

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЖАТИЯ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ДЕЙТЕРИРОВАННОЙ МИШЕНИ, ПОМЕЩЕННОЙ НА ОСИ ПРОВОЛОЧНОГО ЛАЙНЕРА

© 2019 г. В. В. Александров<sup>а</sup>, Г. С. Волков<sup>а</sup>, Е. В. Грабовский<sup>а</sup>, А. Н. Грицук<sup>а</sup>,  
И. В. Волобуев<sup>б</sup>, Ю. Г. Калинин<sup>д</sup>, В. Д. Королев<sup>а, \*</sup>, Я. Н. Лаухин<sup>а</sup>,  
С. Ф. Медовщиков<sup>а</sup>, К. Н. Митрофанов<sup>а</sup>, Г. М. Олейник<sup>а</sup>,  
В. Г. Пименов<sup>с</sup>, Е. А. Смирнова<sup>д</sup>, И. Н. Фролов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ГНЦ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”, Москва, Россия

<sup>б</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>с</sup> Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва, Россия

<sup>д</sup> Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

\*e-mail: Korolev\_VD@nrcki.ru

Поступила в редакцию 03.12.2018 г.

После доработки 14.02.2019 г.

Принята к публикации 25.03.2019 г.

На установке Ангара-5-1 (3.5 МА, 100 нс) исследовалось сжатие внешнего лайнера с внутренней цилиндрической мишенью при токе до 3.5 МА. Использовались лайнеры различных конфигураций с начальным диаметром 12 мм и 20 мм, выполненные на основе алюминиевых проволочек диаметром 15 мкм, смешанные сборки, состоящие из алюминиевых проволочек и капроновых нитей диаметром 25 мкм и сборки из капроновых нитей с напылением алюминия толщиной 1 мкм. Количество проволочек изменялось от 10 до 40 шт. Мишени были выполнены из агар-агара или дейтерированного полиэтилена малой плотности. Параметры плазмы в Z-пинче определялись с помощью диагностического комплекса установки Ангара-5-1, включающего оптические и рентгеновские электронно-оптические камеры (ЭОК), рентгеновские детекторы и камеры обскуры, нейтронные детекторы, а также рентгеновский спектрограф на кристалле слюды. Было установлено, что динамика сжатия плазмы, образование локальных плазменных образований, являющихся источниками нейтронов, зависит от конфигурации нагрузки: диаметра сборки, количества проволочек (нитей), диаметра и плотности мишени. Наиболее эффективное сжатие и высокие параметры плазмы (степень сжатия, температура), а также наибольший нейтронный выход наблюдался в экспериментах со сборками диаметром 12 мм, выполненными из алюминиевых проволочек, внутри которых помещалась дейтерированная мишень диаметром 1 мм с плотностью 0.3 г/см<sup>3</sup>. В результате соударения основной массы сборки с внутренней мишенью формируется компактный пинч диаметром ≈ 0.5 мм, образование которого сопровождается возникновением мягкого рентгеновского излучения. Развитие МГД-неустойчивостей в пинче приводит к образованию на его оси большого количества горячих точек (ГТ) с размерами 200–300 мкм и электронной температурой 0.4–0.7 кэВ. Появление ГТ сопровождается эмиссией нейтронов со средней энергией  $2.7 \pm 0.2$  МэВ, максимальный выход которых составлял  $2.6 \times 10^{10}$  нейтронов за выстрел.

DOI: 10.1134/S0367292119090026

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Предложения по созданию плазмы с термоядерными параметрами, основанные на максимальном усилении перетяжечной неустойчивости при протекании тока  $\geq 10$  МА через профилированную цилиндрическую мишень из D–T-смеси [1, 2] инициировали экспериментальные исследования по изучению динамики сжатия плазмы в быстром Z-пинче образующегося при магнитном сжатии конденсированных нагрузок

[3, 4]. Для моделирования процесса образования и сжатия плазмы в перетяжке Z-пинча на установке С-300 (3 МА, 100 нс) использовались в качестве нагрузок для Z-пинчей малоплотные ( $\rho = 0.05–0.1$  г/см<sup>3</sup>) твердотельные вещества с микрогетерогенной структурой (агар-агар, дейтерированный полиэтилен) [4–7]. При протекании тока через профилированную агар-агаровую нагрузку формировалось локальное плазменное образование (ЛПО) с минимальным размером

20 мкм с концентрацией плазмы  $n_e = 10^{22}$  см<sup>3</sup> и ионной и электронной температурами  $T_i = (3-12)$  кэВ,  $T_e = (1-2)$  кэВ соответственно. В экспериментах с цилиндрическими нагрузками диаметром 1 мм из микропористого дейтерированного полиэтилена с плотностью 50–100 мг/см<sup>3</sup> было установлено, что образование ЛПО сопровождается возникновением коротких импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ) с длительностью 2–4 нс и нейтронной эмиссией с максимальным выходом  $6 \times 10^9$  нейтр. [8]. В экспериментах на установке Ангара-5-1 (3.5 МА, 100 нс) при протекании тока через цилиндрическую нагрузку диаметром 1 мм из микропористого дейтерированного полиэтилена с плотностью, изменяющейся в диапазоне 0.1–0.4 г/см<sup>3</sup>, возникали высокотемпературные ЛПО с характерным размером 100 мкм. Во время появления ЛПО регистрировались нейтроны с максимальным выходом  $3 \times 10^{10}$  нейтр. [9].

Высокий нейтронный выход является необходимым критерием достижения параметров плазмы для зажигания термоядерной реакции в пинче. Моделирование процесса генерации нейтронов в дейтериевом газовом Z-пинче, выполненное в работе [10], показало, что нейтронный выход в диапазоне токов 1.4–20 МА следует зависимости  $Y \sim I^{(3.4-4)}$ . Нейтронный выход, измеренный в экспериментах с дейтериевыми струями на установках С-300 [11], Сатурн [12], “Z” [13] и ГИТ-12 [14], соответствует этой зависимости. В работах [8, 15, 16] был обнаружен эффект значительного увеличения ширины нейтронного спектра по сравнению с максвелловским спектром в экспериментах с дейтериевыми струями и с нагрузками, выполненными из микропористого полиэтилена. К значительному уширению спектра нейтронов приводит учет немаксвелловского хвоста в распределении ионов по энергии [17]. В случае распределения ионов по энергии со степенным хвостом значительный вклад в нейтронное излучение дают дейтроны с энергией выше 100 кэВ, взаимодействующие с основной группой ионов, имеющих эффективную температуру <10 кэВ. Наблюдавшаяся анизотропия энергии нейтронов в аксиальном направлении и численные расчеты, выполненные в работе [8], также свидетельствуют в пользу появления ионов с высокой энергией.

В экспериментах, выполненных в рамках проекта MAGLIF [18] на установке Z [19], было осуществлено сжатие магнитным полем разрядного тока с амплитудой 19 МА и временем нарастания 100 нс тонкостенного бериллиевого цилиндра, наполненного газообразным дейтерием, нагретого лазером с полной энергией 2.5 кДж и мощностью 1 ТВ, в предварительно приложенном вдоль его оси магнитном поле 10 Тл. Было обнаружено

формирование области горячей плазмы с температурой  $\approx 3$  кэВ и плотностью 0.3 г/см<sup>3</sup>, представляющей собой узкий столбик длиной 6 мм с диаметром, изменяющимся от 60 до 120 мкм вдоль оси, время жизни которого составляло  $\approx 2$  нс. В результате сжатия производилось до  $2 \times 10^{12}$  термоядерных D–D нейтронов. Таким образом, эксперименты продемонстрировали высокий нейтронный выход из плазмы с температурой несколько кэВ при медленной (скорость имплозии  $7 \times 10^6$  см/с), стабильной, цилиндрической имплозии.

В предыдущих экспериментах, выполненных на установке С-300 [8] и Ангара-5-1 [9], в которых изучалась имплозия Z-пинча, созданного на основе с микропористого дейтерированного полиэтилена, масса горячей плазмы в ГТ, являющихся источником нейтронов, составляла всего несколько процентов от полной массы вещества мишени. Поэтому в будущих экспериментах, в которых предполагается использовать в качестве мишеней криогенный дейтерий, необходимо установить методы предварительной ионизации, которые позволят более эффективно преобразовывать твердотельное вещество мишени в плазму. В настоящей работе для создания высокотемпературного Z-пинча применялась двухкаскадная система, состоящая из внешнего лайнера, представляющего собой проволочную сборку, выполненную из материала с малым атомным номером (алюминия), и конденсированной цилиндрической мишени из микропористого вещества. Такая схема обладает дополнительными возможностями воздействия на мишень. Во-первых, при соударении внешнего лайнера с мишенью происходит преобразование кинетической энергии ускоренного лайнера в тепловую энергию мишени. Во-вторых, имеется возможность непосредственного использования энергии магнитного поля тока, протекающего через внешний лайнер, для воздействия на внутреннюю мишень за счет быстрого переключения тока с внешнего лайнера на мишень. Это приведет к созданию в ней разряда с высокой скоростью нарастания тока, порядка нескольких мегампер за несколько наносекунд ( $dI/dt \sim 10^{14}-10^{15}$  А/нс). Высокие значения  $dI/dt$  могут быть эффективны для перехода микропористого вещества мишени из твердой фазы в плазменное состояние [20].

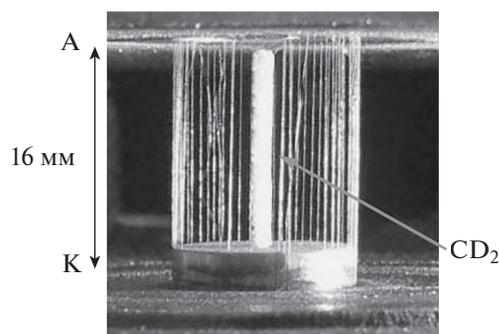
В работе [21] на установке MAGPIE изучалось влияние плазменного предвестника, образованного при протекании тока по сборке диаметром 16 мм, состоящей из 16 или 32 вольфрамовых проволочек, на пенную мишень диаметром 1.5 мм. Эксперименты показали, что под действием предвестника происходит формирование плазмы с низкой плотностью ( $n_e \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>), которая подвержена неустойчивости с модой  $m = 0$ , при этом

диаметр пенной мишени незначительно расширился. Эксперименты, проведенные на установке Ангара 5-1 (3.5 МА, 100 нс), по исследованию динамики сжатия проволочного лайнера диаметром 12 мм, выполненного из вольфрамовых проволочек, внутри которого помещался цилиндрический столбик диаметром 2–3 мм из агар-агара с плотностью  $2 \text{ мг/см}^3$ , продемонстрировали эффективное сжатие плазмы с высокой скоростью (до  $2 \times 10^7 \text{ см/с}$ ) [22, 23]. На финальной стадии имплозии формировался компактный Z-пинч с диаметром 0.8–1 мм, состоящий из ГТ. В работе [24] на установке С-300 (2 МА, 100 нс) изучалась генерация нейтронов при сжатии проволочного вольфрамового лайнера на твердотельную нить, выполненную из дейтерированного полиэтилена диаметром 80–120 мкм. Было установлено, что нейтроны возникали во время развития МГД-неустойчивостей с модой  $m = 0$  из нескольких ГТ с характерным размером  $\sim 100 \text{ мкм}$ . Одновременно возникало мягкое (с энергией  $> 100 \text{ эВ}$ ) и жесткое (с энергией выше нескольких кэВ) рентгеновское излучение. Средняя энергия нейтронов лежала в диапазоне 2.6–2.7 МэВ, максимальный нейтронный выход достигал  $3 \times 10^9$  нейтр. Следует отметить, что большое количество ионов с большим атомным номером (вольфрама) могло привести к снижению температуры плазмы во время нейтронной эмиссии из-за высокой излучательной способности Z-пинча [25].

## 2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по изучению динамики сжатия алюминиевых проволочных лайнеров, внутри которых помещались цилиндрические мишени из малоплотной пены (агар-агара) и микропористого дейтерированного полиэтилена, проводились на установке Ангара-5-1 [26] в режиме Z-пинчового разряда при токе до 3.5 МА с фронтом нарастания 150 нс (рис. 1). Измерение параметров двухкаскадной схемы осуществлялось с помощью диагностического комплекса установки Ангара-5-1 (рис. 2). Для регистрации изображения пинча в рентгеновском излучении в спектральном диапазоне  $E > 20 \text{ эВ}$  в первой серии экспериментов использовалась 4-х кадровая ЭОК с катодами из микроканальных пластин, обеспечивающая пространственное разрешение по объекту 100–200 мкм и временное разрешение около 1.5 нс. Во второй серии экспериментов для получения информации о динамике сжатия нагрузки использовалась 10-ти кадровая сверхскоростная рентгеновская ЭОК (СХР6) с экспозицией кадров 2–4 нс и 5 нс. Регистрация изображений осуществлялась в области энергий  $E > 100 \text{ эВ}$ . Пространственное разрешение по объекту составляло 100–200 мкм в области энергий 100–300 эВ. Интегральные по времени фотографии были полу-

чены с помощью камеры обскуры с 3-мя отверстиями в мягком рентгеновском излучении. Отверстия перекрывались фильтрами, подбором которых можно было обеспечить получение изображений в областях энергий  $E > 100 \text{ эВ}$ ,  $E > 200 \text{ эВ}$ ,  $E > 300 \text{ эВ}$ ,  $E > 600 \text{ эВ}$ ,  $E > 1 \text{ кэВ}$ . Отметим, что в отдельных экспериментах одно из отверстий было открыто, что позволяло получать изображения в области энергий  $E \geq 20 \text{ эВ}$ . Информация о динамике сжатия алюминиевого лайнера на конденсированную мишень в оптическом диапазоне была получена с помощью щелевой развертки на основе высокоскоростного ЭОП-хронографа СФЭР-2. Временное разрешение фоторегистратора составляло  $\approx 0.3 \text{ нс}$  при длительности развертки 140 нс и 0.5 нс при длительности 210 нс, пространственное разрешение по объекту и глубина резкости в области объекта составляли около 130 мкм и 11 мм соответственно. Измерение импульсного рентгеновского излучения в диапазоне  $E > 100 \text{ эВ}$ ,  $E > 150 \text{ эВ}$ ,  $E > 600 \text{ эВ}$  осуществлялась вакуумными рентгеновскими диодами (ВРД), снабженными рентгеновскими фильтрами. Для определения полного выхода нейтронов использовались активационные детекторы, в которых для замедления нейтронов применялись контейнеры из органического стекла. В качестве датчиков использовались галогенные гейгеровские счетчики СГС-5. Активационные детекторы обеспечивали регистрацию коротких потоков нейтронов в диапазоне  $10^8$ – $10^{12}$  нейтр./имп., возникающих в результате D–D-реакции синтеза [27]. Детекторы устанавливались вдоль оси мишенного узла на расстоянии 104 см от нагрузки. Энергия нейтронов определялась по времени пролета с помощью 3-х сцинтилляционных детекторов ССДИ-8. В качестве ФЭУ в детекторах использовался СНФТ-3 с пластиковым сцинтиллятором СПСБ-18 диаметром 50 мм и высотой 10 мм. Детекторы устанавливались в аксиальном направлении на расстоянии 9 м над анодом и в радиальном направлении на расстояниях 8.5 и 16.2 м. Временное разрешение детекторов составляло 8–10 нс, точность в определении энергии нейтронов была  $\pm 0.2 \text{ МэВ}$ . Полный ток, протекающий по лайнерной нагрузке, определялся с помощью восьми магнитных зондов, измеряющих производную тока и расположенных на радиусе 55 мм от оси установки. Полный ток вычислялся путем интегрирования усредненной производной тока. Временное разрешение токовых датчиков было порядка 1 нс. Для измерения напряжения на выходном узле установки использовался многогабаритный индуктивный делитель импульсного напряжения наносекундного диапазона [28]. Индуктивный делитель измеряет напряжение между анодом и катодом примерно вдоль сепаратриссы – поверхности, разделяющей семейство магнитных силовых линий, охватыва-



**Рис. 1.** Составная нагрузка с внешней сборкой, выполненной из проволочек и капроновых нитей, внутри которой помещалась мишень, выполненная на основе агар-агара ( $\rho = 10\text{--}40 \text{ мг/см}^3$ ) или дейтерированного полиэтилена ( $\text{CD}_2$ ,  $\rho = 80\text{--}300 \text{ мг/см}^3$ ).

ющих ось лайнера, от восьми семейств магнитных силовых линий, охватывающих восемь катодов вакуумных транспортирующих линий с магнитной изоляцией различных модулей. Сепаратрисса расположена в месте суммирования токов отдельных модулей на расстоянии 60 мм от вертикальной оси установки.

Электронная температура оценивались по отношению интенсивностей резонансных линий [H]- и [He]-подобных ионов Al или K, а электронная плотность — по отношению интенсивностей резонансной и интеркомбинационной линий [He]-подобных ионов этих же элементов. Для регистрации (интегральных по времени) необходимых для этих целей рентгеновских спектров использовался спектрограф с выпуклым кристаллом слюды, регистрирующим элементом в котором являлась ПЗС-линейка.

В расчетах использовалась стационарная столкновительно-излучательная модель плазмы. Температура и плотность подбирались так, чтобы расчетные значения отношений интенсивностей резонансных линий [H]- и [He]-подобных ионов, а также отношений интенсивностей интеркомбинационной и резонансной линий [He]-подобного иона совпадали с экспериментальными или возможно меньше отличались от них. Расчет заселенности проводился только с учетом уровней, для которых главное квантовое число  $n$  не превышало 4. При этом уровень  $^1P_1$ , учитывался отдельно, а остальные возбужденные состояния [He] иона объединялись. Излучающая область считалась однородной по температуре и плотности для всех ионов. Вероятность вылета кванта с энергией  $\epsilon$  оценивалась с помощью выражения

$$w_{out}(\epsilon) = 1/(1 + \kappa(\epsilon)L),$$

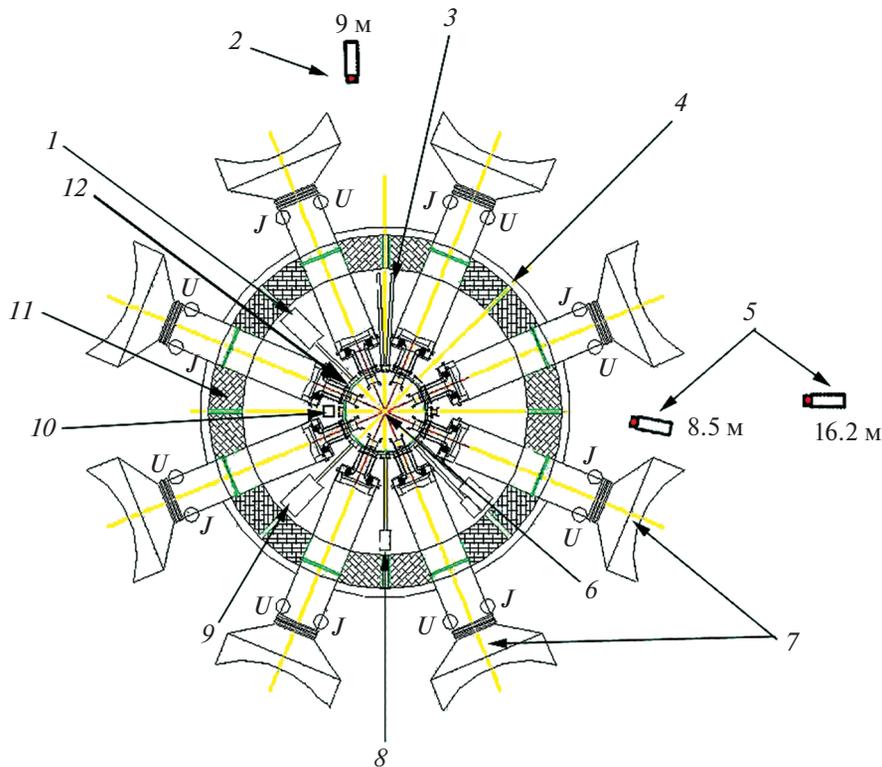
где  $\kappa(\epsilon)$  — коэффициент поглощения, пропорциональный плотности ионов в нижнем, основном

состоянии и  $L$  величина средней хорды области излучения. Более детально методика расчета параметров плазмы описана в работе [29].

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Было проведено 2 серии экспериментов, в основном отличающихся типом нагрузки, состоящей из внешней проволочной алюминиевой сборки (лайнера), внутри которой помещалась мишень. В первой серии вдоль оси проволочной сборки устанавливались цилиндры из агар-агара (мишени) диаметром 1–3 мм и плотностью  $\rho = 10\text{--}40 \text{ мг/см}^3$ , в которые в качестве диагностической присадки добавлялся KCl (20–30% по весу). В следующей серии экспериментов в основном исследовалась динамика плазмы Z-пинча, образованного при сжатии цилиндрического проволочного лайнера, на оси которого устанавливалась мишень диаметром 1–1.5 мм, выполненная из микропористого дейтерированного полиэтилена с плотностью 60–300 мг/см<sup>3</sup>. Диаметр проволочныхборок варьировался от 8 до 20 мм; высота нагрузок составляла 16 мм. Подробные данные о параметрах нагрузок в каждом эксперименте приведены в табл. 1 и 2.

В экспериментах № 4097–4113 нагрузка состояла из внешней сборки диаметром 8 мм с количеством проволочек, которое изменялось от 10 до 30, и внутренней мишени диаметром 1.8 мм из пенообразного агар-агара с плотностью 10–20 мг/см<sup>3</sup> с диагностической добавкой (см. табл. 1). Полный ток в этих экспериментах достигал 3.5 МА за 150 нс. На рис. 3 (№ 4111) представлены осциллограммы тока  $I$ , напряжения  $U$ , производной тока  $dI/dt$  и импульс мягкого рентгеновского излучения ( $SXR$ ) (рис. 3а), а так же изображение, полученное с помощью шелевой радиальной развертки оптического свечения плазмы в сечении, находящемся на половине высоты (рис. 3б). Пока происходит производство плазмы с остовов взорванных проволочек, как показано в работе [30] в области расположения мишени протекает около 10% полного тока. Эта доля тока переносится плазмой предвестника на вещество мишени. В результате того, что кинетическая энергия этой плазмы расходуется на нагрев и ионизацию, вещество мишени начинает светиться. Следует отметить, что наличие мишени приводит к значительному уменьшению тока предвестника в приосевой области по сравнению с одиночной алюминиевой сборкой [22]. На рис. 3б видно, что приблизительно на 65 нс (здесь и далее отсчет идет относительно начала тока) лайнер начинает сжиматься к оси, при этом появляется мягкое рентгеновское излучение. Сжатие лайнера сопровождается нарушением пропорциональности между производной тока и напряжением на нагрузке, что соответствует изменению импеданса



**Рис. 2.** Диагностический комплекс установки Ангара-5: 1 – кристаллический спектрограф, сцинтилляционные детекторы, установленные вдоль оси нагрузки 2 (над анодом), и перпендикулярно к оси 5; 3 – вакуумные фотоэмиссионные детекторы (энергия отсечки  $E > 100$  эВ,  $E > 170$  эВ и  $E > 750$  эВ); 4 – вывод излучения на оптические щелевые развертки, ориентированные вдоль оси нагрузки и перпендикулярно к ней; 6 – составная нагрузка, 7 – модули установки Ангара-5-1; 8 – сверхскоростной регистратор (СХР), обеспечивающий получение 10 кадров с экспозицией 4 нс в области энергий  $E \geq 100$  эВ; 9 – трехканальная рентгеновская камера-обскура (снимки получены в области энергий:  $E > 10$  эВ,  $E > 1.5$  кэВ,  $E > 2.5$  кэВ); 10 – активационный детектор; 11 – бетонная защита; 12 – стрелкой указано расположение индуктивного делителя напряжения, установленного на расстоянии 60 мм от оси установки (приблизительно на таком же расстоянии установлены магнитные петли); ( $J$ ) – датчики производной тока и ( $U$ ) – датчики напряжения, установленные на входе передающих вакуумных линий.

нагрузки. Прекращение заметного роста тока свидетельствует об изменении индуктивности и появлении активных потерь в разрядной цепи. На  $\approx 80$  нс в результате соударения основной массы проволочек лайнера с мишенью формируется компактный пинч диаметром  $\approx 1$  мм, который наблюдается до 100 нс. В момент соударения лайнера с мишенью появляется особенность на производной, проявляющейся в резком уменьшении ее значения и изменении полярности. В момент наибольшего уменьшения производной интенсивность мягкого рентгеновского излучения достигает максимума. В течение времени разлета плазмы пинча интенсивность излучения уменьшается. На рентгеновских обскурограммах (см. рис. 3в), полученных в различных диапазонах энергий можно видеть изображение пинча, состоящего из ГТ с характерным размером 200–300 мкм, образующихся в результате развития в пинче неустойчивости с модой  $m = 0$ .

В следующих экспериментах (№ 4261–4266) использовались алюминиевые лайнеры диаметром 12 мм и 20 мм и внутренняя мишень с меньшим диаметром  $\approx 1$  мм и с более высокой плотностью 30–40 мг/см<sup>3</sup>. Количество проволочек в лайнере изменялось от 18 до 40. На рис. 4а показаны осциллограммы тока  $I$ , напряжения  $U$ , производной  $dI/dt$  и импульс мягкого рентгеновского излучения SXR, полученные в эксперименте (№ 4264) с лайнером диаметром 20 мм и количеством проволочек 30. Видно, что производная имеет выраженную особенность, проявляющуюся в ее спаде. При этом сжатие проволочной сборки происходит длительное время (см. рис 4б). К моменту времени  $\approx 90$  нс на оси лайнера появляется яркое свечение в результате прихода первых порций алюминиевой плазмы к агар-агаровой мишени. Ток в этот момент был 2.7 МА. МРИ-излучение возникает, когда лайнер начинает сжиматься к оси. Максимум интенсивности МРИ соответствует моменту времени  $\approx 130$  нс относитель-

**Таблица 1.** Параметры внешнего лайнера из алюминиевых проволочек и внутренней мишени из пенообразного агар-агара

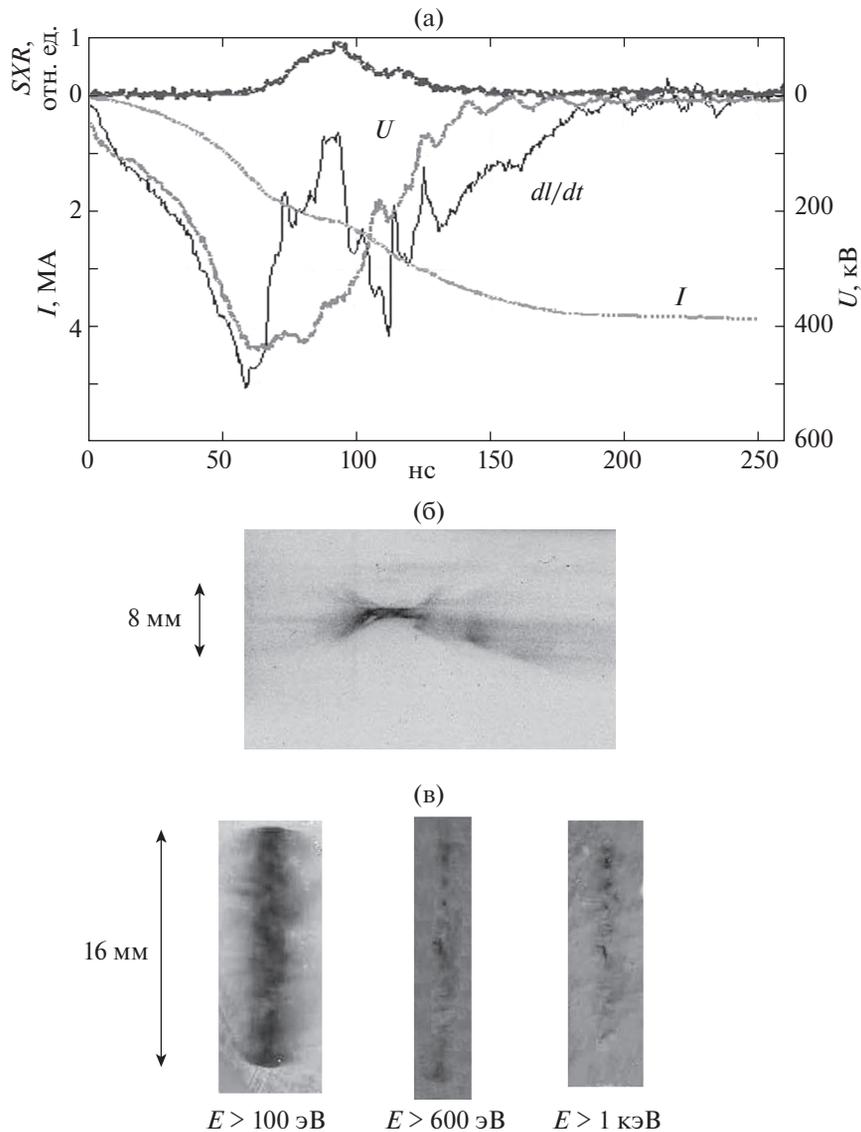
| Эксперимент | Нагрузка                                       |             |                        |                      |                               | Высота нагрузки, мм |
|-------------|--|-------------|------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------|
|             | Лайнер из Al-проволочек $\varnothing = 15$ мкм |             |                        | Мишень из агар-агара |                               |                     |
|             | Количество проволочек                          | Диаметр, мм | Погонная масса, мкг/см | Диаметр, мм          | Плотность, мг/см <sup>3</sup> |                     |
| 4097        | 12   | 8           | 66                     | 1.8                  | 10                            | 16                  |
| 4098        | 12   | 8           | 66                     | 1.8                  | 10                            | 16                  |
| 4100        | 12   | 8           | 66                     | 1.8                  | 10                            | 16                  |
| 4111        | 30   | 18          | 165                    | 1.8                  | 10                            | 16                  |
| 4113        | 27   | 18          | 148                    | 1.8                  | 10                            | 16                  |
| 4261        | 18   | 12          | 99                     | 1                    | 30                            | 16                  |
| 4266        | 16   | 12          | 88                     | 1                    | 40                            | 16                  |
| 4272        | 24   | 12          | 132                    | 1                    | 40                            | 16                  |
| 4263        | 30   | 20          | 165                    | 1                    | 30                            | 16                  |
| 4264        | 30   | 20          | 165                    | 1                    | 30                            | 16                  |

**Таблица 2.** Параметры внешнего лайнера из алюминиевых проволочек, лайнера из капроновых волокон и лайнера из алюминиевых проволочек и капроновых волокон и внутренней мишени из дейтерированного полиэтилена

| Эксперимент | Нагрузка   |             |                        |  |                                      | Примечание                                  |
|-------------|--|-------------|------------------------|--|--------------------------------------|---|
|             | Лайнер из Al-проволочек $\varnothing = 15$ мкм и капроновых нитей $\varnothing 25$ мкм |             |                        | Мишень из микропористого CD <sub>2</sub> |                                      |   |
|             | Количество проволочек  | Диаметр, мм | Погонная масса, мкг/см | Диаметр мишени, мм                       | Плотность мишени, мг/см <sup>3</sup> |   |
| 5804        | 30 (Al)  | 12          | 165                    | 1  | 270                                  | Высота 16 мм                                |
| 5884        | 30 (Al)  | 12          | 165                    | 1  | 140                                  | Высота 16 мм                                |
| 5886        | 30 (Al)  | 12          | 165                    | 2  | 97                                   | Высота 16 мм                                |
| 5914        | 30 (Al)  | 12          | 165                    | 1.5                                      | 300                                  | Высота 16 мм                                |
| 5992        | 30 (Al)  | 12          | 165                    | 2  | 78                                   | Высота 16 мм                                |
| 5805        | 30 (Al)  | 20          | 165                    | 1.5                                      | 190                                  | Высота 16 мм                                |
| 5902        | 10(Al)   | 12          | 55                     | 1.45                                     | 60                                   | Высота 16 мм                                |
| 5771        | 8 (Al) + 72 (капрон)   | 12          | 440                    | 2.6                                      | 65                                   | Высота 4 мм, с напылением Al толщиной 1 мкм |
| 5812        | 60 (капрон)  | 12          | 330                    | 1.2                                      | 70                                   | Высота 16 мм                                |
| 5810        | 32Al + 8 (капрон)  | 12          | 220                    | 1.3                                      | 300                                  | Высота 16 мм                                |

но начала тока, когда основная часть массы проволочек сжимается на мишень. Ток в этот момент достигает максимальной величины 4.7 МА (см. рис. 4а). Затем пинч начинает деформи-

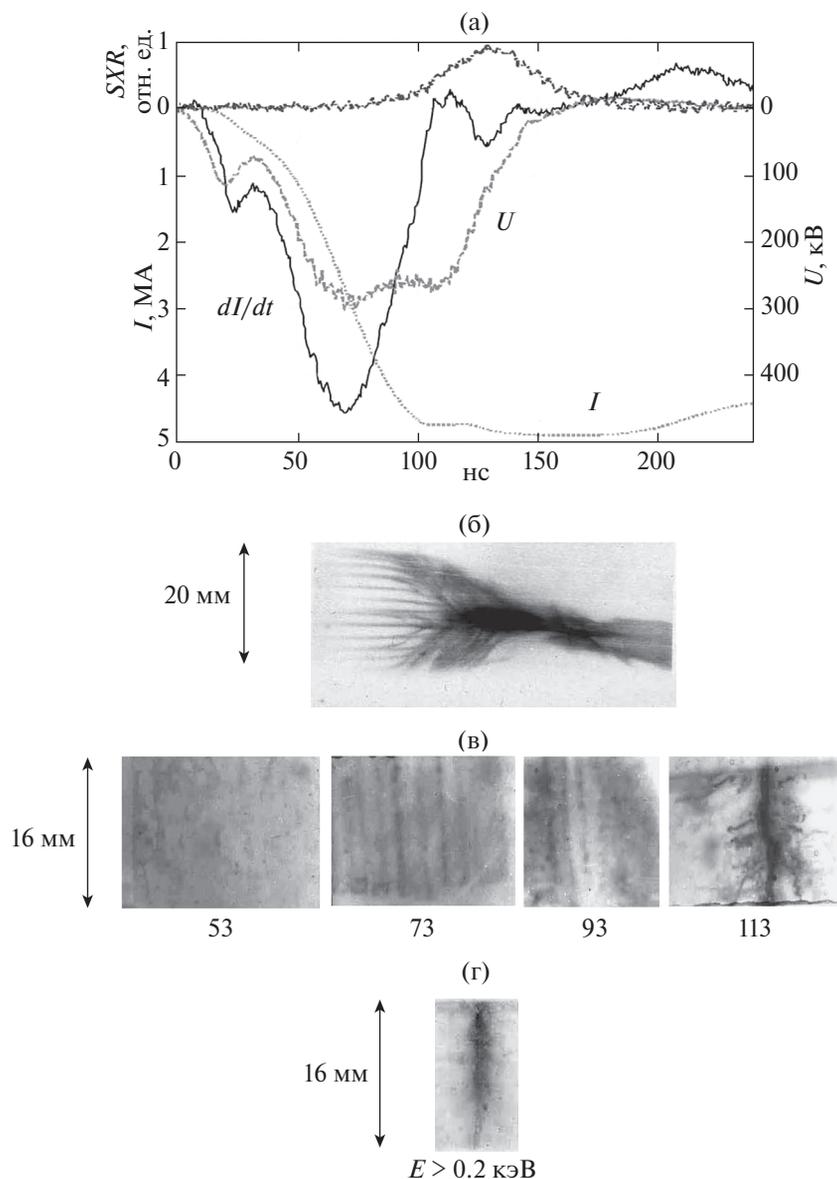
ваться и расширяться в радиальном направлении. На рентгеновских изображениях (см. рис. 4в), полученных с помощью 4-х кадрового ЭОП'а в области энергий  $E > 20$  эВ, видны светящиеся про-



**Рис. 3.** Осциллограммы мягкого рентгеновского (МР)-излучения ( $SXR$ ), напряжения ( $U$ ), тока ( $I$ ) и производной тока ( $dl/dt$ ) (а), радиальная оптическая щелевая развертка (б), интегральные рентгеновские обскурограммы (в). Параметры внешней алюминиевой сборки: диаметр  $\varnothing = 8$  мм, длина  $l = 16$  мм, 30 проволочек ( $\varnothing = 15$  мкм) и внутренней мишени из агар-агара: диаметр  $\varnothing = 1.8$  мм, плотность  $\rho = 10$  мг/см<sup>3</sup>.

волокни на 73 нс, затем к  $\approx 93$  нс образуется плазменная оболочка со значительной толщиной, на внешней стороне которой видна некоторая часть массы проволочек, оставшей от основной массы лайнера. В результате сжатия основной массы лайнера на 113 нс на оси сборки формируется пинч. На рентгеновском изображении, полученном с помощью интегральной по времени камеры обскуры в области энергий  $E > 200$  эВ, представленном на рис. 4г, можно видеть достаточно устойчивое изображение пинча с неоднородной светящейся структурой по высоте. Внешний радиус пинча приблизительно равен начальному радиусу агар-агаровой мишени.

Как было отмечено выше, электронная температура и плотность оценивались по отношению интенсивностей рентгеновских спектральных линий [H]- и [He]-подобных ионов алюминия и калия. Пример экспериментальной спектрограммы приведен на рис. 5, где представлены резонансная и интеркомбинационная линии He-подобного иона калия и резонансная линия H-подобного иона калия в третьем порядке дифракции, а также резонансная и рекомбинационная линии He-подобного иона алюминия, зафиксированная в первом порядке дифракции. Обработка подобных спектрограмм позволила оценить значение тем-



**Рис. 4.** Осциллограммы МР-излучения ( $SXR$ ), напряжения ( $U$ ), тока ( $I$ ) и производной тока ( $dI/dt$ ) (а), щелевая развертка (б), снимки, полученные с помощью 4 ЭОП'ов в области энергий  $E \geq 20$  эВ (в), рентгеновая обскуртограмма (г). Параметры алюминиевой сборки:  $\varnothing = 20$  мм,  $l = 16$  мм, 30 проволочек ( $\varnothing = 15$  мкм) и мишени из агар-агара:  $\varnothing = 1$  мм,  $\rho = 30$  мг/см<sup>3</sup>.

пературы  $T_e$  в 400–600 эВ, а электронную концентрацию в  $(1-1.5) \times 10^{21}$  см<sup>-3</sup>.

При уменьшении диаметра лайнера до 12 мм, состоящего из 16 или 30 проволочек, и при использовании внутренней агар-агаровой мишени с диаметром 1 мм (№ 4266) максимум импульса мягкого рентгеновского излучения наступает раньше, чем в экспериментах, в которых использовался лайнер с диаметром 20 мм, однако его величина меньше (см. рис. 6). По-видимому, это связано с меньшей кинетической энергией лайнера, вложенной в мишень. На производной тока

можно видеть резкий провал (на  $\approx 110$  нс) в момент максимума МРИ, что свидетельствует об увеличении импеданса пинча. Измерениям рентгеновского излучения ВРД детекторами соответствуют кадровые рентгеновские изображения, полученные с помощью ЭОП'ов (см. рис. 6в). Пинч в этом эксперименте формировался раньше (к 94 нс), чем в эксперименте с лайнером диаметром 20 мм.

Из полученных экспериментальных результатов следует, что процессы, происходящие при протекании тока через проволочную сборку,

внутри которой помещена мишень, можно разбить на три стадии. Напряжение и ток в такой нагрузке изменяются в соответствии с выражением:

$$U(t) = L(t)dI/dt + I(t)dL/dt + I(t)R(t) \quad (1)$$

На первой стадии происходит производство плазмы в проволочной сборке, и, как показано в работе [31], можно пренебречь изменением индуктивности нагрузки и резистивной составляющей. В этом случае выражение (1) принимает вид:

$$U(t) = LdI/dt \quad (2)$$

Таким образом, до начала сжатия проволочной сборки напряжение пропорционально производной тока (см. рис. 3).

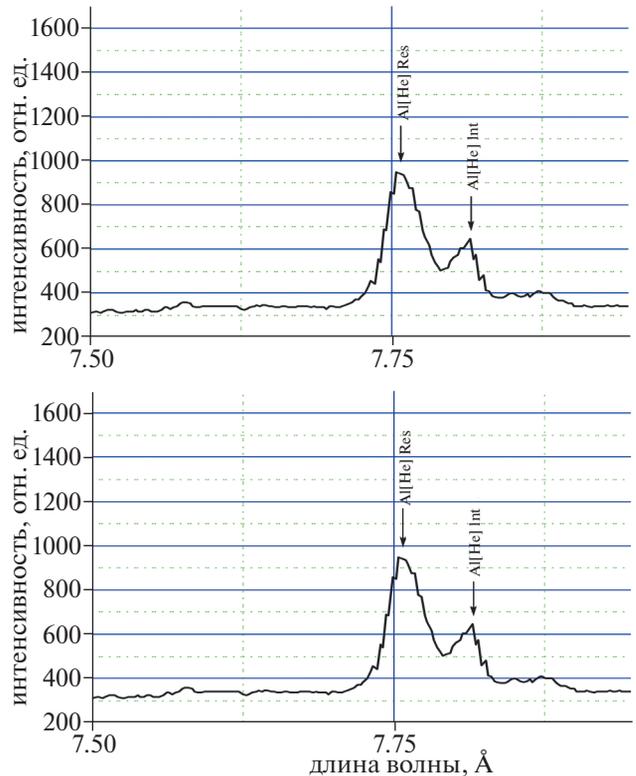
На второй стадии с момента сжатия сборки, сопровождающееся резким увеличением индуктивности, нарушается пропорциональность между сигналами напряжения и производной и наблюдается уменьшение скорости нарастания тока. В этом случае выражение (1) принимает вид:

$$U(t) \approx I(t)dL/dt \quad (3)$$

На последней стадии в момент соударения сборки с мишенью и формирования пинча наблюдается резкое уменьшение значения производной (вплоть до изменения полярности, см. рис. 4), сопровождающееся последующим уменьшением скорости нарастания тока (или достижением током своего максимума). На этой стадии преобладает резистивная составляющая напряжения  $I(t)R(t)$ . Во время пинчевания наблюдается наибольшая интенсивность мягкого рентгеновского излучения.

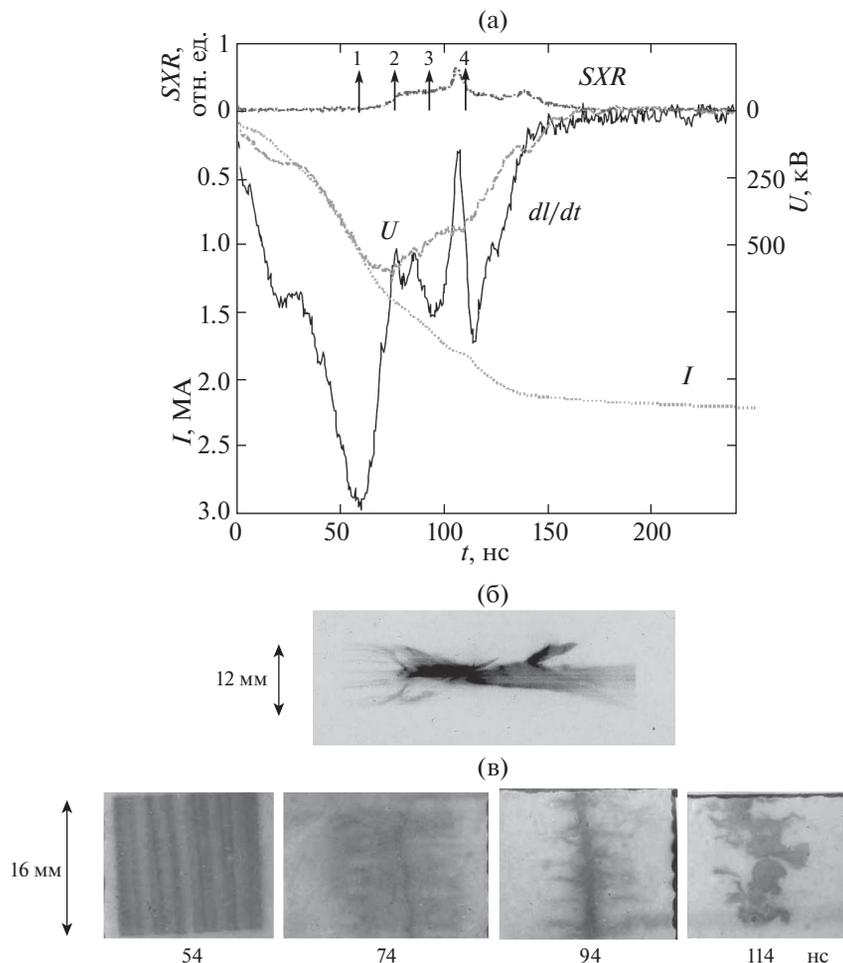
Таким образом, в первой серии экспериментов в случае сжатия алюминиевого лайнера на полимерную мишень, установленную вдоль его оси, наблюдалось формирование компактного Z-пинча с диаметром 200–300 мкм, зарегистрированного в области энергий  $E > 600$  эВ. Температура плазмы, полученная из обработки спектральных измерений, оказалась достаточно высокой  $T_e \leq \leq 0.6$  кэВ. Эти результаты инициировали проведение новой серии экспериментов по исследованию сжатия дейтерированной цилиндрической мишени внешним проволочным лайнером, выполненным из материалов с малым атомным весом, с целью изучения влияния его параметров на нейтронный выход.

Во второй серии экспериментов в качестве внешнего лайнера использовались алюминиевые сборки, состоящие из проволочек диаметром 15 мкм, смешанные сборки, состоящие из алюминиевых проволочек диаметром 15 мкм и капроновых нитей диаметром 25 мкм, а также металлизированные волоконные сборки из капроновых нитей с напылением алюминия толщиной 1 мкм.



**Рис. 5.** Спектры излучения, снятые кристаллическим спектрографом, алюминиевой сборки с диаметром  $\varnothing = 20$  мм (30 проволочек), внутри которой помещена мишень из агар-агара с диаметром  $\varnothing = 1$  мм и плотностью  $\rho = 30$  мг/см<sup>3</sup>. (а) Спектр алюминия, резонансная и интеркомбинационная линии [He] – алюминия. (б) Спектр калия, резонансная линия [H] – подобного К, резонансная и интеркомбинационная линии [He] – подобного калия.

Диаметр сборок составлял 12 мм и 20 мм. Внутри лайнера вдоль его оси помещалась цилиндрическая мишень из дейтерированного полиэтилена диаметром 1–2 мм с плотностью 0.06–0.3 г/см<sup>3</sup> (см. табл. 2). Нагрузка устанавливалась в межэлектродном зазоре мишенного узла высотой 16 мм. Использование сборок различных типов дает возможность изменять соотношение между величиной тока предвестника и током основной массы сборки. В виду того, что предвестник с относительно небольшой массой алюминия может нести существенную часть тока, при столкновении сборки с внутренней мишенью может происходить резкое переключение тока на мишень с большой скоростью нарастания. Это приведет к более эффективному превращению вещества мишени в плазму и проникновению в нее тока. На рис. 7 приведены изображения нагрузки, полученные с помощью шелевых разверток в радиальном и аксиальном направлениях, а также осциллограммы напряжения, производной тока и мягкого рентгеновского излучения, в эксперименте с

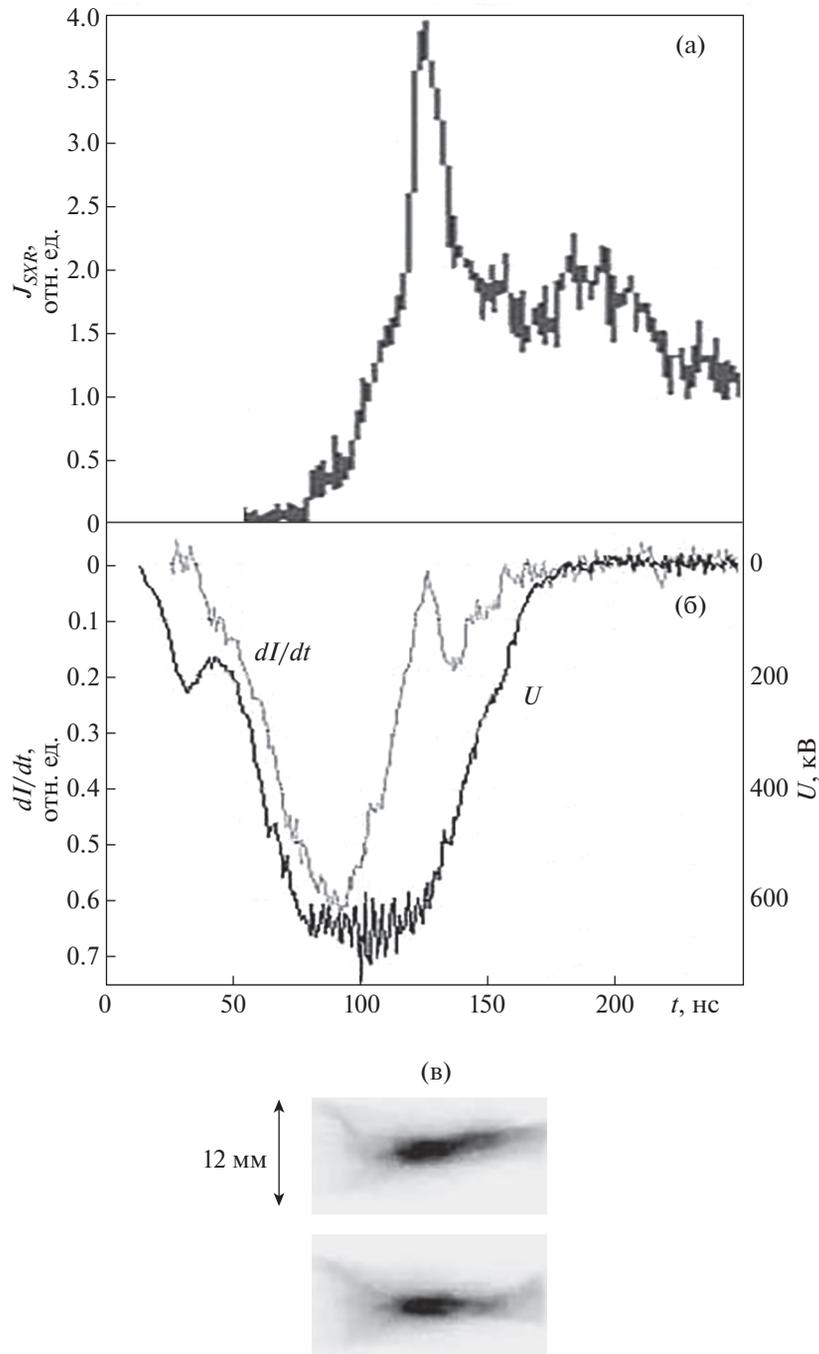


**Рис. 6.** Осциллограммы МР-излучения (SXR), напряжения ( $U$ ), тока ( $I$ ) и производной тока ( $dI/dt$ ) (а), щелевая развертка (б), снимки, полученные с помощью 4-х кадрового ЭОП'а в области энергий  $E \geq 20$  эВ (в). Параметры алюминиевой сборки:  $\varnothing = 12$  мм,  $l = 16$  мм, проволочек ( $\varnothing = 15$  мкм) и мишени из агар-агара:  $\varnothing = 1$  мм,  $\rho = 30$  г/см<sup>3</sup>.

внешней сборкой диаметром 12 мм, состоящей из 30 алюминиевых проволочек, и мишени диаметром 1 мм из дейтерированного микропористого полиэтилена с начальной плотностью 270 мг/см<sup>3</sup> (№ 5804). На изображениях, полученных с помощью радиальной щелевой развертки (см. рис. 7в) видно, что сжатие алюминиевой сборки начинается на  $\approx 75$  нс, а с  $\approx 110$  нс относительно начала тока формируется светящийся пинч. Образование пинча сопровождается импульсом МРИ в области энергий  $E > 0.6$  кэВ. Наиболее яркое свечение пинча наблюдается до 140 нс. На  $\approx 125$  нс относительно начала тока импульс мягкого излучения достигает максимума. В этот момент на производной тока наблюдается резкий провал (см. рис. 7б).

На рис. 8б представлены рентгеновские изображения, полученные с помощью СХР6 в области энергий  $E > 100$  эВ. На изображениях видно, что с 65 нс по 105 нс в результате протекания тока по

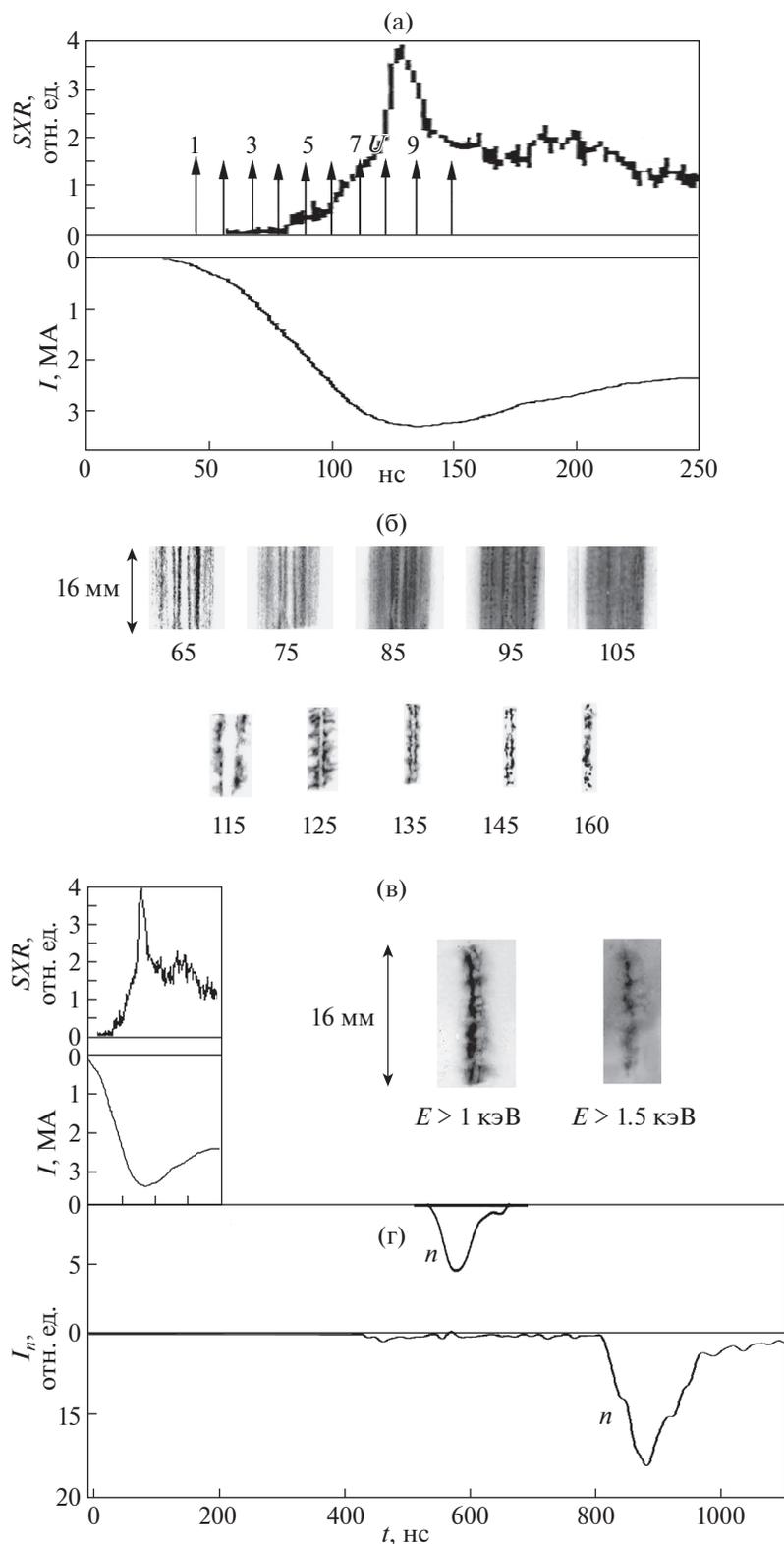
лайнру происходит нагрев, испарение и ионизация вещества проволочек. После 105 нс лайнер начинает сжиматься к оси, и к  $\approx 125$  нс относительно начала тока основная масса лайнера алюминиевой сборки собирается на дейтерированной мишени. К этому моменту времени ток достигает  $\approx 3$  МА. На 125 нс дейтерированный столбик сжимается до диаметра 0.5 мм. В этот момент на его поверхности можно видеть отставшую алюминиевую плазму. Из рисунка видно, что до 145 нс диаметр сформированного пинча не изменяется, а затем на 160 нс пинч разбивается на большое количество локальных плазменных образований вдоль его оси с характерным размером  $< 1$  мм. В этот момент времени ток близок к своему максимальному значению 3 МА. На интегральных рентгеновских изображениях, полученных с помощью камеры-обскуры в области  $E > 1$  кэВ, представленных на рис. 8б, можно видеть, что пинч, подверженный МГД-неустойчивостям с модами  $m = 0$  и 1, разбивается на ГТ с



**Рис. 7.** Осциллограммы МР-излучения (SXR) (а), напряжения ( $U$ ) и производной тока ( $dI/dt$ ) (б), щелевая развертка (в). Параметры алюминиевой сборки:  $\varnothing = 12$  мм,  $l = 16$  мм, проволочек 30 ( $\varnothing = 15$  мкм) и мишени из дейтерированного полиэтилена:  $\varnothing = 1.0$  мм,  $\rho = 270$  мг/см<sup>3</sup>.

размером 200–300 мкм, локализованных на оси пинча. Электронная температура плазмы в пинче оценивалась по относительной интенсивности спектральных линий водородоподобных и гелиеподобных ионов алюминия и калия, что позволяло проводить такие измерения в диапазоне от 0.2 до 1.5 кэВ. В наших экспериментах измерен-

ное значение температуры лежало в узком диапазоне 0.4–0.6 кэВ. На рис. 8г приведены осциллограммы импульсов нейтронов, распространяющихся в радиальном направлении, с детекторов, установленных на расстояниях 8.5 м и 16.2 м. Из времяпролетных измерений следует, что основная группа нейтронов имеет среднюю энергию



**Рис. 8.** Осциллограммы МР-излучения (SXR) и тока ( $I$ ) (а), снимки, полученные с помощью СХР в области энергий  $E \geq 100$  эВ (б), рентгеновские обскуртограммы (в), и импульсы нейтронов ( $n$ ), зарегистрированных в радиальном направлении на расстояниях 8.5 м (г) и 16.2 м от нагрузки (г). Параметры алюминиевой сборки:  $\varnothing = 12$  мм,  $l = 16$  мм, 30 проволочек ( $\varnothing = 15$  мкм) и мишени из дейтерированного полиэтилена:  $\varnothing = 1.0$  мм,  $\rho = 270$  г/см<sup>3</sup>.

**Таблица 3.** Нейтронный выход в зависимости от параметров внешнего алюминиевого лайнера и внутренней дейтерированной мишени

| Эксперимент | Нагрузка   |               |  |                               | Ток, МА | Нейтронный выход     |
|-------------|--|---------------|--|-------------------------------|---------|----------------------|
|             | Лайнер из Al-проволочек (15 мкм) и капроновых нитей (25 мкм) |               | Мишень из микропористого CD <sub>2</sub> |                               |         |                      |
|             | Кол-во   | Диаметр, мм   | Диаметр, мм                              | Плотность, мг/см <sup>3</sup> |         |                      |
| 5804        | 12   | 30 Al         | 1  | 270                           | 3.5     | $2.6 \times 10^{10}$ |
| 5810        | 12   | 32Al + 8 капр | 1.3                                      | 250                           | 3.5     | $4 \times 10^9$      |
| 5902        | 12   | 10Al          | 1.45                                     | 60                            | 2.2     | $3.3 \times 10^9$    |
| 5992        | 12   | 30Al          | 2  | 78                            | 2.2     | $2 \times 10^9$      |
| 5914        | 12   | 30Al          | 1.5                                      | 300                           | 2.8     | $2 \times 10^9$      |
| 5908        | 12   | 30Al          | 1.45                                     | 300                           | 3.3     | $2 \times 10^9$      |
| 5805        | 20   | 30Al          | 1.5                                      | 190                           | 2.8     | $10^9$               |
| 5884        | 12   | 30Al          | 1  | 140                           | 2.1     | $10^9$               |
| 5886        | 12   | 30Al          | 2  | 97                            | 2.5     | $10^8$               |

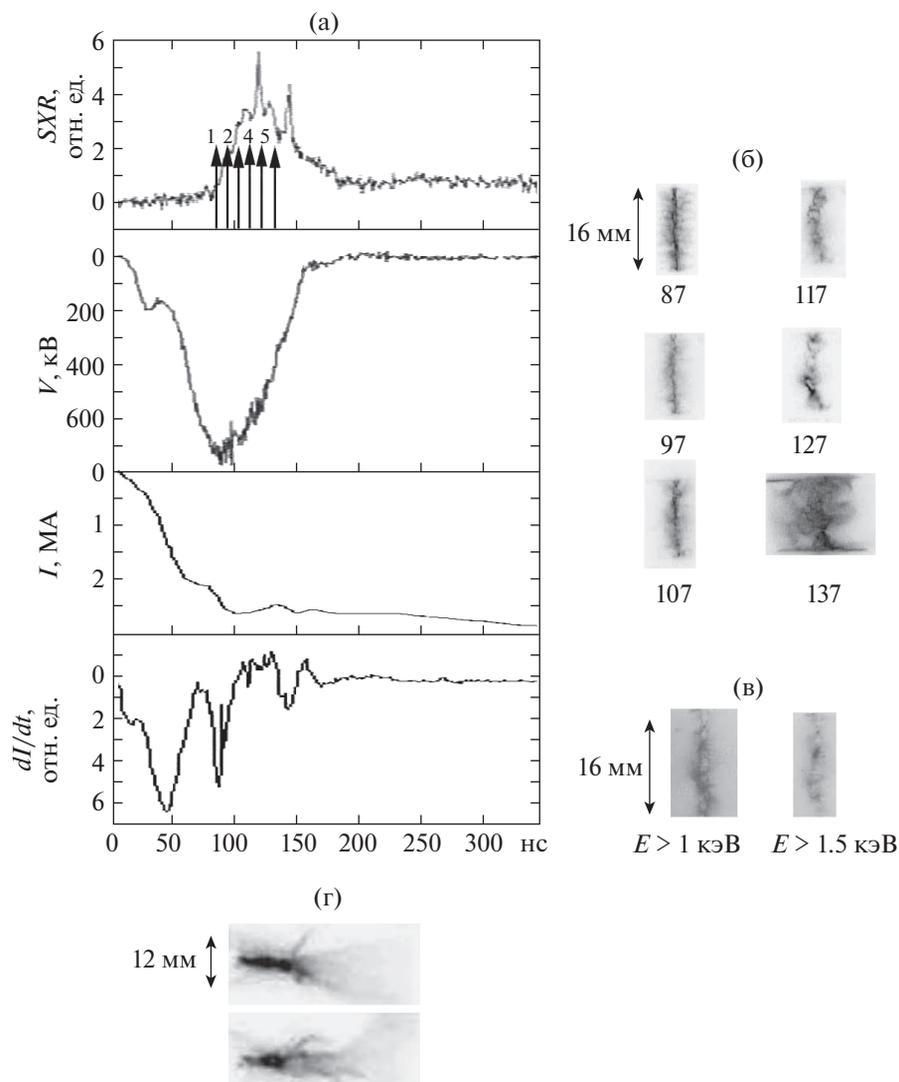
$2.7 \pm 0.2$  МэВ. Максимальный нейтронный выход был равен  $2.6 \times 10^{10}$  нейтр. (см. табл. 3).

В эксперименте (№ 5914) при сохранении параметров алюминиевой сборки и плотности мишени, близкой к той, которая использовалась в (№ 5804) с увеличением диаметра мишени в 1.5 раза (см. табл. 2) и уменьшении тока на 20% (до 2.85 МА) нейтронный выход уменьшился более чем на порядок величины (до  $2 \times 10^9$ ). При уменьшении плотности мишени (в выстрелах № 5992, 5884) до 78 и 140 мг/см<sup>3</sup> и изменении ее диаметра в диапазоне (1–2) мм при меньшем токе (2.1–2.2 МА) нейтронный выход также был значительно ниже, чем измеренный в эксперименте (№ 5804). Следует отметить, что при увеличении диаметра проволоочной сборки до 20 мм при диаметре (№ 5805) и плотности мишени 1.5 мм и 190 мг/см<sup>3</sup> при токе 2.8 МА соответственно нейтронный выход был низким и не превышал  $10^9$  нейтр. По-видимому, это было связано с более низкой компактностью сжатия плазмы, образованной в результате ионизации алюминиевых проволоочек сборки.

В эксперименте (№ 5902) с уменьшением количества алюминиевых проволоочек в сборке (см. табл. 2) до 10, как видно на рис. 9г, на оптических хронограммах сжатие сборки на мишень диаметром 1.45 мм с плотностью 60 мг/см<sup>3</sup> начинается раньше, чем в случае, когда в сборке было 30 проволоочек, при этом пинч формируется с 75 нс, когда ток достигает 2 МА. С момента формирования пинча возникает МРИ. На рентгенов-

ских кадрах, полученных с помощью СХР6, видно, что к 90 нс, когда ток достигает 2.5 МА, основная масса сборки собирается на поверхности дейтерированной мишени. К этому моменту времени на оси дейтерированной мишени образуется пинч, который затем из-за развития МГД-неустойчивостей разбивается на ГТ. Во время формирования ГТ ток изменяется в диапазоне 2.0–2.5 МА. Импульс мягкого излучения достигает максимума на  $\approx 120$  нс относительно начала тока. Нейтронный выход в этом эксперименте с количеством проволоочек в сборке 10, был существенно меньше  $3.3 \times 10^9$  нейтр., чем в эксперименте (№ 5804) с большим количеством проволоочек (30) и большим токе. При сохранении параметров алюминиевой сборки (как в эксперименте № 5902) в эксперименте (№ 5908) с более высокой плотностью 300 мг/см<sup>3</sup> и с таким же диаметром мишени и при токе 3.2 МА нейтронный выход уменьшился до  $2 \times 10^9$  нейтр.. В этом случае происходило затягивание времени образования пинча. Пинч представлял собой цилиндрическую оболочку с диаметром близким кначальному диаметру мишени, внутри которой оставалось несжатое вещество (см. рис. 10). ГТ наблюдаются как на поверхности, так и внутри оболочки. Таким образом, в этом эксперименте с малым количеством алюминиевых проволоочек (10) эффективного сжатия внутренней мишени с плотностью 300 мг/см<sup>3</sup> и диаметром 1.45 мм не наблюдалось.

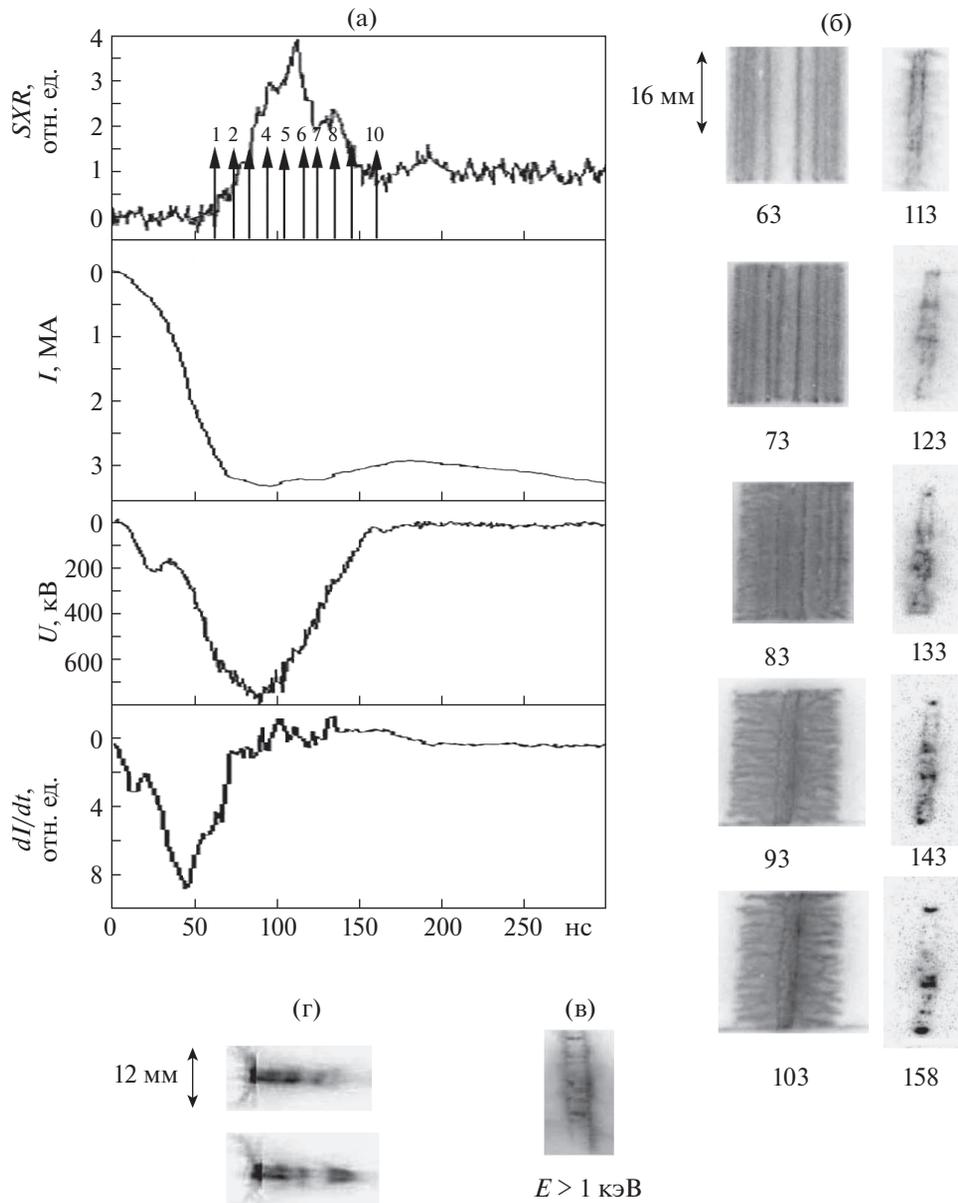
В эксперименте со смешанным лайнером (№ 5810) диаметром 12 мм, состоящим из 32 алю-



**Рис. 9.** Осциллограммы МР-излучения (SXR), напряжения ( $U$ ), тока ( $I$ ) и производной тока ( $dI/dt$ ) (а), снимки, полученные с помощью 10-кадрового СХР в области энергий  $E \geq 100$  эВ (б), рентгеновские обскурограммы (в), шелевая развертка (г). Параметры алюминиевой сборки:  $\varnothing = 12$  мм,  $l = 16$  мм, 10 проволок ( $\varnothing = 15$  мкм) и мишени из дейтерированного полиэтилена:  $\varnothing = 1.2$  мм,  $\rho = 60$  мг/см<sup>3</sup>.

миниевых проволок и 8 капроновых нитей, вдоль его оси помещалась дейтерированная мишень с плотностью 300 г/см<sup>3</sup> с диаметром 1.3 мм. На изображениях, полученных с помощью 10-кадрового СХР6 (рис. 11в) видно, что, когда ток достигал 2.5 МА к  $\approx 120$  нс от начала тока, наблюдалось компактное образование пинча, сопровождающееся появлением импульса МРИ с энергией  $> 0.6$  кэВ (см. рис. 11б). К  $\approx 140$  нс пинч разбивается на большое количество ГТ в результате развития неустойчивости с модой  $m = 0$  (см. рис. 11в). Ток в момент формирования ГТ составлял  $\approx 3$  МА. На рис. 11г показано интегральное рентгеновское изображение, полученное с помощью камеры обскуры в области энергий  $E \geq 20$  эВ. На снимке можно видеть радиальные плазменные

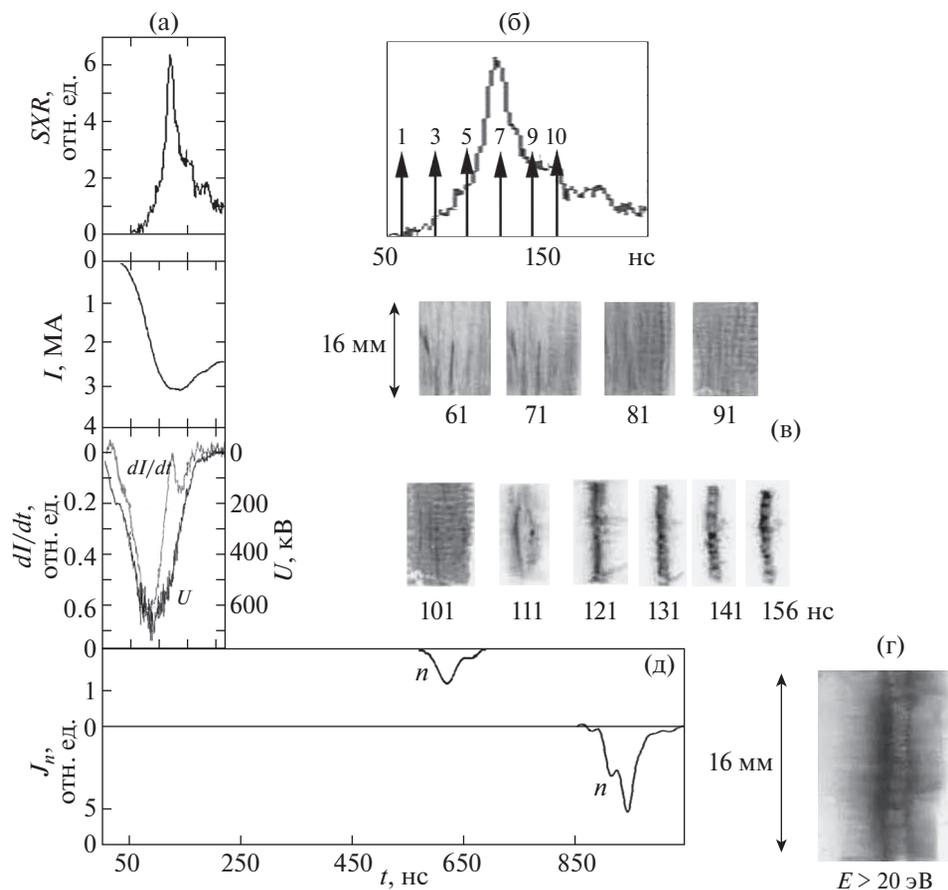
потoki и сформировавшийся пинч, подверженный МГД-неустойчивости с модой  $m = 1$ . На рис. 11д представлены импульсы нейтронов, зарегистрированные датчиками, установленными в радиальном направлении. Основная группа нейтронов имела среднюю энергию  $2.7 \pm 0.2$  МэВ, а полный выход нейтронов в этом эксперименте был значительно меньше, чем при сжатии алюминиевого лайнера с таким же диаметром на дейтерированную мишень и составлял  $4 \times 10^9$  нейтр. Это может быть связано с тем, что в эксперименте со смешанным лайнером алюминиевая плазма, которая раньше приходит на ось и переносит основную ток, захватывает меньший ток, чем в экспериментах с алюминиевым лайнером. При этом часть тока протекает по плазме капрона, остав-



**Рис. 10.** Осциллограммы МР-излучения (SXR), тока ( $I$ ), напряжения ( $U$ ) и производной тока ( $dI/dt$ ) (а), снимки, полученные с помощью СХР в области энергий  $E \geq 100$  эВ (б), рентгеновская обскурограмма (в), щелевая развертка (г). Параметры алюминиевой сборки:  $\varnothing = 12$  мм,  $l = 16$  мм, 10 проволочек ( $\varnothing = 15$  мкм) и мишени из дейтерированного полиэтилена:  $\varnothing = 1.3$  мм,  $\rho = 300$  мг/см<sup>3</sup>.

шей от алюминиевой плазмы [31]. В результате кинетическая энергия, запасенная в алюминиевой плазме меньше, чем в экспериментах с чисто алюминиевым лайнером. Это приводит к тому, что алюминиевая плазма сообщает меньше энергии дейтерированной мишени, и, поэтому мишень нагревается до меньшей температуры. Наличие отставшей плазмы, образованной из капроновых волокон, переносящей ток, подтверждается формой рентгеновского импульса. Из-за столкновения отставшей капроновой плазмы с пинчем,

сформированном на оси в результате взаимодействия дейтерированной мишени с алюминиевой плазмой, происходит затягивание заднего фронта МРИ. При увеличении количества капроновых нитей и уменьшении числа алюминиевых проволочек нейтронный выход уменьшался. Отметим, что в экспериментах с лайнерами диаметром 12 мм, состоящими из капроновых нитей (в количестве 12) с алюминиевым напылением толщиной 1 мкм нейтронный выход величиной  $>10^8$  нейтр. не наблюдался.



**Рис. 11.** Осциллограммы МР-излучения ( $SXR$ ), тока ( $I$ ), напряжения ( $U$ ) и производной тока ( $dI/dt$ ) (а), осциллограмма МР-излучения ( $SXR$ ), (б), снимки, полученные с помощью СХР в области энергий  $E \geq 100$  эВ (в), рентгеновская обскурограмма (г) и импульсы нейтронов ( $n$ ), зарегистрированные в радиальном направлении на расстояниях 8.5 м (г) и 16.2 м (д). Параметры смешанной сборки:  $\varnothing = 12$  мм,  $l = 16$  мм, 32 алюминиевые проволоочки ( $\varnothing = 15$  мкм), 8 капроновых нитей ( $\varnothing = 25$  мкм) и мишени из дейтерированного полиэтилена:  $\varnothing = 1.3$  мм,  $\rho = 330$  мг/см<sup>3</sup>.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- в зависимости от начальных параметров (типа нагрузки, входного тока) изменялась динамика сжатия нагрузки, процесс формирования пинча, образования ГТ, нейтронный выход и интенсивность рентгеновского излучения;
- в результате столкновения основной алюминиевой массы сборки с дейтерированной мишенью формируется Z-пинч, образование которого сопровождается возникновением ГТ, импульсов МР-излучения и нейтронов;
- электронная температура плазмы в пинче, оцененная по относительной интенсивности спектральных линий водородоподобных и гелиеподобных ионов алюминия и калия, находится в диапазоне 0.4–0.6 кэВ;
- нейтронный выход зависел от начальной плотности и радиуса мишени, конфигурации

сборки и довольно существенно от разрядного тока;

- средняя энергия нейтронов в радиальном направлении составляла  $E = 2.7 \pm 0.2$  МэВ;
- максимальный нейтронный выход  $2.6 \times 10^{10}$  нейтр. был получен при сжатии алюминиевой сборки диаметром 12 мм, состоящей из 30 проволоочек, на мишень диаметром 1 мм и плотностью 270 мг/см<sup>3</sup>;
- возможной причиной снижения нейтронного выхода в экспериментах, в которых ток составлял 2–3.5 МА, при изменении конфигурации нагрузки является уменьшение тока, переносимого основной массой алюминиевой плазмы к дейтерированной мишени в результате уменьшения количества проволоочек в чисто алюминиевых сборках, или из-за переключения части тока на отставшую плазму капроновых нитей в смешанных сборках;

• увеличение нейтронного выхода на установке Ангара-5-1 может быть достигнуто в результате оптимизации параметров нагрузки и использования для предварительной ионизации мишени внешней сборки, выполненной на основе тонких проволочек из вещества (углерода) с малым атомным номером  $Z$ , что позволит уменьшить потери на излучение. Как показывают эксперименты по сжатию внутренней мишени из агар-агара многопроволочным лайнером, при уменьшении атомного номера элемента внешней сборки с вольфрама на алюминий мощность излучения пинча падает, а температура плазмы возрастает. При уменьшении атомного номера материала (углерод) ожидается дальнейшее увеличение температуры плазмы с уменьшением мощности излучения.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-07-00201а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вихрев В.В., Иванов В.В. // Доклады АН СССР. 1985. Т. 282. С. 1106.
2. Яньков В.В. // Физика плазмы. 1991. Т. 17. Вып. 12. С. 521.
3. Nedoseev S.L. // Varenna, Italy, 1990, Satieta Italiana di Fisica. 1991. P. 575.
4. Dan'ko S.A., Kalinin Yu. G., Korchikov A.V. et al. // 6th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Albuquerque, New Mexico, USA, 1992. С. 44.
5. Бакшаев Ю.Л., Блинов П.И., Вихрев В.В., Гордеев Е.М., Данько С.А., Королев В.Д., Медовщиков С.Ф., Недосеев С.Л., Смирнова Е.А., Туманов В.И., Черненко А.С., Шашков А.Ю. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 12. С. 1101.
6. Бакшаев Ю.Л., Брызгунов В.В., Вихрев В.В., Данько С.А., Мещеров Б.Р., Недосеев С.Л., Смирнова Е.А., Устроев Г.И., Черненко А.С., Шашков А.Ю. // Физика плазмы. 2006. Т. 27. № 7. С. 397.
7. Акунец А.А., Брызгунов В.А., Волобуев И.В., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Королев В.Д., Пименов В.Г., Смирнова Е.А., Устроев Г.И. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 7. С. 1.
8. Бакшаев Ю.Л., Брызгунов В.А., Вихрев В.В., Волобуев И.В., Данько С.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Королев В.Д., Клир Д., Мироненко-Маренков А.Д., Пименов В.Г., Смирнова Е.А., Устроев Г.И. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. Вып. 6. С. 516.
9. Александров В.В., Брызгунов В.А., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Волобуев И.В., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Королев В.Д., Лаухин Я.Н., Медовщиков С.Ф., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Пименов В.Г., Смирнова Е.А., Устроев Г.И., Фролов И.Н. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 4. С. 361.
10. Welch D.R., Rose D.V., Thoma C., Clark R.E., Mostrom C.B., Stygar W.A., Leeper R.J. // Phys. Plasmas. 2010. V. 17. P. 072702.
11. Klir D., Kravaric J., Kubes P., Rezac K., Annan'ev S.S., Bakshaev Yu L., Blinov P.I., Chernenko A.S., Kazakov E.D., Korolev V.D., Ustroev G.I., Juha L., Krasa J., Vetyhan A. // IEEE Transaction on plasma science. 2009. V. 37. № 3.
12. Spilman R.B., Balwin G.T., Cooper G. et al. // Sandia Report SAND 98-0705, March 1998.
13. Coverdate C.A., Deeney C., Velikovich, A.L., Davis I, Clark R.W., Chong Y.K., Chittenden G., Chantrenne S., Ruiz C.L., Coopers G.W., Nelson A.J., Franliu J., le Pell P.D., Apruzese J.P., Levine J., Banister J. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 056309.
14. Klir D., Shishlov A.V., Kubes P., Rezac K., Fursov E.I., Kokshenev V.A., Kovalchuc B.M., Kravaric J., Kurmaev N.E., Labritsky A.Yu., Ratakhin N.A. // Physics of Plasmas. 2012. V. 19. P. 032706.
15. Батюнин А.В., Булатов А.Н., Вихарев В.Д., Волков Г.С., Зайцев В.И., Захаров С.В., Комаров С.А., Недосеев С.Л., Никандров Л.Б., Олейник Г.И., Смирнов В.П., Трофимов С.В., Утюгов Е.Г., Федулов М.В., Фролов И.Н., Царфин В.Я. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 9. С. 1027.
16. Klir D., Kravaric J., Kubes P., Rezac K., Cikhhardt J., Litseva E., Hihlik T., Annan'ev S.S., Bakshaev Yu.L., Bryzgunov V.A., Chernenko A.S., Kalinin Yu.G., Kazakov E.D., Korolev V.D., Ustroev G.I., Zelenin A.A., Juha L., Krasa J., Vetyhan A., Vysin L., Sonsky J., Volobuev I.V. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2010. V. 52. 065013.
17. Вихрев В.В., Мироненко-Маренков А.Д. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 3. С. 251.
18. Shutz S.A., Hermann M.C., Vessey R.A., Sefkow A.B., Sinars D.B., Rovang D.C., Peterson K.J., Cuneo M.E. // Physics of plasmas. 17.056303. 2010.
19. Gomez M.R., Slutz, Sefkow A.B., Sinars D.B., Hahn K.D., Hansen S.B., Harding E.C., Knapp P.F., Schmit P.F., Jennings C.A., Awe T.J., Geissel M., Rovang D.C., Chandler G.A., Cooper G.W., Cuneo M.E., Harvey-Thompson A.J., Herrmann M.C., Hess M.H., Johns O., Lampira D.C., Martin M.R., McBride R.D., Peterson K.J., Porter J.L., Robertson G.K., Rochau G.A., Ruiz C.L., Savage M.E., Smith I.C., Stygar W.A., Vesey R.A. // Phys. Rev. Letters. 2014. V. 113. P. 155003.
20. 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.
21. James B.A. Palmer, Lebedev S.V., Bland S.N., Chittenden J.P., Ampleford D.G. // 5-th International Conference on Dense z-pinchs, Albuquerque, Jun. 23–28, 2002. AIP Conference Proceedings. 2002. Т. 651. P. 79–82.
22. Митрофанов К.Н., Грабовский Е.В., Александров В.В., Фролов И.Н., Олейник Г.М., Лаухин Я.Н., Грицук А.Н., Сасоров П.В., Медовщиков С.Ф. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 12. С. 1022.
23. Митрофанов К.Н., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Лаухин Я.Н., Александров В.В., Олейник Г.М., Медовщиков С.Ф., Шевелько А.П. // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 1. С. 71.

24. Кубеш П., Королев В.Д., Бакишев Ю.Л., Блинов И.Л., Иванов М.И., Казаков Е.Д., Краварик Е., Клир Д., Корельский Л.В., Кравченко Е.В., Резак К., Устроев Г.И., Черненко А.С. // Физика плазмы, 2008. Т. 34. № 1. С. 57
25. Волков Г.С., Зайцев В.И., Грабовский Е.В., Федулов М.В., Александров В.В., Лахтюшко Н.И. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 3. С. 211.
26. Альбиков З.А., Велихов Е.П., Веретенников А.И. // Атомная энергия. 1990. Т. 68. Вып. 1. С. 26.
27. Krokhin O.N., Nikulin V.V., Volobuev L.V. // Czechoslovak Journal of Physics. 2004. V. 54. Suppl. P. 359.
28. Олейник Г.М. // ПТЭ. 2000. № 3. С. 49–52.
29. Волков Г.С., Данько С.А., Зенгер П., Зайцев В.И. и др. // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 1. С. 38.
30. Митрофанов К.Н., Грабовский Е.В., Олейник Г.М., Александров В.В., Грицук А.Н., Фролов И.Н., Лаухин Я.Н., Сасоров П.В., Самохин А.А. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 10. С. 866.
31. Александров В.В., Грабовский Е.В., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Смирнов В.П., Сасоров П.В., Фролов И.Н. // Физика плазмы. 2014. Т. 30. Вып. 7. С. 615.
32. 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. Вып. 6. С. 520.