по всей совокупности выстрелов рассмотрена в разд. 4.1 настоящей статьи. Здесь же на рис. 3–7 представлены результаты только тех выстрелов, в которых был зарегистрирован максимальный выход МРИ для каждого из указанных выше значений r_{in}/r_{out} . На данных рисунках в части (а) показаны временные зависимости производной полного тока dI/dt (кривая 1), напряжения U (кривая 2) и импульса мощности МРИ P_{SXR} (кривая 3) в наиболее представительном по энергии излучения в диапазоне энергии квантов $h\nu > 100$ эВ. Там же 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. Более подробно определение времен из электротехнических измерений тока и напряжения, связанных с динамикой плазмы в многопроволочных сборках различных конструкций, представлено в работах [6, 9, 20]. Рядом с осциллограммами на рисунках показаны моменты времени регистрации кадровых рентгеновских (СХР6) и лазерных теневых (LAS) изображений, представленных в части рисунков (б) или (в). 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 $U \approx LdI/dt$ (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 вместе с плазмой проникает в приосевую область вложенныхборок, создавая условия для диссипации электромагнитной энергии цепи плазмой Z-пинча и получения высоких выходов рентгеновского излучения.

Как было показано в наших предыдущих работах [9, 12], существует взаимосвязь амплитуды импульса МРИ от финального радиуса пинча, определенного по данным различных диагностик (рентгеновским и лазерным теневым изображениям и электротехническим измерениям эффективного токового радиуса). Определено, что чем меньше радиус сжатого состояния пинча, тем выше выход рентгеновского излучения. При радиальных размерах (диаметре) пинча менее 1 мм в экспериментах с (PP-W) вложенными сборками была зарегистрирована пиковая мощность около 10 ТВт при уровне разрядного тока 2.5–3 МА. Линии трендов полученных в этих экспериментах зависимостей амплитуды импульса мощности МРИ от финального размера Z-пинча указывают на возможность дальнейшей оптимизации выхода МРИ на лайнерах данного типа вплоть до уровня пиковой мощности 14 ТВт и более в результате повышения степени сжатия плазмы (>20), в том числе за счет как оптимизации линейной массы внешнего каскада, так и за счет варьирования отношения радиусов r_{in}/r_{out} внутреннего и внешнего каскада вложенныхборок.

В представляемой в этой статье серии экспериментов при большем уровне разрядного тока 3–3.5 МА, как следует из кадровых рентгеновских и лазерных теневых изображений (см. рис. 3б, в–7б, в), в выстрелах с высоким выходом МРИ достигнута высокая степень сжатия плазмы W-сборки внутреннего каскада (~20–25).

В случае (PP-W) вложенныхборок с отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5$ и двумя вариантами линейной массы W-сборки $m_{in} = 220$ и 330 мкг/см достигнуты следующие значения пиковой мощности МРИ 15 ТВт и 18 ТВт, соответственно. При этом диаметр пинча в момент пиковой мощности МРИ составил не более 0.5 мм по данным многокадровой рентгеновской регистрации (см. кадры в моменты t_1 на рис. 3б и t_8, t_9 на рис. 4б) и 0.7–0.8 мм по данным лазерного теневого зондирования (см. кадры в моменты t_2^* на рис. 3в и на рис. 4в). В случае вложенныхборок с отношением $r_{in}/r_{out} = 0.65$ и линейной массой внутреннего каскада 220 мкг/см и 330 мкг/см (см. рис. 5а и рис. 6а) получены значения пиковой мощности излучения 17–18 ТВт. При этом радиальный размер пинча на рентгеновских изображениях составил около 0.5 мм (см. кадры в моменты t_6, t_7 на рис. 5б и t_8, t_9 на рис. 6б) и лазерных – около 1 мм (см. кадры в моменты t_2^* на рис. 5в и на рис. 6в).

Следует заметить, что увеличение массы внутреннего каскада (W-сборки) в 1.5 раза не приводит к существенному приросту амплитуды импульса мощности МРИ (не более чем в 1.2 раза в

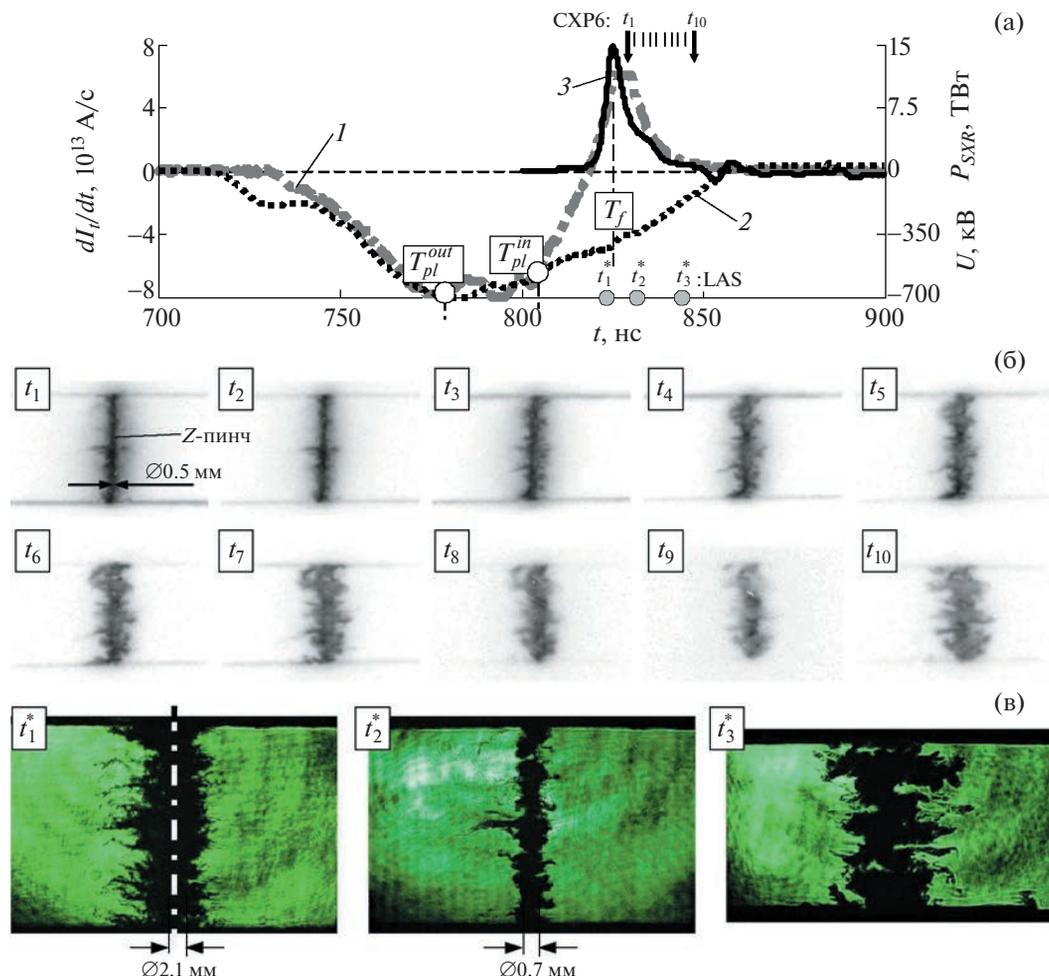


Рис. 3. Результаты эксперимента № 6793 с вложенными сборками: внешний каскад – сборка из 24 полипропиленовых 7.0 мкм волокон, погонной массы 9.2 мкг/см. Радиус сборки – 10 мм, высота – 16 мм; внутренний каскад – сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, погонной массы 220 мкг/см. Радиус сборки – 5 мм, высота – 16 мм: а) – временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения; 3 – импульса мощности МРИ в спектральном диапазоне ($h\nu > 100$ эВ); 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 СХР6). Анод – вверх, катод – вниз; 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 – вниз.

случае $r_{in}/r_{out} = 0.5$ и не более чем в 1.05 раза в случае $r_{in}/r_{out} = 0.65$).

Таким образом, при сжатии плазмы вложенных сборок с отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5$ и 0.65 получены компактные размеры пинча в стадии стагнации и высокие выходы рентгеновского излучения 17–18 ТВт длительностью $FWHM$ 5–6 нс. В случае вложенных сборок с отношением $r_{in}/r_{out} = 0.8$ зарегистрированы менее компактные размеры пинча с большим радиальным размером 0.6–0.7 мм (см. кадры в моменты

t_6 , t_7 на рис. 7б) и 1.6 мм (см. кадр t_1^* на рис. 7в). В данном случае пинч оказывается больше подвержен МГД-неустойчивостям. При этом вокруг пинча присутствует отставшая плазма, излучающая в рентгеновском диапазоне спектра, что свидетельствует о менее эффективной транспортировке тока в приосевую область плазмы. Как следствие этого, уровень пиковой мощности МРИ оказался меньше и составил около 16 ТВт, а длительность импульса МРИ больше – $FWHM$ 7–8 нс (см. рис. 7а).

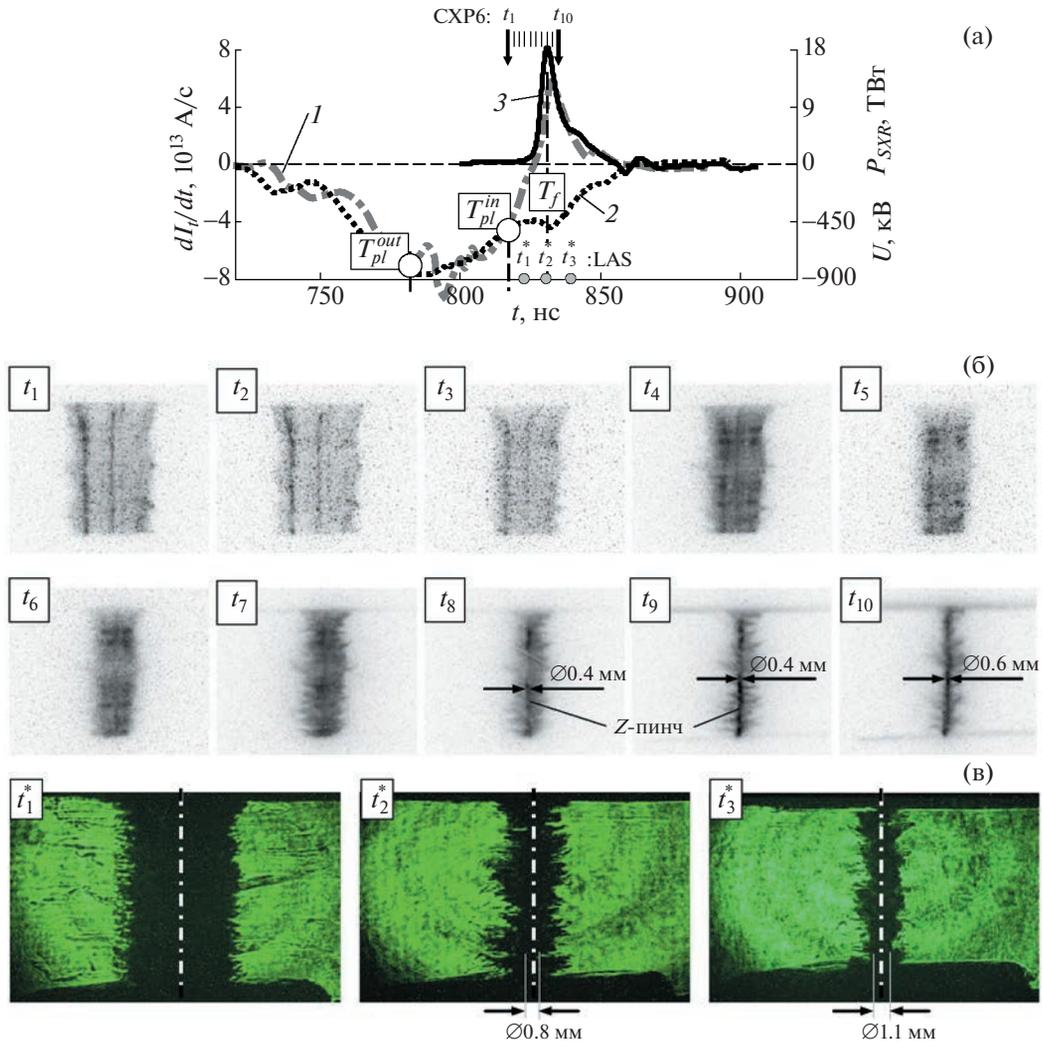


Рис. 4. Результаты эксперимента № 7028 с вложенными сборками: внешний каскад – сборка из 24 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы 9.8 мкг/см. Радиус сборки – 10 мм, высота – 16 мм; внутренний каскад – сборка из 60 вольфрамовых 6 мкм проволок, погонной массы 330 мкг/см. Радиус сборки – 5 мм, высота – 16 мм: а) – временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения; 3 – импульса мощности МРИ в спектральном диапазоне ($h\nu > 100$ эВ); 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 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.

Ниже в табл. 2 представлены оптимальные параметры импульса МРИ, а именно: максимальное значение пиковой мощности P_{SXR}^{max} , полученное в этой серии экспериментов, энергии излучения E_{SXR} и длительности импульса на половине его высоты $FWHM$, которые были получены в данной серии экспериментов в зависимости от характеристик внешнего каскада (его линейной массы m_{out} и количества волокон) и внутреннего

каскада (количества W-волокон и их линейной массы m_{in}), а также от отношения радиусов каскадов вложенных сборок r_{in}/r_{out} . Радиус внешнего каскада вложенных сборок в этой серии экспериментов не варьировался и равнялся $r_{out} = 1.0$ см. Как следует из данных в таблице, при уменьшении отношения радиусов каскадов вложенных сборок r_{in}/r_{out} с 0.8 до 0.5 наблюдается небольшое повышение максимального значения пиковой

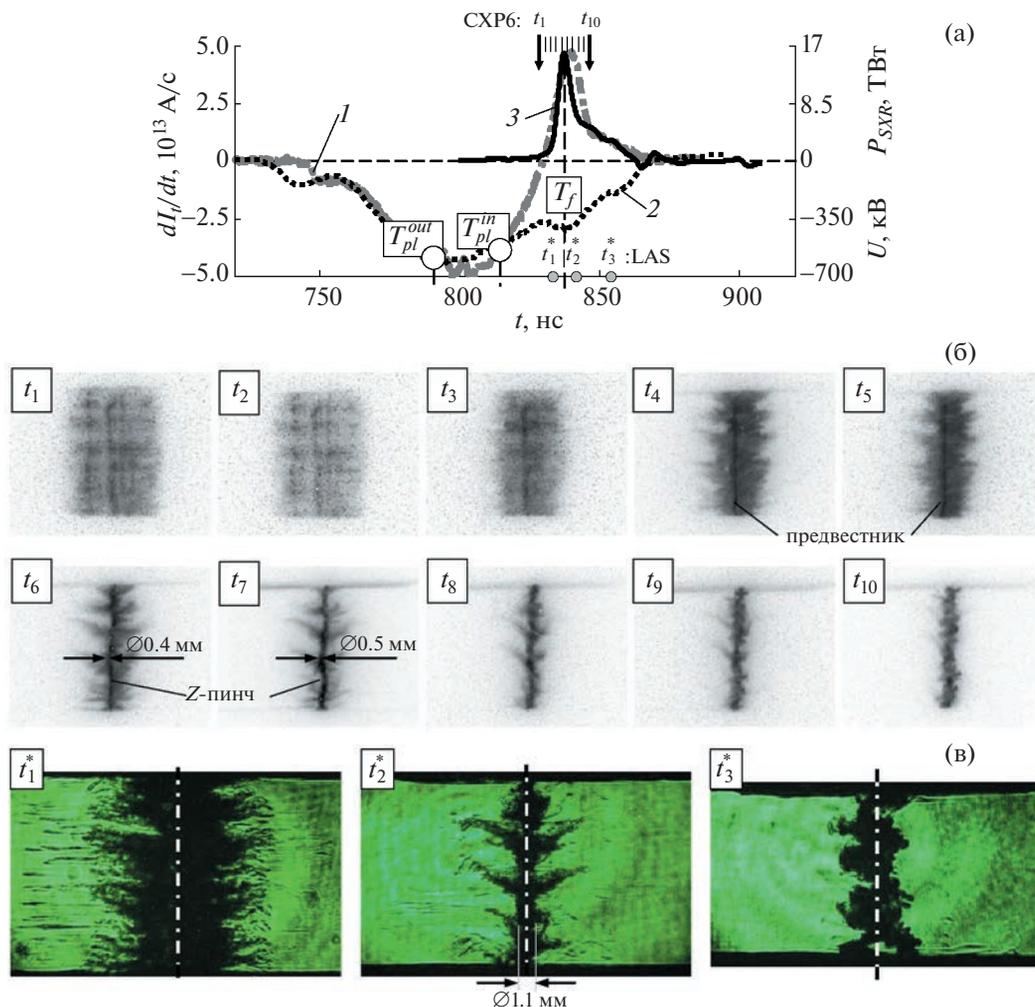


Рис. 5. Результаты эксперимента № 6994 с вложенными сборками: внешний каскад – сборка из 12 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы 4.9 мкг/см. Радиус сборки – 10 мм, высота – 16 мм; внутренний каскад – сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, погонной массы 220 мкг/см. Радиус сборки – 6.5 мм, высота – 16 мм: а) – временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения; 3 – импульса мощности МРИ в спектральном диапазоне ($h\nu > 100$ эВ); 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.

мощности P_{SXR}^{max} с 16 ТВт до ~ 18 ТВт при сокращении длительности импульса $FWHM$ с 7.5 нс до 6 нс. При этом экспериментально было установлено что, чем больше радиус W-сборки во внутреннем каскаде (или чем выше отношение r_{in}/r_{out}), тем большая линейная масса волоконной сборки во внешнем каскаде требуется для получения максимального значения пиковой мощности P_{SXR}^{max} . Действительно, как было показано в работах [9, 12], как для получения режима устойчивого

сжатия плазмы W-сборки, представляющей собой внутренний каскад вложенного 2-каскадного лайнера, так и для генерации мощного импульса МРИ, необходимо образование замкнутой вокруг внутреннего каскада области ударной волны (УВ), состоящей из вещества пластиковых волокон внешнего каскада. Таким образом, динамика растекания плазменных струй внешнего каскада вдоль силовых линий магнитного поля тока, протекающего по W-сборке, определяет образование

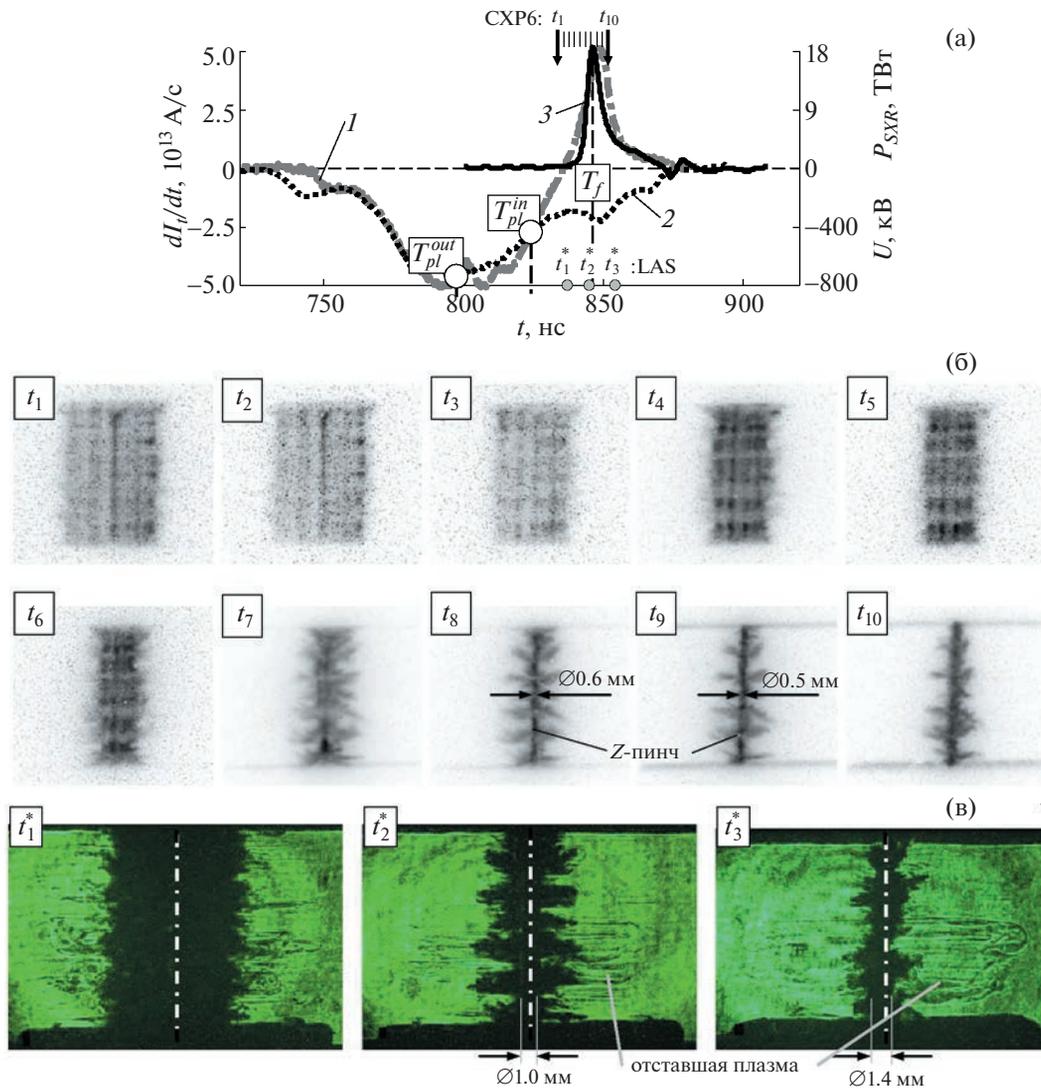


Рис. 6. Результаты эксперимента № 7010 с вложенными сборками: внешний каскад – сборка из 40 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы 16.4 мкг/см. Радиус сборки – 10 мм, высота – 16 мм; внутренний каскад – сборка из 60 вольфрамовых 6 мкм проволок, погонной массы 330 мкг/см. Радиус сборки – 6.5 мм, высота – 16 мм: а) – временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения; 3 – импульса мощности МРИ в спектральном диапазоне ($h\nu > 100 \text{ эВ}$); 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 XCR6). Анод – сверху, 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 – сверху, катод – внизу.

замкнутой плазменной оболочки вокруг внутреннего каскада: чем больше расстояние между струями в момент их растекания, тем меньше вероятность образования замкнутой оболочки вокруг внутреннего каскада. Это означает, что длина окружности l_{SW} с радиусом, равном радиусу образования области УВ r_{SW} , должна быть не меньше суммарной длины дуг струй с каждого волокна

внешнего каскада, растекающихся вдоль силовых линий магнитного поля тока, проходящего по W-сборке во внутреннем каскаде. При этом должно выполняться неравенство $l_{SW} \geq \sum_{i=1}^{N_{out}} l_i \approx N_{out} l$. Иными словами, чем больше радиус r_{in} внутреннего каскада, тем больше волокон необходимо иметь во внешнем каскаде, чтобы образовать за-

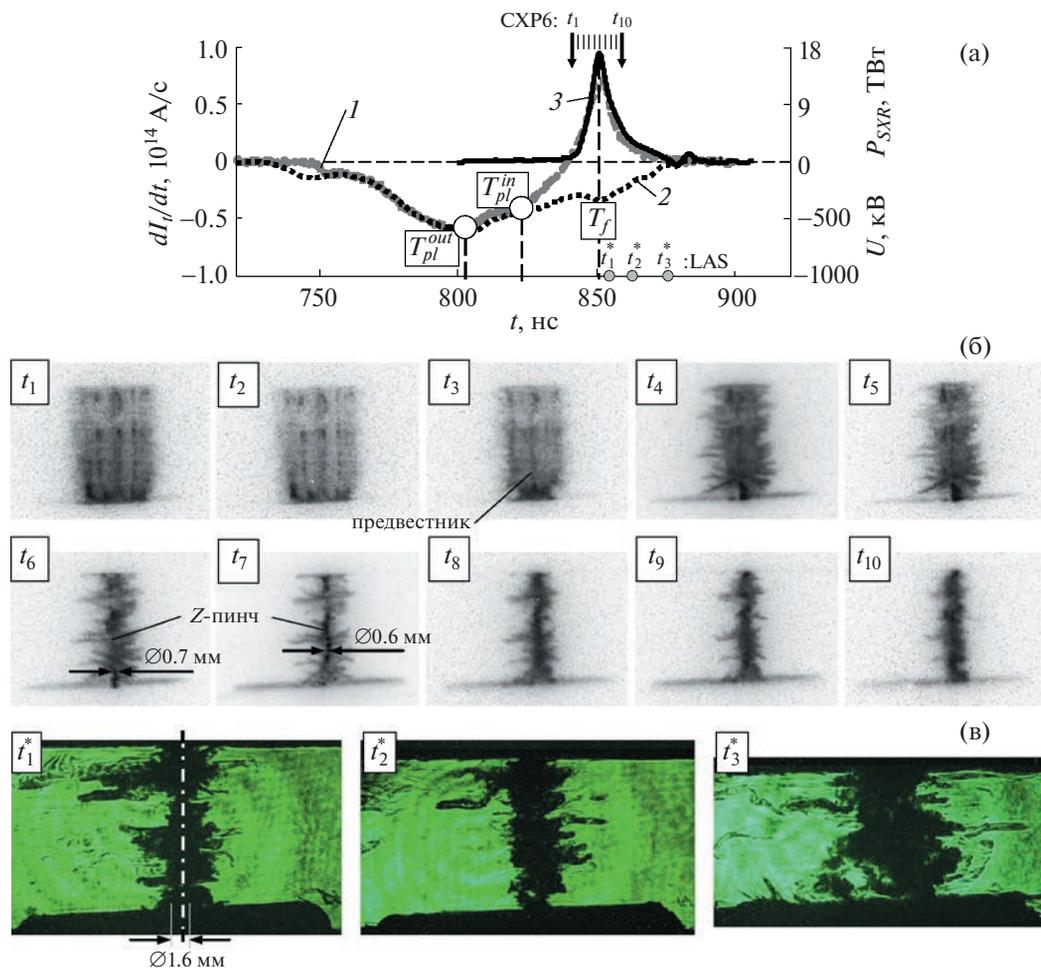


Рис. 7. Результаты эксперимента № 6977 с вложенными сборками: внешний каскад – сборка из 120 полипропиленовых 8.0 мкм волокон, погонной массы ~ 49.2 мкг/см. Радиус сборки – 10 мм, высота – 16 мм; внутренний каскад – сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, погонной массы 220 мкг/см. Радиус сборки – 8 мм, высота – 16 мм: а) – временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения; 3 – импульса мощности МРИ в спектральном диапазоне ($h\nu > 100$ эВ); 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.

мкнутую область УВ вокруг внутреннего каскада. В нашем случае большему числу волокон внешнего каскада соответствует и большая линейная масса.

По-видимому, следующие значения параметров импульса МРИ (ячейки в табл. 2 отмечены серым цветом) являются предельными при уровне разрядного тока 3–3.5 МА: $P_{SXR}^{max} \approx 18$ ТВт, $E_{SXR} \approx 140$ кДж и $FWHM \approx 5$ –6 нс.

3.2. Пространственно-временные характеристики динамики сжатия плазмы одиночных W-борок

Для выяснения эффективности увеличения пиковой мощности МРИ при сжатии плазмы (PP-W) вложенныхборок с различным отношением радиусов каскадов были проведены сравнительные эксперименты с одиночными W-борокми. Параметры одиночных W-борок (количество проволок, линейная масса, радиус сборки и ее высота) были идентичными параметрам внут-

Таблица 2. Оптимальные параметры импульса МРИ

| Отношение радиусов каскадов r_{in}/r_{out} | Линейная масса внешнего каскада m_{out} , мкг/см | Количество проволок N_{out} внутреннего каскада и их линейная масса m_{in} , мкг/см | Параметры импульса МРИ | | |
|--|--|---|------------------------|-----------------|-------------|
| | | | P_{SXR}^{max} , ТВт | E_{SXR} , кДж | $FWHM$, нс |
| 0.8 | 23–50 | 40W, 220 | 14–16 | ~140 | ~7.5 |
| 0.65 | 5–10 | 40W, 220 | ~17 | ~140 | ~6.0 |
| | 10–17 | 60W, 330 | 17.5–18.3 | ~140 | ~5.3 |
| 0.5 | ~10 | 40W, 220 | ~15 | ~120 | ~5.0 |
| | ~10 | 60W, 330 | ~18 | ~140 | ~6.0 |

Примечание: серым цветом выделены ячейки с оптимальными параметрами. Радиус внешнего каскада во всех выстрелах был $r_{out} = 1.0$ см.

ренного каскада вложенных сборок: 40W (60W) 6 мкм проволок линейной массы 220 (330) мкг/см, расположенных на начальном радиусе $r_0 = 5$ мм, 6.5 мм и 8 мм, высота сборок – 16 мм. В этом разделе на рис. 8–10 представлены результаты только тех тестовых выстрелов, в которых наблюдалась наибольшая пиковая мощность МРИ для каждого из вариантов радиуса r_0 одиночной сборки.

Для 40W-сборки с начальным радиусом $r_0 = 5$ мм зарегистрированная пиковая мощность МРИ 5 ТВт, а для 60W-сборки – 7 ТВт, что примерно в 2.5–3 раза ниже (см. рис. 8а и 8б), чем для соответствующих вариантов (PP-W) вложенных сборок (см. рис. 3а и 4а). При этом длительность импульса МРИ оказалась больше $FWHM \approx 8$ –12 нс по сравнению с $FWHM \approx 5$ нс для вложенных сборок.

Отличительной особенностью сжатия плазмы одиночных W-сборок является большой радиальный размер изображения пинча в момент пиковой мощности излучения по сравнению со случаем вложенных сборок и наличие вокруг него излучающей отставшей плазмы (см., например, рентгеновские кадры на рис. 8а). Как следует из приведенных рентгеновских и лазерных теневых изображений радиальный размер пинча (и его диаметр) составляет 0.6–0.7 мм (см. рентгеновские кадры в моменты t_4 и t_5 на рис. 9б) и 0.9 мм (см. лазерный кадр t_2^* на рис. 9в) для варианта проволочной сборки с начальным радиусом $r_0 = 6.5$ мм. Следует заметить, что для этого варианта проволочной сборки наблюдался один из самых высоких выходов МРИ, который достигал 13 ТВт с длительностью $FWHM \approx 8$ нс (см. рис. 9а). При этом в момент стагнации пинча вокруг него также наблюдается излучающая отставшая плазма вольфрамовых проволок. Наличие отставшей плазмы ограничивает в 1.3 раза амплитуду импульса излучения по сравнению со случаем вложенной сборки (см. рис. 5а). В случае больше-

го начального радиуса одиночной сборки $r_0 = 8$ мм амплитуда импульса мощности МРИ падает и становится равной 9 ТВт за счет увеличения длительности импульса $FWHM$ до 12 нс (см. рис. 10а). При этом рентгеновские и лазерные теневые изображения демонстрируют большой размер пинча в момент пиковой мощности МРИ, диаметр составляет около 1.0–1.2 мм (см. рентгеновские кадры t_7 и t_8 на рис. 10б) и около 1.1 мм (см. лазерный кадр t_3^* на рис. 10в). Зарегистрированное значение пиковой мощности излучения в 1.8 раза меньше, чем в выстреле при сжатии плазмы соответствующего варианта (PP-W) вложенных сборок (см. рис. 7а).

Таким образом, любой из вариантов вложенных сборок смешанного состава дает в среднем более высокую пиковую мощность и более короткие импульсы МРИ по сравнению с одиночными W-сборками. Далее проанализируем некоторые спектральные особенности пинча вложенных сборок нашей оригинальной конструкции, реализующиеся в выстрелах, оптимальных по выходу рентгеновского излучения.

3.3. Спектральные особенности Z-пинча вложенных сборок смешанного состава в области длин волн менее 200 Å

В этом разделе представлены результаты спектральных измерений плотности мощности излучения S (в относительных единицах) Z-пинча вложенных сборок смешанного состава, и для сравнения с ними приведены спектры Z-пинча одиночных вольфрамовых сборок, полученные вблизи момента времени достижения пиковой мощности МРИ.

В условиях экспериментов на установке Ангара-5-1 используются одиночные W-сборки диаметров от 10 мм до 20 мм. Для выбора оптимального диаметра W-сборки для использования ее в качестве внутреннего каскада во вложенных сборках смешанного состава была проведена се-

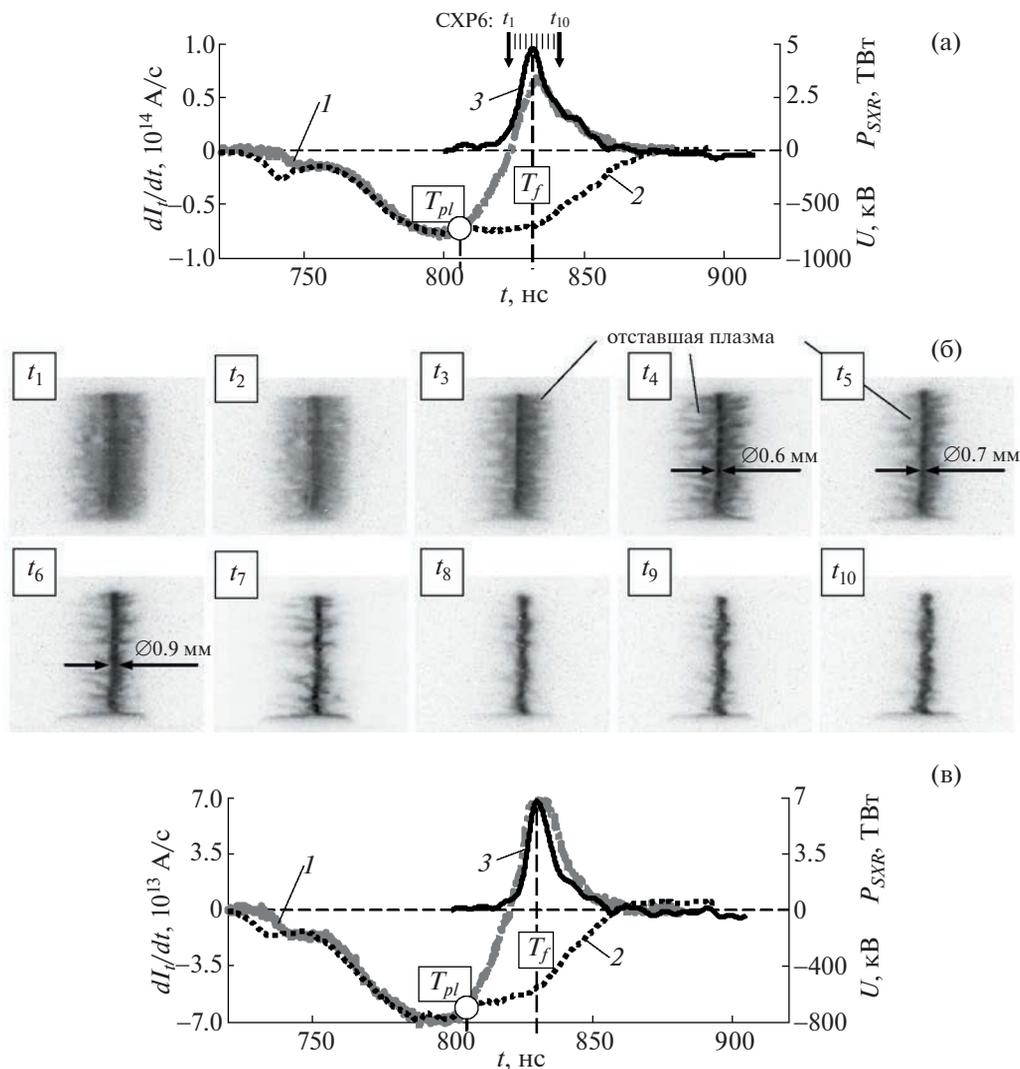


Рис. 8. Результаты экспериментов с одиночной W-сборкой радиусом 5 мм и высотой 16 мм, состоящей: а) – из 40 W 6 мкм проволоки, линейной массы 220 мкг/см (выстрел № 7077), внизу – рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии проволоочной сборки, времена регистрации кадров t_1 – t_{10} указаны вертикальными стрелками (\downarrow CXP6). Анод – вверху, катод – внизу; б) – из 60 W 6 мкм проволоки, линейной массы 330 мкг/см (выстрел № 7052). Временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения; 3 – импульса мощности МРИ в спектральном диапазоне ($h\nu > 100$ эВ); T_{pl} – время окончания плазмообразования; T_f – время финального сжатия плазмы.

рия экспериментов с одиночными сборками различных диаметров 10 мм, 12 мм, 13 мм, 16 мм и 20 мм, состоящих из вольфрамовыхборок (W-борок) с 40-ка проволоками диаметром 6 мкм, линейной массы 220 мкг/см. На рис. 11 приведены спектры излучения для одиночных W-борок указанных диаметров, полученные при помощи ВУФ-спектрографа (GIS-3d) скользящего падения. Из данного рисунка следует, что предпочтительной для получения высокой плотности мощности излучения S является W-борка с диаметром 13 мм. Немонотонность зависимости величины S от диаметра сборки может быть следствием конкурентного действия нескольких фи-

зических процессов, присущих сжатию одиночных проволоочныхборок. С одной стороны, увеличение диаметра сборки должно приводить к увеличению доли кинетической энергии сжатия плазмы в энергию излучения пинча. С другой стороны, большее время имплозии приводит к существенному развитию амплитуды магнитной релей-тейлоровской неустойчивости сжимающейся плазмы и, как следствие этого процесса, к образованию большего количества отставшей токовой плазмы, частично шунтирующей разрядный ток пинча. Тем самым уменьшается энерговыход из электрической цепи в плазму Z-пинча.

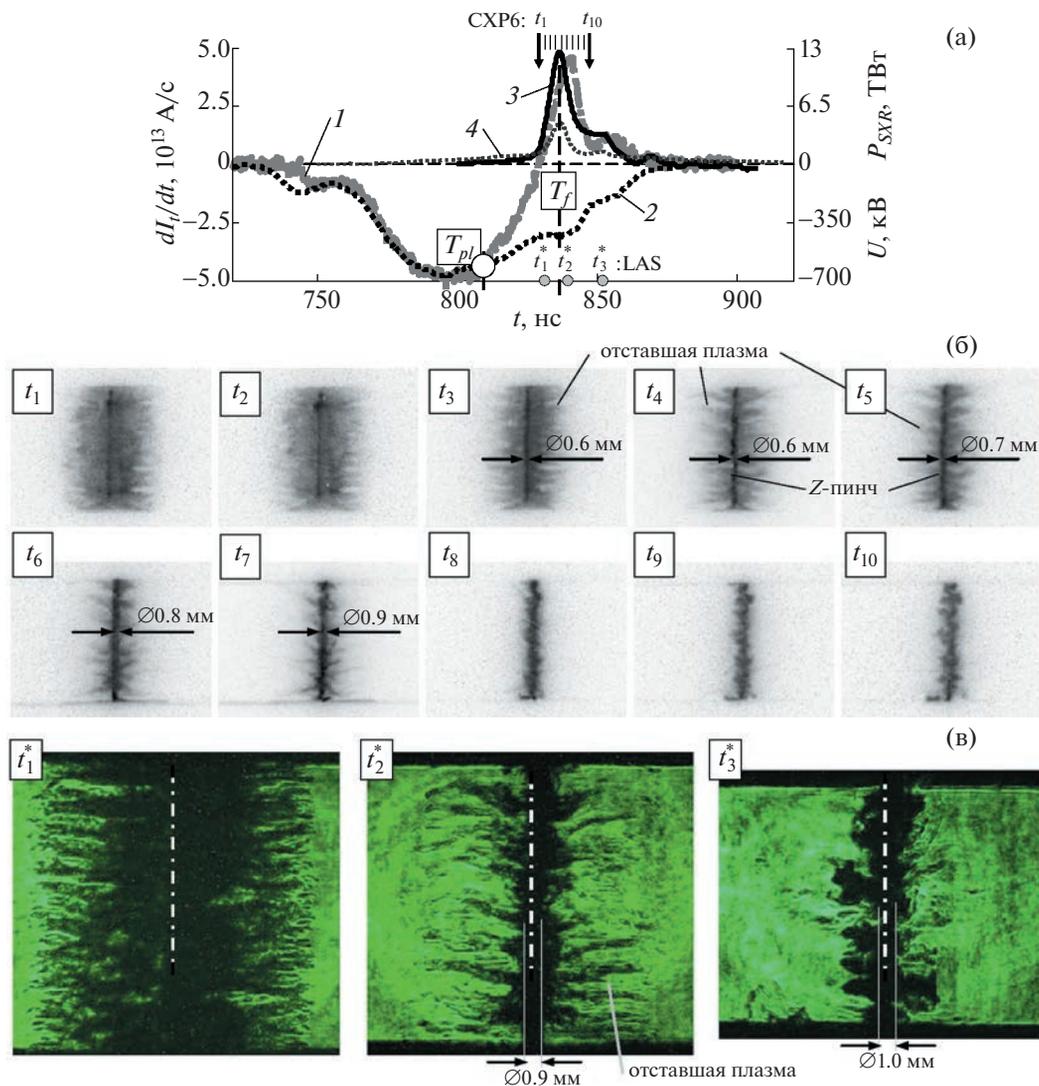


Рис. 9. Результаты эксперимента № 6990 с одиночной сборкой из 40 W 6 мкм проволоки, линейной массы 220 мкг/см. Радиус сборки – 6.5 мм, высота – 16 мм: а) – временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения; 3, 4 – импульса мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100$ эВ) в абс. ед. и ($h\nu > 20$ эВ) в отн. ед.; T_{pl} – время окончания плазмообразования; T_f – время финального сжатия плазмы; б) – рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии проволочной 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 проволочной сборки, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров t_1^* – t_3^* указаны вертикальными стрелками (● LAS) на рис. (а). Анод – вверху, катод – внизу.

Поэтому в наших экспериментах с двухкаскадными (PP-W) вложенными сборками смешанного состава в качестве внутреннего каскада были использованы W-сборки следующих диаметров – 10 мм, 13 мм и 16 мм. Внешний каскад которых был волоконной сборкой различной линейной массы m_{out} и диаметром 20 мм. В продолжение работы [13] исследовалось влияние диаметра внутренней W-сборки на спектральную плотность мощности излучения пинча при разной линей-

ной массе m_{out} внешней полипропиленовой волоконной сборки. При этом отношение радиусов внешней и внутренней сборок r_{in}/r_{out} должно лежать в диапазоне от 0.5 до 0.8 для реализации движения плазмы между сборками с образованием области ударной волны (УВ) [21], способствующей стабилизации МРТ неустойчивости [9, 12].

Результаты спектральных измерений представлены на рис. 12а–в. На представленных спектрах наблюдается общая тенденция, а именно:

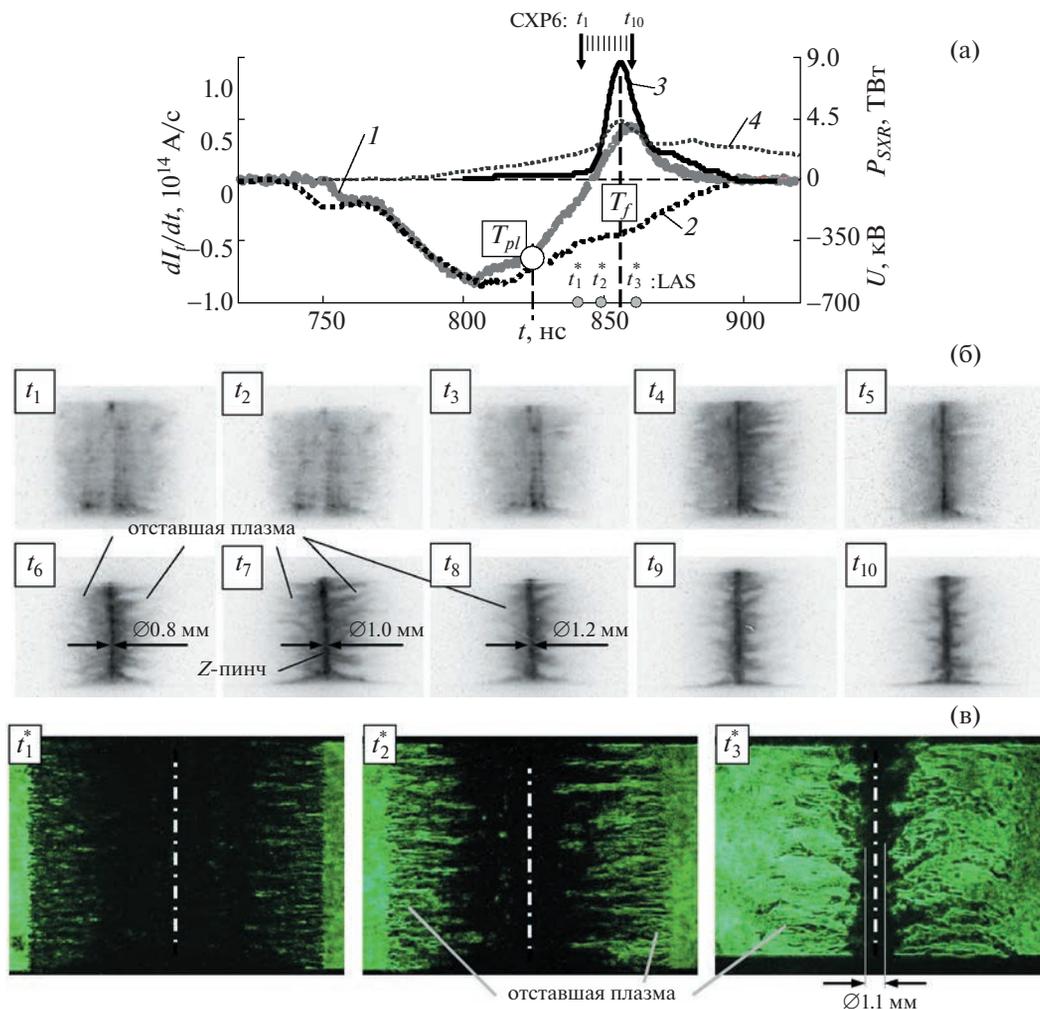


Рис. 10. Результаты эксперимента № 6933 с одиночной сборкой из 40 W 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см. Радиус сборки – 8 мм, высота – 16 мм: а) – временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения; 3, 4 – импульса мощности МРИ в разных спектральных диапазонах соответственно ($h\nu > 100 \text{ эВ}$) 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 проволочной 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 проволочной 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 – вверху, катод – внизу.

рост спектральной плотности мощности излучения Z-пинча S при увеличении линейной массы m_{out} внешней полипропиленовой сборки до некоторой величины, и ее падение при больших значениях m_{out} . Существует оптимум величины линейной массы m_{out} внешней волоконной сборки, при котором регистрируется наибольшее значение спектральной плотности мощности излучения S в области длин волн $\lambda < 200 \text{ \AA}$. По совокупности выстрелов для вложенныхборок с отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5$ оптимальное значение линейной массы внешнего кас-

када составляет $m_{out} \approx 5$ – 10 мкг/см (см. рис. 12а), для случая $r_{in}/r_{out} = 0.65$ – $m_{out} \approx 10 \text{ мкг/см}$ (см. рис. 12б), для $r_{in}/r_{out} = 0.8$ – $m_{out} \approx 50 \text{ мкг/см}$ (см. рис. 12в). Также следует отметить, что существенный прирост величины S при оптимальных значениях параметра m_{out} зафиксирован в коротковолновой области спектра $\lambda < 40 \text{ \AA}$ по сравнению со случаем одиночной W-сборки. Данный экспериментальный факт может свидетельствовать о более высокой температуре плазмы Z-пинча вложенныхборок по сравнению со случаем одиночныхборок с идентичными параметрами. В сле-

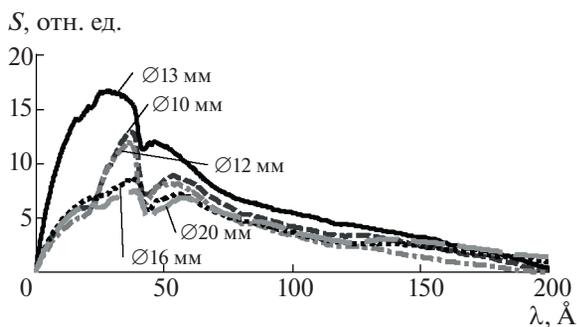


Рис. 11. Спектральная плотность мощности излучения S (в отн. ед.) Z-пинча одиночных W-сборок различных диаметров, состоящих из 40 W 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см, высотой – 16 мм.

дующей серии экспериментов предполагается провести абсолютные измерения температуры плазмы пинча.

Спектральные измерения показали, что в оптимальных режимах сжатия плазмы (PP-W) вложенныхборок наблюдается увеличение доли энергии рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $\lambda < 40 \text{ \AA}$ на (30–100)% по сравнению с одиночными W-борками со схожими параметрами. При этом авторы отмечают то, что является важным проведение абсолютных измерений мощности и излучения в указанном диапазоне спектра источника излучения. Такие измерения мы планируем провести в ближайшее время.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Сравнение параметров импульса МРИ для (PP-W) вложенных и одиночных W-борок

Выполнен анализ совокупности экспериментальных данных о параметрах импульса мощности МРИ (пиковой мощности P_{SXR} , энергии E_{SXR} и ширины импульса на половине его высоты $FWHM$ в диапазоне энергии квантов $h\nu > 100 \text{ эВ}$) по 24 выстрелам для одиночных W-борок, 43 выстрелам для (PP-W) вложенныхборок. Выборка совокупности выстрелов для анализа сделана согласно следующим критериям отбора: максимум разрядного тока через лайнер лежит в диапазоне $I_{\max} \in [3.0, 3.5] \text{ МА}$, среднеквадратичный разброс срабатывания модулей установки $\sigma \in [4, 10] \text{ нс}$. Подобные зависимости параметров импульса МРИ от линейной массы волокон внешнего каскада анализировались в наших предыдущих работах (см. рис. 13а,б) [12, 13] для вложенныхборок с отношением радиусов $r_{in}/r_{out} = 0.5$ в экспериментах с меньшим уровнем разрядного тока установки ($I < 3 \text{ МА}$), чем в этой серии выстрелов (3–3.5 МА).

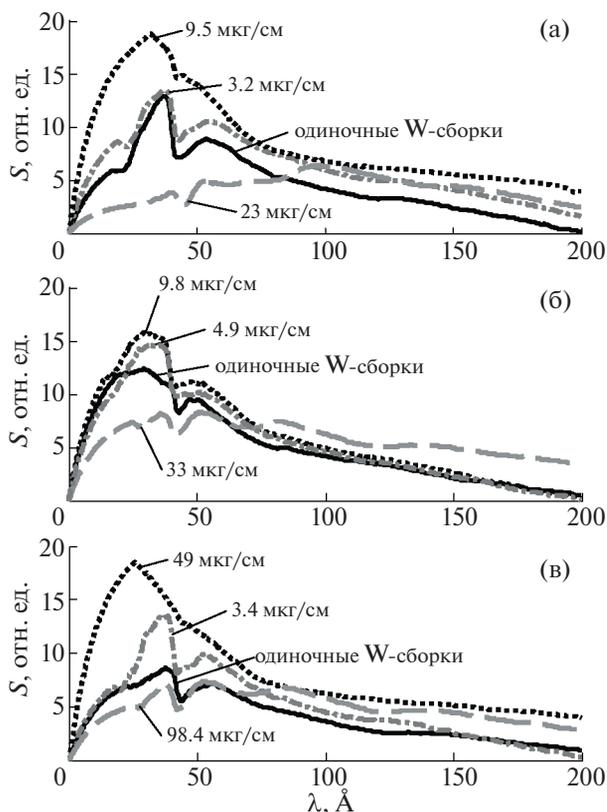


Рис. 12. Сравнение спектральной плотности мощности излучения S (в отн. ед.) Z-пинча (PP-W) вложенныхборок с различным отношением радиусов каскадов r_{in}/r_{out} , линейной массы внешнего каскада m_{out} (в мкг/см) и одиночных W-борок, идентичных внутреннему каскаду вложенныхборок: а) – для $r_{in}/r_{out} = 0.5$; б) – для $r_{in}/r_{out} = 0.65$; в) – для $r_{in}/r_{out} = 0.8$.

На рис. 14 и 15 представлены зависимости параметров импульса мощности МРИ от линейной массы внешнего каскада m_{out} для вложенныхборок смешанного состава (PP-W) с различным отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5, 0.65$ и 0.8 . В некоторых случаях на графиках представлены данные, когда во внутреннем каскаде была проволочная сборка из 40 и 60 вольфрамовых проволок линейной массы 220 и 330 мкг/см соответственно.

Как следует из рис. 13а и 14а,б максимум пиковой мощности МРИ P_{SXR} наблюдается в области значений параметра $m_{out} \in (5, 10) \text{ мкг/см}$ для (PP-W)-борок с отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5$ и 0.65 . Для вложенныхборок с отношением $r_{in}/r_{out} = 0.8$ максимум пиковой мощности МРИ выражен менее ярко и лежит в широкой области $m_{out} \in (23, 50) \text{ мкг/см}$ (см. рис. 14в). При этом следует заметить, что значение пиковой мощности МРИ слабо зависит от массы m_{in} вольфрамовых проволок во внутреннем каскаде вло-

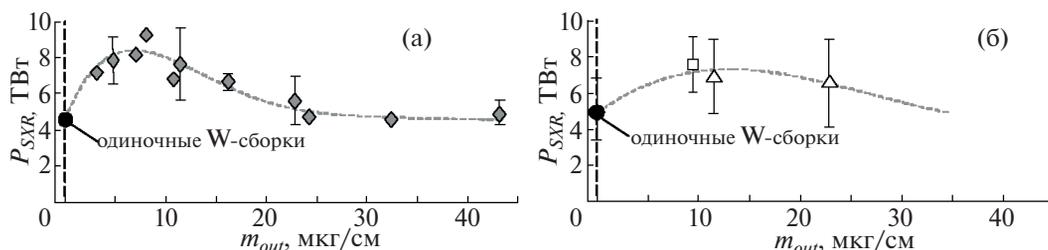


Рис. 13. Зависимость пиковой мощности МРИ (P_{SXR} , $h\nu > 100$ эВ) от массы m_{out} PP-волокон внешней сборки для вложенных сборок смешанного состава (PP-W) с $r_{out} = 1.0$ см, $r_{in} = 0.5$ см (по данным работы [13]): а) – для $N_{in} = 40$ W-проволок линейной массы 220 мкг/см (\blacklozenge); б) – для $N_{in} = 60$ (\square) и $N_{in} = 80$ (\triangle) W-проволок линейной массы 330 мкг/см, соответственно. Точками (\bullet) представлены данные для одиночных W-сборок.

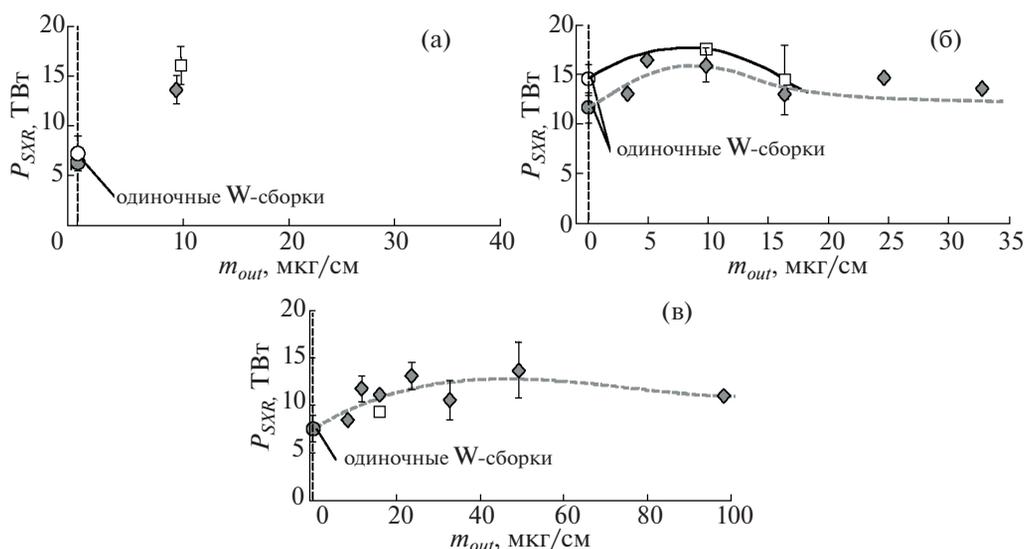


Рис. 14. Зависимость пиковой мощности МРИ (P_{SXR} , $h\nu > 100$ эВ) от массы m_{out} PP-волокон внешней сборки ($r_{out} = 1.0$ см) для вложенных сборок смешанного состава (PP-W) с различным радиусом r_{in} внутреннего каскада: а) – $r_{in} = 0.5$ см; б) – $r_{in} = 0.65$ см; в) – $r_{in} = 0.8$ см. \blacklozenge – для $N_{in} = 40$ W-проволок линейной массы 220 мкг/см; \square – для $N_{in} = 60$ W-проволок линейной массы 330 мкг/см. Точками (\bullet , \circ) представлены данные для одиночных 40W- и 60W-сборок, соответственно.

женных сборок. Увеличение массы W-сборки в 1.5 раза с 220 до 330 мкг/см не приводит к существенному повышению пикового значения P_{SXR} (не более чем на 15–20%). С другой стороны, по сравнению с одиночными W-сборками с идентичными параметрами как у проволочных сборок во внутреннем каскаде (PP-W) вложенных сборок, наблюдается существенное повышение пиковой мощности МРИ. В случае (PP-W) вложенных сборок с отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.65$ пиковая мощность в среднем оказывается выше в 1.2–1.3 раза (см. рис. 14б), а в случае с $r_{in}/r_{out} = 0.8$ – в 1.7–1.9 раза (см. рис. 14в). Также следует отметить, что в этой серии экспе-

риментов (PP-W) вложенные сборки с отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5$ дают наибольший прирост в пиковой мощности излучения – в 2.2–2.5 раза (см. рис. 14а) по сравнению с одиночными W-сборками.

Из экспериментальных данных следует, что повышение амплитуды импульса МРИ (при $h\nu > 100$ эВ) связано в основном с сокращением его длительности. При этом энергия рентгеновского излучения E_{SXR} (см. рис. 15а,в,д) слабо зависит как от линейной массы m_{out} волоконной PP-сборки во внешнем каскаде, так и от линейной массы m_{in} W-сборки во внутреннем каскаде, по крайней

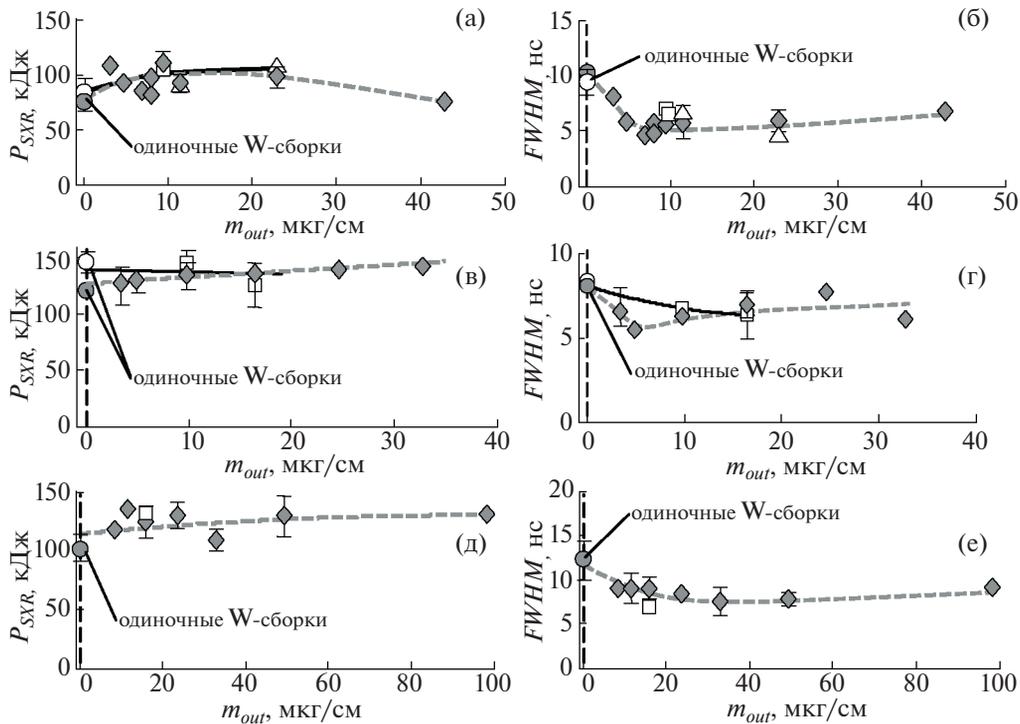


Рис. 15. Зависимость параметров импульса мощности МРИ (E_{SXR} , $h\nu > 100$ эВ – энергии и $FWHM$ – ширины импульса на его полувысоте) от массы m_{out} PP-волокон внешней сборки ($r_{out} = 1.0$ см) для вложенных сборок смешанного состава (PP-W) с различным радиусом r_{in} внутреннего каскада: а), б) – $r_{in} = 0.5$ см (по данным работы [13]); в), г) – $r_{in} = 0.65$ см; д), е) – $r_{in} = 0.8$ см. \blacklozenge – для $N_{in} = 40$ W-проволок линейной массы 220 мкг/см; \square – для $N_{in} = 60$ W-проволок линейной массы 330 мкг/см; \triangle – для $N_{in} = 80$ W-проволок линейной массы 330 мкг/см. Точками (\bullet , \circ) представлены данные для одиночных 40W- и 60W-сборок соответственно.

мере, в диапазоне значений линейной массы m_{in} 220–330 мкг/см. Также следует заметить, что вблизи оптимальных значений линейной массы внешнего каскада растет мощность рентгеновского излучения P , измеренная ВРД в спектральном диапазоне $h\nu > 600$ эВ (см. рис. 16), во всех случаях (PP-W) вложенных сборок с различным отношением радиусов каскадов r_{in}/r_{out} . Это может соответствовать росту температуры плазмы пинча по сравнению со случаем одиночной W-сборки. С другой стороны, зависимость мощности МРИ в интервале энергии квантов $h\nu \in (20, 80)$ эВ слабо зависит от параметра m_{out} . Это хорошо соответствует спектральным измерениям, представленным в подразделе 3.3 настоящей работы.

Оптимуму пиковой мощности МРИ соответствует минимальная длительность импульса излучения на половине его высоты: $FWHM = (4.5–6.5)$ нс для случая $r_{in}/r_{out} = 0.5$ (см. рис. 15б), $FWHM = (5.5–7)$ нс для случая $r_{in}/r_{out} = 0.65$ (см. рис. 15г) и $FWHM = (6.5–9)$ нс для случая $r_{in}/r_{out} = 0.8$ (см. рис. 15е).

4.2. Оценка вложенной электромагнитной энергии цепи в сжимающуюся плазму многопроволочных сборок по данным электротехнических измерений тока и напряжения

Для выстрелов по сжатию (PP-W) вложенных сборок с оптимальной и не оптимальной линейной массой пластиковых волокон внешнего каскада сделана оценка вложенной электромагнитной энергии в плазму сборок по данным электротехнических измерений тока и напряжения (см. кривые 1 и 2 на рис. 3–7). Измерив временные зависимости производной полного тока dI/dt (или тока $I(t)$), напряжения $U(t)$ вблизи лайнера и, можно вычислить индуктивность $L(t)$ по выражению (1) в пренебрежении омическим сопротивлением плазмы [20]

$$L(t) = \frac{\int_{t_0}^t U(\tau) d\tau + C}{I(t)}, \quad (1)$$

и найти полную электромагнитную энергию $W_{tot}(t)$, закачиваемую в концентратор установки, т.е. в электрическую цепь динамической нагруз-

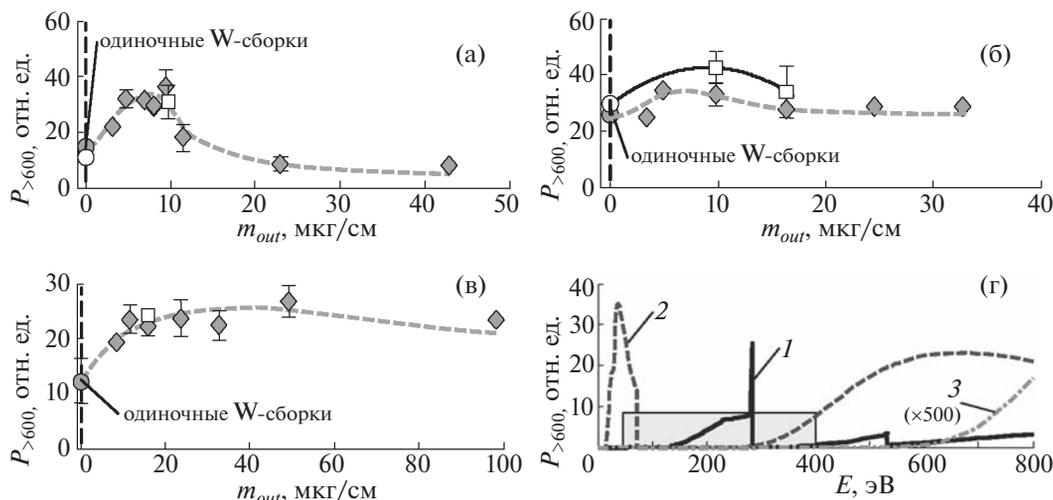


Рис. 16. Зависимость пиковой мощности рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $h\nu > 600$ эВ от массы m_{out} PP-волокон внешней сборки ($r_{out} = 1.0$ см) для вложенных сборок смешанного состава (PP-W) с различным радиусом r_{in} внутреннего каскада: а) – $r_{in} = 0.5$ см (по данным работы [13]); б) – $r_{in} = 0.65$ см; в) – $r_{in} = 0.8$ см. \blacklozenge – для $N_{in} = 40$ W-проволок линейной массы 220 мкг/см; \square – для $N_{in} = 60$ W-проволок линейной массы 330 мкг/см. Точками (\bullet , \circ) представлены данные для одиночных 40W- и 60W-сборок, соответственно; г) – спектральная зависимость чувствительности ВРД за различными фильтрами от энергии фотонов излучения: 1 – датчик s2e (углеродный катод за 316 мкг/см² лавсана); 2 – датчик s3e (молибденовый катод на этом рисунке выделен наиболее представительный спектральный диапазон по излучаемой энергии при сжатии Z-пинчей вольфрамовых проволочныхборок на установке Ангара-5-1).

ки (сжимающейся плазмы лайнера). В данном случае под электрической цепью подразумевается разрядный контур, заключенный между местом объединения токов 8-ми модулей установки Ангара-5-1 (область сепаратрисы) и местом расположения лайнера.

Полная электромагнитная энергия $W_{tot}(t)$, закачанная внутрь сепаратрисы к моменту времени t , состоит из энергии магнитного поля $W_m(t) = 1/2 L(t) I^2(t)$ и энергии, вложенной в плазму, $W_{pl}(t) = W_k(t) + W_{in}(t)$, состоящей из кинетической энергии движения плазмы $W_k(t) = 1/2 m V_r^2$ и ее внутренней энергии $W_{in}(t)$. Таким образом, величина $W_{tot}(t)$ рассчитывается:

$$W_{tot}(t) = \int_0^t I(\tau) U(\tau) d\tau = W_m(t) + W_{pl}(t). \quad (2)$$

Энергия магнитного поля $W_m(t)$ запасается в контуре электрической цепи между сепаратрисой (место объединения токов отдельных модулей установки Ангара-5-1) и лайнером в концентраторе установки. Дифференцируя уравнение (2)

получаем соответствующее уравнение для мощностей

$$P(t) = I(t)U(t) = L(t)I(t) \frac{dI}{dt} + \frac{I^2(t) dL}{2 dt} + P_{pl}(t) \equiv P_m(t) + P_{pl}(t), \quad (3)$$

где P – мощность, входящая внутрь сепаратрисы в момент времени t .

На рис. 17 и 18 представлены результаты расчета по выражениям (2) и (3) величин мощностей и энергий (см. кривые 1–3 и 5–7, соответственно). Как следует из этих рисунков, общий характер временных зависимостей мощностей и энергий следующий:

– на стадии плазмообразования веществ (пластик и вольфрам) из которых изготовлены внешний и внутренний каскады вложенныхборок вся мощность и энергия, поставляемая генератором в концентратор установки, тратится в основном на создание магнитного потока в контуре между внешней поверхностью лайнера и областью сепаратрисы, т.е. при временах $t \leq T_n$ – величины $P(t) \approx P_m(t)$ и $W_{tot}(t) \approx W_m(t)$;

– после окончания плазмообразования ($t > T_n$) начинается финальное сжатие плазмы вложен-

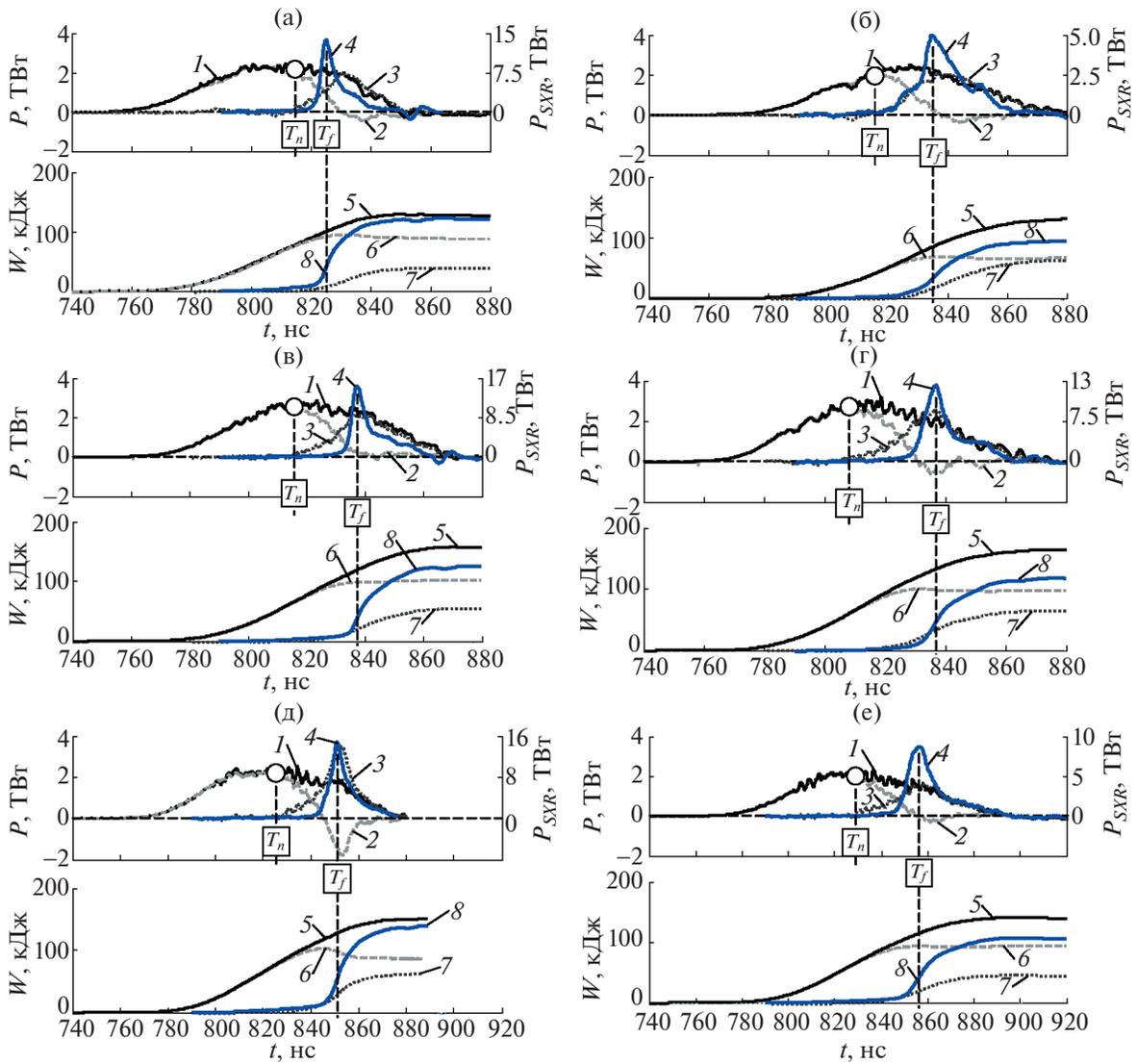


Рис. 17. Энергобаланс при сжатии (PP-W) вложенных (а, в, д) и одиночных W-сборок (б, г, е) по данным электротехнических измерений тока и напряжения. Временные зависимости: полной электромагнитной мощности P_{tot} (кривая 1), мощности, затраченной на создание магнитного поля P_m (кривая 2), мощности, вкладываемой в плазму P_{pl} (кривая 3), мощности МРИ P_{SXR} ($h\nu > 100$ эВ, кривая 4); энергии W_{tot} , W_m , W_{pl} и W_{SXR} (кривые 5–8), полученные путем численного интегрирования соответствующих кривых 1–4. T_f – время финального сжатия плазмы (пиковой мощности МРИ).

ных сборок. Энергия $W_{pl}(t)$, вкладываемая в плазму, начинает расти, в то время как энергия магнитного поля $W_m(t)$, накопленная в цепи нагрузки, уменьшается. Полная энергия $W_{tot}(t)$, закачиваемая в электрическую цепь, еще продолжает расти (см. кривые 5–7 на рис. 17 и 18). При этом наблюдается рост мощности $P_{pl}(t)$ (см. кривую 3), что соответствует расходу запасенной электромагнитной энергии цепи на нагрев и ускорение сжимающейся плазмы вложенных сборок. На этой стадии имплозии величина $P_m(t)$ может принимать отрицательные значения. Как

следует из уравнения (3), величина мощности $P_m(t)$ определяется следующим выражением:

$$P_m(t) = L(t)I(t)\frac{dI}{dt} + \frac{I^2(t)dL}{2 dt}. \quad (4)$$

На этой стадии имплозии производная полного тока (см. напр. кривые 1 на рис. 3–7) меняет свой знак. При этом первое слагаемое в правой части уравнения (4), соответственно, также меняет свой знак и мощность $P_m(t)$ начинает уменьшаться. В некоторый момент времени оба слагаемых в формуле (4) могут скомпенсировать друг

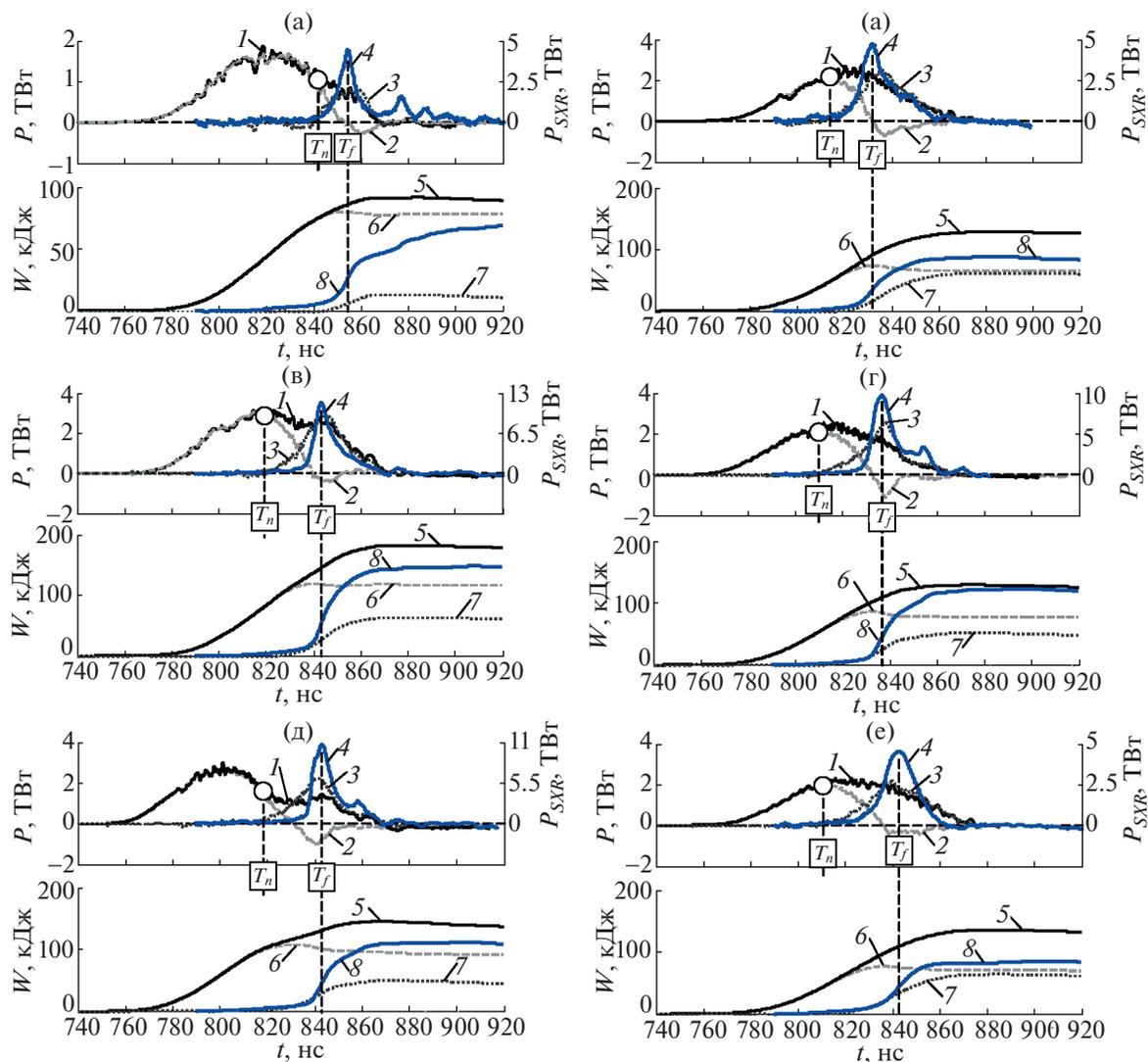


Рис. 18. Энергобаланс при сжатии (PP-W) вложенных (а, в, д) и одиночных W-сборок (б, г, е) по данным электротехнических измерений тока и напряжения. Временные зависимости: полной электромагнитной мощности P (кривая 1), мощности, затраченной на создание магнитного поля P_m (кривая 2), мощности, вкладываемой в плазму P_{pl} (кривая 3), мощности МРИ P_{SXR} ($h\nu > 100$ эВ, кривая 4); энергии W_{tot} , W_m , W_{pl} и W_{SXR} (кривые 5–8), полученные путем численного интегрирования соответствующих кривых 1–4. T_f – время финального сжатия плазмы (пиковой мощности МРИ).

друга, а электрическая мощность генератора перестанет вкладываться в магнитное поле, т.е. $P_m = 0$. В последующие моменты времени величина $P_m(t)$ становится отрицательной. В этом случае, чем быстрее будет происходить переполюсовка кривой dI/dt , тем больше энергии, накопленной в магнитном поле, успеет продиссипировать в плазму пинча. Основным каналом сброса энергии плазмы многозарядных ионов вольфрама при сжатии плазмы пинча многопровольочных сборок является генерация мощного тормозного рентгеновского излучения в спектральном диапазоне от нескольких десятков эВ до нескольких сотен эВ.

Действительно, сравнение кривых 5 и 8 на рис. 17 показывает, что в выстрелах с высокой пиковой мощностью рентгеновского излучения 15–17 ТВт почти вся (до 80–90%) электромагнитная энергия, закачанная в контур лайнера, преобразуется в энергию МРИ. При этом следует заметить, что в контрольных выстрелах с одиночными W-сборками наблюдался только 70–75% вклад электромагнитной энергии в излучение плазмы пинча. С другой стороны, в выстрелах с вложенными сборками с неоптимальной массой внешнего каскада, в которых пиковая мощность была не высокой (5–10 ТВт), зарегистрировано, что

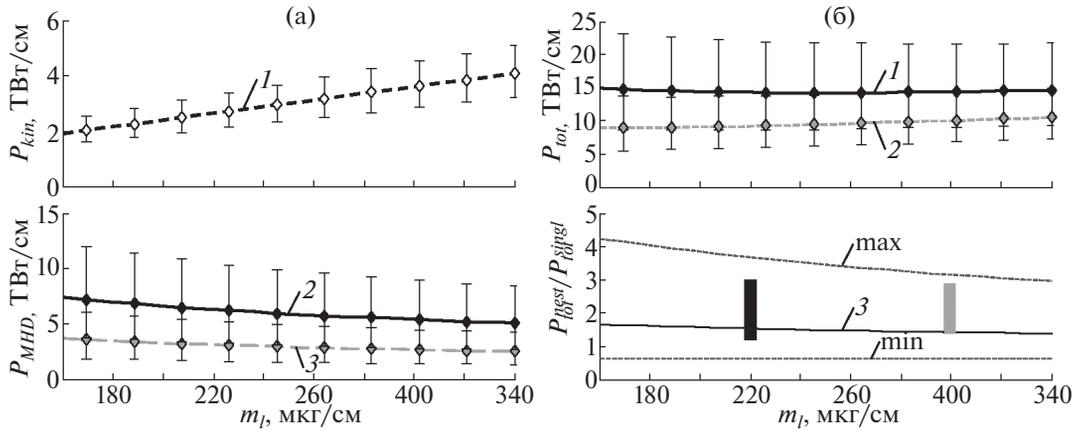


Рис. 19. Расчетные зависимости от линейной массы m_l W-сборки мощности МРИ: а) – P_{kin} (в ТВт/см) за счет преобразования кинетической энергии плазмы (кривая 1), P_{MHD} (в ТВт/см) за счет преобразования электромагнитной энергии (кривые 2 и 3) для вложенных и одиночных сборок соответственно; б) – полной мощности $P = (P_{kin} + P_{MHD}) \cdot h$ (в ТВт) для вложенных (P_{nest} , кривая 1) и одиночных (P_{singl} , кривая 2) сборок с учетом их высоты $h = 1.6$ мм; ниже представлен диапазон (min, max) возможных значений отношения P_{nest}/P_{singl} (кривая 3); прямоугольниками (■, □) для сравнения представлены экспериментальные данные.

энергия МРИ составляет не более 60–80% от полной электромагнитной энергии (см. рис. 18).

Таким образом, в выстрелах с вложенными сборками смешанного состава с различным отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.5–0.8$ продемонстрировано, что путем оптимизации линейной массы внешнего каскада (волоконной сборки) можно достигнуть ~90% преобразования электромагнитной энергии, закачанной в концентратор установки, в энергию рентгеновского излучения пинча.

4.3. Вклад кинетической энергии сжатия плазмы в энергию излучения Z-пинча вложенныхборок смешанного состава

Формирование пинча и его нагрев связаны с диссипацией кинетической энергии встречных плазменных потоков, движущихся под действием силы Ампера из области взорванных проволок W-сборки внутреннего каскада в случае (PP-W) вложенныхборок, либо одиночной W-сборки. При этом компактность сжатия плазмы как двухкаскадного лайнера, так и одиночной сборки является необходимым условием эффективного использования его кинетической энергии. Сделаем оценку мощности рентгеновского излучения P_{kin} (в ТВт/см) за счет преобразования кинетической энергии плазмы проволочной сборки, сжимающейся со скоростью V_r (в см/с), толщиной Δ_r во внутреннюю энергию Z-пинча в предположении ее дальнейшей трансформации в энергию рентгеновского излучения, следующим образом:

$$P_{kin} = 5 \times 10^{-26} m V_r^3 / D_r, \quad (5)$$

где Δ_r – в см, m (в мкг/см) – линейная масса плазмы. Толщина плазменного слоя была выбрана равной толщине скин-слоя δ_{skin} плазмы с температурой $T_e = 35$ эВ при характерных временах процесса финального сжатия W-сборки ~25–30 нс. При достигнутой в эксперименте скорости V_r сжатия плазмы внутреннего каскада (W-сборки) около $(3–3.5) \times 10^7$ см/с и толщине плазменного слоя $\Delta_r \sim \delta_{skin} = 0.15$ см получим оценку мощности P_{kin} примерно 2.1–3.3 ТВт/см для W-сборки линейной массы $m_l = 220$ мкг/см и 3.1–5.0 ТВт/см для $m_l = 330$ мкг/см (см. кривую 1 на рис. 19а). При учете высоты проволочной сборки $h = 1.6$ см соответствующие значения мощности излучения составят 3.4–5.3 ТВт и 5–8 ТВт при длительности процесса $\delta t \approx \Delta_r / V_r \approx 4–5$ нс. Отсюда следует, что неодновременность прихода на ось отдельных плазменных фрагментов проволочной сборки вследствие, например зиппер-эффекта, не должна быть более этой длительности. В случае одиночных проволочныхборок неустойчивости плазмы, возникающие на стадии инициации разряда через проволоки, ухудшают компактность сжатия плазмы в приосевую область. Однако, применение двухкаскадной схемы лайнера с внешним каскадом из пластиковых волокон позволяет существенно уменьшить развитие МГД-неустойчивостей плазмы проволочной сборки во внутреннем каскаде и, тем самым, уменьшить несинхронность сжатия плазмы на финальной стадии имплозии до 2 нс и менее [12].

Полученная оценка мощности МРИ за счет диссипации кинетической энергии плазменных потоков, сходящихся на оси, во внутреннюю

энергию пинча не объясняет зарегистрированные в эксперименте параметры импульса МРИ. При этом энергия излучения в несколько раз превышает кинетическую энергию. Это характерно для всех экспериментов по имплозии многопроволочных сборок, где был достигнут высокий (~ 1) коэффициент преобразования кинетической энергии сжатия плазмы в энергию МРИ [22, 23]. Поэтому сделаем оценку мощности рентгеновского излучения P_{MHD} (в ТВт/см) за счет преобразования электромагнитной энергии во внутреннюю энергию Z-пинча на стадии его стагнации. В работах [24–26] была предложена теоретическая модель, в соответствии с которой электромагнитная энергия разрядной цепи может диссипировать во внутреннюю энергию Z-пинча путем МГД турбулентного перемешивания плазмы и магнитного потока. Магнитный поток, накопленный в контуре разрядной цепи вблизи Z-пинча, проникает внутрь пинча в виде тороидальных магнитных пузырей, зарождающихся на его поверхности и проникающих к оси пинча со скоростью близкой к альфвеновской скорости. Происходит конвективное перемешивание ионной компоненты плазмы с магнитным полем, нагрев плазмы при передаче энергии от ионов к электронам и излучение нагретой плазмы. Для плотной плазмы пинча время передачи энергии от ионной компоненты к электронам мало по сравнению со временем джоулева нагрева электронов. При этом излучение практически всегда играет определяющую роль в энергетическом балансе при сжатии пинча. Согласно данной модели мощность такого МГД турбулентного нагрева объема пинча оценивается как

$$P_{MHD} = \frac{B_0^2}{8\pi} 2\pi r V_A \approx 2 \times 10^{-22} \chi \frac{I^3}{r_{pinch}^2 \sqrt{4\pi\rho}}, \quad (6)$$

где P_{MHD} (в ТВт/см), I – ток (в А), протекающий через Z-пинч радиусом r_{pinch} (в см) и плотностью ρ (в г/см³), безразмерный параметр χ – численный множитель порядка единицы, значение которого фактически можно определить только из эксперимента. В теоретических работах [25, 26] он вычислялся в предположении, что некоторая часть сжимаемой плазмы пинча заполнена тороидальными магнитными пузырями, проникающими с поверхности пинча на его ось.

При достигнутых в наших экспериментах типичных значениях разрядного тока $I = (3–3.5)$ МА, радиуса пинча $r_{pinch} = (0.25–0.3)$ мм (для случая вложенныхборок) и $r_{pinch} = (0.5–0.6)$ мм (для случая одиночных W-борок), и учитывая, что $\rho = m_l/(pr_{pinch}^2)$, получим оценку мощности P_{MHD} для вложенныхборок около $(3.3–10.5)$ ТВт/см (для случая $m_l = 220$ мкг/см) и $(2.7–8.6)$ ТВт/см (для случая $m_l = 330$ мкг/см).

При высоте проволок в сборке $h = 1.6$ см, соответствующие значения мощности излучения составят $(5.3–16.8)$ ТВт и $(4.3–13.8)$ ТВт (см. кривую 2 на рис. 19а). Там же для сравнения представлена кривая 3 для случая одиночных W-борок с теми же параметрами, что и у внутреннего каскада (PP-W) вложенныхборок. Видно, что за счет почти 2-х кратной разнице в величине финального радиуса пинча r_{pinch} величины P_{MHD} для одиночных и вложенныхборок сильно отличаются, согласно выражению (6). Следует заметить, что сильная зависимость мощности P_{MHD} от тока и радиуса пинча требует наличия детальной информации о радиальном распределении тока в приосевой области проволочной сборки, что в экспериментах, представленных в настоящей работе, было недоступным. Также важным является знание о радиальном распределении тока вне пинча $I(r > r_{pinch})$, на которое определяющим образом влияет распределение отставшей плазмы (PP-волокон и W-проволок), зависящее от характера окончания плазмообразования и от устойчивости сжатия плазмы на этой стадии процесса. Поэтому, приведенные выше значения мощности P_{MHD} , носят лишь оценочный характер.

В верхней части рис. 19б представлены зависимости от линейной массы W-сборки суммарной мощности в виде $P = (P_{kin} + P_{MHD})h$ для вложенных (кривая 1) и одиночныхборок (кривая 2). Как следует из рисунка, суммарная мощность излучения P для вложенныхборок лежит в диапазоне $(8.7–22.1)$ ТВт (для случая $m_l = 220$ мкг/см) и $(9.3–21.8)$ ТВт (для случая $m_l = 330$ мкг/см). Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что во всем диапазоне значений линейной массы W-борок, применяемых в экспериментах на установке Ангара-5-1, для вложенныхборок наблюдается превосходство по выходу МРИ по сравнению с одиночными W-борками. Также следует заметить, что увеличение массы W-сборки во внутреннем каскаде вложенныхборок не приводит к существенному увеличению мощности МРИ (не более 2–5%). Это хорошо соответствует экспериментальным данным.

В нижней части рис. 19б представлена кривая 3 – зависимость отношения мощностей P_{nest}/P_{singl} от m_l для сравнения выходов МРИ для одиночных и вложенныхборок. Там же представлен диапазон (min, max) возможных значений отношения P_{nest}/P_{singl} . Из кривой 3 следует, что в среднем, в представленном диапазоне значений m_l , вложенныеборки дают в 1.4–1.7 раза выше потери на излучение, чем одиночныеборки.

Таким образом, сделанные из выражений (5) и (6) оценки P_{kin} и P_{MHD} сопоставимы с зарегистрированным уровнем мощности МРИ в экспериментах с (PP-W) вложеннымиборками в этой се-

рии экспериментов (см. напр. экспериментальные данные на рис. 196).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено сравнительное исследование токовой импозии 2-х каскадных вложенных сборок смешанного состава (PP-W) и одиночной цилиндрической многопроволочной W-сборки, в которых параметры внутреннего каскада вложенныхборок из W-проволок идентичны параметрам одиночной W-сборки. Исходя из сопоставления экспериментальных данных по токовому сжатию таких типовборок, можно сделать следующие выводы:

1. Получено существенное повышение пиковой мощности МРИ (для диапазона энергии квантов $h\nu > 100$ эВ) в случае двухкаскадных (PP-W) вложенныхборок по сравнению с одиночными W-сборками с теми же параметрами, что и у W-сборки во внутреннем каскаде. Показано, что в случае (PP-W) вложенныхборок с отношением радиусов каскадов $r_{in}/r_{out} = 0.8$ пиковая мощность оказывается выше в 1.7–1.9 раза, с отношением $r_{in}/r_{out} = 0.65$ – в 1.2–1.3 раза и с отношением $r_{in}/r_{out} = 0.5$ – в 2.2–2.5 раза.

2. Повышение амплитуды импульса МРИ связано в основном с сокращением его длительности. При этом энергия рентгеновского излучения слабо зависит как от линейной массы m_{out} волоконной PP-сборки во внешнем каскаде, так и от линейной массы m_{in} W-сборки во внутреннем каскаде, по крайней мере, в диапазоне значений линейной массы $m_{in} \in [220, 330]$ мкг/см для условий эксперимента на установке Ангара-5-1.

3. Следующие значения параметров импульса МРИ: $P_{SXR}^{max} \approx 17-18$ ТВт, $E_{SXR} \approx 130-140$ кДж и $FWHM \approx 5-6$ нс, являются предельными в нашей постановке эксперимента. При уровне разрядного тока (3–3.5) МА достигнута высокая степень сжатия плазмы W-сборки внутреннего каскада около (20–25).

4. Спектральные измерения показали, что в оптимальных режимах сжатия плазмы (PP-W) вложенныхборок наблюдается увеличение доли энергии рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $\lambda \in (30, 40)$ Å, что на (30–100)% больше по сравнению с одиночными W-сборками со схожими параметрами. Это свидетельствует о повышении температуры Z-пинча в случае эффективного сжатия плазмы вложенныхборок смешанного состава.

5. Продемонстрировано, что путем оптимизации линейной массы внешнего каскада (волоконной сборки) можно достигнуть ~90% преобразования электромагнитной энергии, закачанной в окрестность лайнера, в энергию

рентгеновского излучения пинча. При этом доля кинетической в энергии излучения составляет не выше 30%.

Авторы выражают благодарность коллективу установки Ангара-5-1 за инженерно-техническое сопровождение экспериментов. Работа частично выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 20-02-00007, 20-21-00082).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deeney C., Douglas M.R., Spielman R.B., Nash T.J., Peterson D.L., L'Eplattenier P., Chandler G.A., Seaman J.F., Struve K.W. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. № 22. P. 4883–4886.
2. Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Сасоров П.В. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 1. С. 33–48.
3. Cuneo M.E., Sinars D.B., Waisman E.M., Bliss D.E., Stygar W.A., Vesey R.A., Lemke R.W., Smith I.C., Rambo P.K., Porter J.L., Chandler G.A., Nash T.J., Mazarakis M.G., Adams R.G., Yu E.P., Struve K.W., Mehlhorn T.A., Lebedev S.V., Chittenden J.P., Jennings C.A. // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. № 5. P. 056318-1–056318-18.
4. Sinars D.B., Cuneo M.E., Yu E.P., Bliss D.E., Nash T.J., Porter J.L., Deeney C., Mazarakis M.G., Sarkisov G.S., Wenger D.F. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. № 14. P. 145002-1–145002-4.
5. Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Птичкина Е.А., Грицук Е.А., Олейник Г.М., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 9. С. 779–806.
6. 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.
7. 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.
8. Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Фролов И.Н., Сасоров П.В. // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 12. С. 1059–1093.
9. 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.
10. Александров В.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Лаухин Я.Н., Медовщиков С.Ф., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Сасоров П.В., Федулов М.В., Фролов И.Н. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 6. С. 520–547.
11. 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.

12. 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.
13. Mitrofanov K.N., Aleksandrov V.V., Branitski 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. № 4. P. 045007-1–045007-24.
14. Митрофанов К.Н., Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Олейник Г.М. // Сб. тез. доклад. XLIX Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС, 14–18 марта 2022 г., ЗАО НТЦ “ПЛАЗМАИОФАН”. М. С. 120. <https://doi.org/10.34854/ICRAF.2022.49.1.085>.
15. Альбикиов 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.
16. Браницкий А.В., Олейник Г.М. // Приборы и техника эксперимента (ПТЭ). 2000. № 4. С. 58–64.
17. 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. № 2. С. 160–171.
18. 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.
19. Олейник Г.М. // Приборы и техника эксперимента (ПТЭ). 2000. № 3. С. 49–51.
20. 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.
21. Sasorov P. // 6th Intern. Conf. on Dense Z-Pinches. Oxford. Ed.: J. Chittenden. AIP Conf. Proc. 2006. V. 808. P. 81–84.
22. 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., Seamen J.F., Stygar W.A., Struve K.W., Breeze S.P., McGurn J.S., Torres J.A., Zagar D.M., Gilliland T.L., Jobe D.O., McKenney J.L., Mock R.C., Vargas M., Wagoner T. // Phys. Plasmas. 1998. V. 5. № 5. P. 2105–2111.
23. 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. Instr. 2014. V. 85. P. 083501-1–083501-11.
24. Lovberg R.H., Raily R.A. and Shlachter J.S. // Dense Z-pinches: Proc. of 3rd Int. Conf. 1993. London, United Kingdom. AIP Conf. Proc. 1994. New York. USA. Eds.: Haines M., Knight A. V. 299. P. 59.
25. Rudakov L.I., Velikovich A.L., Davis J., Thornhill J.W., Giuliani J.L., Jr. and Deeney C. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. № 15. P. 3326–3329.
26. Velikovich A.L., Davis J., Thornhill J.W., Giuliani J.L., Jr., Rudakov L.I., Deeney C. // Phys. Plasmas. 2000. V. 7. № 8. P. 3265–3277.