

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ИМПЛОЗИИ КОНУСНО-ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВЛОЖЕННЫХ СБОРОК

© 2021 г. В. В. Александров<sup>а</sup>, А. В. Браницкий<sup>а</sup>, А. С. Болдарев<sup>б</sup>, В. А. Гасилов<sup>б</sup>, Е. В. Грабовский<sup>а</sup>, А. Н. Грицук<sup>а</sup>, К. Н. Митрофанов<sup>а,\*</sup>, О. Г. Ольховская<sup>б</sup>, П. В. Сасоров<sup>а, б, с</sup>

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

<sup>б</sup> Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

<sup>с</sup> Institute of Physics of the ASCR, ELI-Beamlines project, Prague, Czech Republic

\*e-mail: mitrofan@triniti.ru

Поступила в редакцию 15.07.2020 г.

После доработки 05.10.2020 г.

Принята к публикации 06.10.2020 г.

Представлены результаты исследований сжатия плазмы конусно-цилиндрических вложенныхборок смешанного состава при протекании по ним тока до 3 МА на установке Ангара-5-1. Внешний каскад вложенныхборок представлял собой конусную сборку из тонких капроновых волокон или вольфрамовых проволок, а внутренний — цилиндрическую вольфрамовую проволочную сборку. Токовая имплозия такого типа вложенныхборок представляет собой уникальную возможность для моделирования взаимодействия потоков замагниченной плазмы с сильным магнитным полем. В межкаскадном пространстве вложенныхборок имеет место столкновение сверхальфвеновского потока плазмы с внешнего каскада с магнитным полем разрядного тока, протекающего по внутреннему каскаду. В результате такого взаимодействия в пространстве между каскадами реализуются различные режимы течения плазмы: доальфвеновский ( $V_r < V_A$ ), сверхальфвеновский ( $V_r > V_A$ ) и режим с формированием переходной области — ударной волны (УВ) между каскадами, в зависимости от отношения темпов плазмообразования каскадов вложенныхборок и от отношения их радиусов. Образование области УВ в пространстве между каскадами происходит вблизи внутреннего каскада, где кинетическое давление потока плазмы с внешнего каскада уравнивается магнитным давлением разрядного тока внутреннего каскада. Получены новые экспериментальные данные об особенностях образования области УВ вблизи поверхности внутреннего каскада и характере ее изменения в процессе взаимодействия. Применение внешней конусной сборки позволило получать зависимость положения УВ от отношения радиусов внешней и внутреннейборок в одном выстреле. Показано, что взаимодействие плазменных потоков внешней конусной сборки с магнитным полем внутреннего цилиндрического каскада приводит к существенному уменьшению зиппер-эффекта на финальной стадии сжатия плазмы внутреннего каскада и образования пинча. Проведено сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами расчета движения плазмы между каскадами с помощью трехмерного радиационно-магнитогидродинамического кода MARPLE3D.

*Ключевые слова:* имплозия вложенных проволочныхборок, плазма, затянутое плазмообразование, взаимодействие плазмы с магнитным полем, Z-пинч, рентгеновское излучение

DOI: 10.31857/S036729212103001X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросы генерации мощных потоков замагниченной плазмы и взаимодействия их с магнитным полем представляют как фундаментальный, так и практический интерес. Одно из направлений изучения плазменных потоков и создания на их основе мощных источников мягкого рентгеновского излучения (МРИ,  $h\nu > 100$  эВ) по программе УТС тесно связано с токовой имплозией вложенных проволочныхборок [1–11].

В таком типе плазменных лайнеров взаимодействие плазмы, генерируемой внешним каска-

дом, с плазмой внутреннего каскада может привести при определенных условиях к формированию более однородного пространственного распределения плотности плазмы. Это будет способствовать компактному сжатию плазмы пинча на финальной стадии имплозии. Одной из особенностей сжатия плазмы вложенных лайнеров является высокая воспроизводимость параметров импульса мощности МРИ — амплитуды и длительности на половине его высоты. Получены более высокая амплитуда и меньшая длительность импульса МРИ по сравнению с одиночны-

ми многопроволочными сборками. Поэтому результаты экспериментального изучения физических процессов, которые возникают при токовой имплозии вложенныхборок, имеют критически важное значение для исследования фундаментальных процессов взаимодействия высокоскоростного плазменного потока с магнитным полем. Это способствует пониманию физики формирования пространственно-временной структуры Z-пинча, зависимости временного профиля и пиковой мощности импульса рентгеновского излучения от параметров каскадов вложенныхборок. Данные о трехмерной динамике плазмы при имплозии вложенныхборок необходимы для верификации современных радиационных магнитогидродинамических (РМГД-) кодов.

На установке Ангара-5-1 была выполнена серия экспериментальных и теоретических работ [4, 8–13] по исследованию имплозии двухкаскадных вложенных цилиндрическихборок. Информация о распределении разрядного тока (магнитного поля), скорости движения плазмы, которые реализуются в межкаскадном пространстве, а также о временном профиле выходной мощности МРИ, приведена в работе [4]. Возможность стабилизации сжатия плазмы внутреннего каскада была исследована в опытах по токовой имплозии вложенных цилиндрическихборок в работе [8]. Теоретическое описание различных течений плазмы, которые формируются в пространстве между каскадами при сжатии двухкаскадных вложенныхборок, впервые были теоретически рассмотрены в работе [13] в рамках одномерной МГД стационарного течения плазмы. Представлению результатов экспериментального изучения параметров течения плазмы, которое создано в межкаскадном пространстве пенно-проволочныхборок, состоящих из двух полых оболочек, изготовленных из W-проволок и малоплотной пены, посвящена работа [12]. Характерные особенности при токовой имплозии вложенных лайнеров смешанного состава приведены в работе [9]. Результаты исследования режимов течения плазмы, которые возникают при сжатии смешанных по составу вложенных (капрон-вольфрамовых) цилиндрическихборок с различным отношением радиусов внутреннего и внешнего каскадов  $r_{inner}/r_{outer}$ , представлены в работе [10]. Показано, что при имплозии вложенныхборок в зависимости от отношения радиусов каскадов  $r_{inner}/r_{outer}$  и отношения интенсивностей плазмообразования  $\dot{m}_{inner}/\dot{m}_{outer}$  создаются условия для возникновения в межкаскадном пространстве различных режимов взаимодействия плазменного потока и азимутального магнитного поля. Впервые экспериментально зарегистрирован режим движения плазмы, когда в пространстве между каскадами образуется переходная область — область ударной

волны (УВ), где происходит переход от сверхальфвеновского ( $V_r > V_A$ ) течения плазмы к доальфвеновскому ( $V_r < V_A$ ) течению. Расчетные значения плотности плазмы и ее электронной температуры в области локализации УВ, генерируемой при взаимодействии плазменного потока внешнего каскада с азимутальным магнитным полем тока, текущего по плазме внутреннего каскада, составляют  $\sim 50$  мкг/см<sup>3</sup> и 60–70 эВ, соответственно [11]. На основе сравнительного анализа результатов опытов и расчетов предложен механизм взаимодействия плазмы внешнего и внутреннего каскадов вложенныхборок [10, 11]. Показано качественное и количественное согласие результатов выполненных опытов и прогнозных РМГД-расчетов имплозии в ( $r$ - $\phi$ )-геометрии.

Настоящая работа является продолжением упомянутых выше исследований и посвящена изучению процессов взаимодействия потоков замагниченной плазмы и азимутального магнитного поля, которые возникают при имплозии двухкаскадных вложенныхборок с внешним конусным каскадом при протекании токов мегаамперного уровня. В данной работе для формирования трехмерного движения плазменных потоков внутри вложенныхборок используются нагрузки типа двухкаскадных конусно-цилиндрических вложенныхборок. Токовая имплозия внешнего конусного каскада представляет собой уникальную возможность для моделирования трехмерного сжатия потоков замагниченной плазмы и ее взаимодействия с сильным магнитным полем внутреннего цилиндрического каскада, необходимого для понимания физики сжатия плазмы, например, в квазисферических лайнерах [14]. Эксперименты по исследованию взаимодействия потоков токнесущей плазмы с магнитным полем выполнены в условиях высокой плотности электромагнитной энергии, которая достигается на существующих в мире электрофизических установках со сверхвысокой импульсной электрической мощностью. К таким установкам относятся: ZR (20 МА, США); Julong-1 (PTS) (10 МА, КНР); Ангара-5-1 (4 МА, Россия); MAGPIE (1.4 МА, Великобритания) и др.

Данная работа посвящена:

- комплексному экспериментальному и расчетно-теоретическому исследованию в лабораторных условиях взаимодействия мощных сверхбыстрых ( $V_r > 100$  км/с) потоков замагниченной плазмы внешнего каскада с магнитным полем тока, протекающего по внутреннему каскаду;

- изучению процесса взаимодействия высокоскоростного потока плазмы с магнитным полем, при котором в объеме между каскадами исследуемых образцов вложенныхборок происходит формирование области УВ;

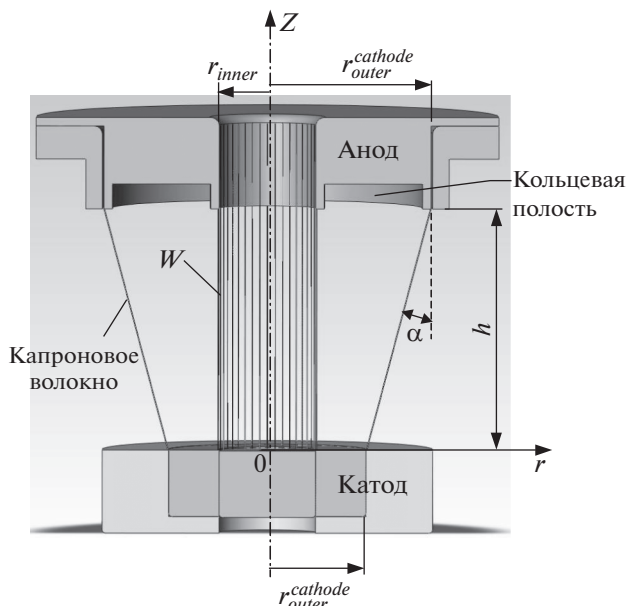
– получению новых экспериментальных данных о форме УВ, а также о ее трансформации во времени при нецилиндрическом характере сжатия плазменных струй внешнего конусного каскада в область сильного магнитного поля ( $\sim 1$  МГс) вблизи поверхности внутреннего каскада;

– выяснения влияния внутреннего цилиндрического каскада на явления, присущие сжатию плазмы конусныхборок (т.н. “зиппер-эффект”);

– применению трехмерных РМГД-расчетов для прогнозирования временной динамики пространственного распределения характеристик плазмы.

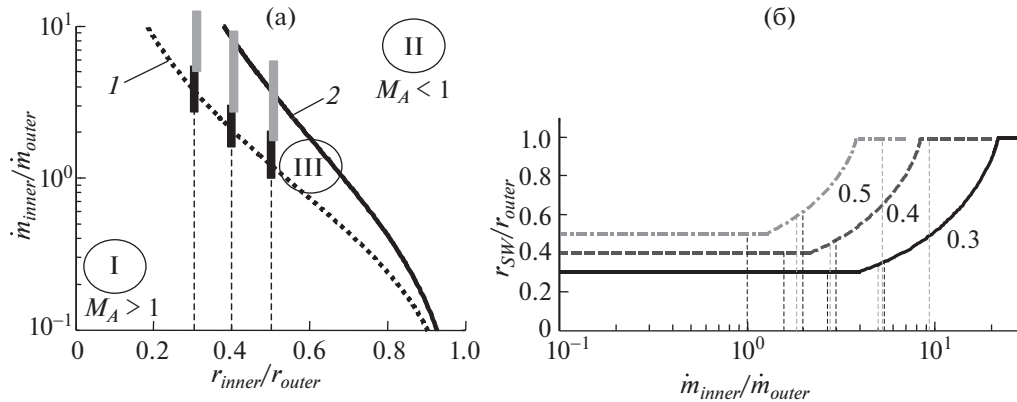
## 2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по сжатию магнитным полем плазмы вложенныхборок проводились на установке Ангара-5-1 [15] с разрядным током 3 МА. Вложенныеборок представляли собой двухкаскадную конструкцию, в которой внешним каскадом могла выступать проволочная или волоконная конуснаяборок, а внутренним каскадом была вольфрамовая проволочнаяборок с большим числом проволок ( $N_{inner} = 40$ ), расположенных на радиусе  $r_{inner} = 3$  мм. Вложенныеборок подключались к электродам установки параллельно. Это обеспечивало одновременное включение тока по внешнему и внутреннему каскадам. Используемый в эксперименте анодный электрод имел кольцевую полость в пространстве между каскадами вложенныхборок, как показано на рис. 1, чтобы исключить из поля зрения диагностических приборов явления, связанные с взаимодействием плазменных потоков с поверхностью анода. В представленных в данной работе экспериментах использовались коническиеборок, у которых  $r_{outer}^{anode} > r_{outer}^{cathode}$ . Для такихборок величина начального радиуса расположения участков проволок (или волокон) внешнего каскада увеличивается по высотеборок в направлении от катода к аноду. Ток между каскадами распределялся в зависимости от соотношения их индуктивностей. Внешний конусный каскад состоял из небольшого числа проволок или волокон ( $N_{outer} = 4$ ), расположенных на радиусах на аноде  $r_{outer}^{anode} = 10$  мм и катоде  $r_{outer}^{cathode} = 6$  мм. Такое малое количество проволок (волокон) во внешнем каскаде было необходимо для того, чтобы они не перекрывали плазму в пространстве между каскадами для рентгеновских и оптических диагностик. Высотаборок  $h$  составляла 16 мм. Диаметр вольфрамовых проволок был 6 мкм и 12 мкм с соответствующими линейными массами 5.5 мкг/см и 22 мкг/см. Диаметр капроновых ( $[-HN(CH_2)_5CO-]_n$ ) волокон был 25 мкм, а линейная масса 5.5 мкг/см.



**Рис. 1.** Общий вид вложенной сборки: внешний каскад – конуснаяборок из 4 капроновых волокон, расположенных на поверхности конуса с радиусом на катоде  $r_{outer}^{cathode} = 6$  мм и на аноде  $r_{outer}^{anode} = 10$  мм; внутренний каскад – цилиндрическаяборок из 40 W-проволок, расположенных на радиусе  $r_{inner} = 3$  мм, высотаборок  $h = 16$  мм.

Использованный в данной серии экспериментов набор диагностических средств обеспечивал получение кадровых изображений сжатия плазмы вложенныхборок в оптическом и рентгеновском диапазонах спектра излучения. Для этого использовалась многокадровая рентгеновская камера, расположенная под углом  $90^\circ$  (СХР6, 10 кадров) к оси вложенныхборок. Пространственное разрешение рентгеновской камеры лежит в диапазоне 200–300 мкм для фотонов с энергией 20–500 эВ. Экспозиция кадров – от 1 нс до 5 нс. Спектральный состав излучения Z-пинча вложенныхборок регистрировался при помощи интегрального по времени ВУФ-спектрографа (GIS-3d) скользящего падения с пространственным и временным разрешением. Пространственное разрешение спектрографа составляло для энергии квантов  $\sim 60$  эВ порядка 500 мкм, для энергии квантов  $\sim 300$  эВ порядка 250 мкм, спектральное разрешение  $\lambda/\delta\lambda \sim 100$ . Регистрация спектров излучения осуществлялась в три момента времени, для чего в спектрографе использовалась система на основе трехсекционной микроканальной пластины с последующей регистрацией спектров на ПЗС-матрицу фотоаппарата, время экспозиции кадров  $\sim 1.5$  нс. Трехкадровое теневое зондирование (LAS) осуществлялось световым пучком лазера EXPLA SL233 на  $\lambda = 532$  нм с регистрацией на цифровые фотоаппараты Canon EOS



**Рис. 2.** Результаты одномерного МГД-моделирования: а) — зависимости критического отношения темпов плазмообразования на внутреннем и внешнем каскадах вложенного двухкаскадного лайнера от отношения их радиусов. По оси ординат — логарифмический масштаб. В области I ниже кривой 1 движение плазмы между каскадами всюду сверхальфвеновское ( $M_A > 1$ ). В области II выше кривой 2 движение плазмы между каскадами всюду доальфвеновское ( $M_A < 1$ ). В области III между кривыми 1 и 2 в пространстве между каскадами течение из сверхальфвеновского становится доальфвеновским при переходе через ударную волну сжатия (УВ). ■ и ■ — прогноз режима течения плазмы между каскадами согласно выражению (3) для капрон-вольфрамовой и вольфрам-вольфрамовой вложенных сборок соответственно при различных отношениях их радиусов  $r_{inner}/r_{outer}$ ; б) — зависимости радиуса  $r_{SW}$  (нормированного на  $r_{outer}$ ) расположения области УВ в пространстве между каскадами от отношения  $\dot{m}_{inner}/\dot{m}_{outer}$  при различных отношениях их радиусов  $r_{inner}/r_{outer} = 0.3, 0.4$  и  $0.5$ . По оси абсцисс — логарифмический масштаб.

450D. Пространственное разрешение лазерной диагностики было не хуже 50–100 мкм. Время экспозиции лазерным пучком около 0.6 нс. Камера щелевой оптической развертки (регистратор СФЭР-2) с радиальным пространственным разрешением (около 150 мкм) позволяла регистрировать сжатие плазмы внешнего и внутреннего каскадов вложенныхборок на различных высотах  $H_1 = 0.2$  см и  $H_2 = 0.6$  см над поверхностью катода с временным разрешением не хуже 0.3 нс. Производная тока и напряжение измерялись 8-петельным датчиком тока и индуктивным делителем напряжения соответственно. Мягкое рентгеновское излучение ( $h\nu > 20$  эВ) регистрировалось набором вакуумных рентгеновских диодов за различными фильтрами.

2.1. Режимы формирования плазменных потоков в двухкаскадных вложенныхбороках

Существует несколько режимов течения плазмы между каскадами вложенныхборок, рассмотренных ранее в рамках стационарной 1D МГД-модели в работах [9, 13] и полученных в экспериментах [10–12]. В этих работах сделан прогноз реализуемости того или иного режима течения плазмы, выбраны конструкции и состав веществ вложенных лайнеров. Теоретически предсказано и экспериментально проверено, что реализация одного из трех типов течения плазмы между каскадами: режима I (сверхальфвеновский,  $V_r > V_A$ ), режима II (доальфвеновский,  $V_r < V_A$ ) и режима III с формированием переход-

ной области — ударной волны (УВ) между каскадами зависит от соотношения интенсивностей плазмообразования на внутреннем и внешнем каскадах  $\dot{m}_{inner}/\dot{m}_{outer}$  и отношения радиусовборок  $r_{inner}/r_{outer}$ , как показано на рис. 2а.

Известно [16], что интенсивность плазмообразования  $\dot{m}$  [мкг/(см<sup>2</sup>·нс)], необходимая для поддержания стационарного радиального истечения плазмы из области плазмообразования без учета дискретного расположения проволок в многопроволочныхбороках, выражается следующим образом [17, 18]:

$$\dot{m}(t) = K_m \left( \frac{I(t)}{R_0} \right)^\mu, \tag{1}$$

где  $I(t)$  — полный ток через проволочную сборку (в МА) — полный ток в системе,  $R_0$  — начальный радиус сборки (в см),  $K_m$  [мкг/(нс · МА<sup>2</sup>)] — коэффициент, зависящий от вещества проволок (напр. для W-проволок и капроновых волокон —  $K_m^W = (0.125–0.18)$  и  $K_m^{kapron} = (0.04–0.07)$  соответственно) или металлизированных различными веществами (Al, In, Sn, Bi) волокон [19–23],  $\mu \approx 1.5–2.0$ .

Для внешнего каскада в виде конической сборки, изготовленной из проволок или волокон одного вещества (в нашем случае вольфрама или капрона), величина  $\dot{m}_{outer}(t)$  вдоль длины проволок согласно выражению (1) будет, в основном, определяться не только известной для W-проволок или капроновых волокон величиной коэф-

фициента  $K_m$ , но и отношением  $\left(\frac{I_{outer}(t)}{R_0(z)}\right)^\mu$ . Изменив в эксперименте временную зависимость тока  $I_{outer}(t)$  через коническую проволочную сборку, фактически, остается неизвестным характер зависимости интенсивности плазмообразования от начального радиуса расположения проволок в виде  $1/R_0^\mu(z)$ . Данная зависимость означает, что чем меньше радиус окружности  $R_0(z)$  расположения участка проволоки (волокна), тем выше интенсивность плазмообразования вещества на данном участке.

Определение момента времени окончания плазмообразования вдоль длины проволок в такой сборке позволило высчитать данную зависимость экспериментально [24]. Согласно полученным данным интенсивность плазмообразования вещества проволок для одиночных конических проволочныхборок, с учетом выражения (1), будет зависеть от  $z$  вдоль оси сборки и угла раствора конуса  $\alpha$  следующим образом

$$\dot{m}(z, t) \propto \left( \frac{I(t)}{r_{cathode} + z \cdot \operatorname{tg}\alpha} \right)^\mu \quad (2)$$

Благодаря этому, имплозия конического лайнера отличается от имплозии обычного цилиндрического лайнера, включая возникновение радиальной компоненты тока, изменение вдоль оси  $Z$  конического лайнера азимутального магнитного поля  $B_\phi(z, t) = 0.2I(t)/(r_{cathode} + z \cdot \operatorname{tg}(\alpha))$  и межпроволочного расстояния  $\Delta(z) = 2\pi r_{cathode}/N + z \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$ . Эти особенности имплозии конусной сборки делают такой лайнер полезным инструментом для изучения физических явлений на различных стадиях процесса плазмообразования и формирования  $Z$ -пинча на основе проволочных и волоконныхборок. Именно поэтому, в качестве внешнего каскада вложенныхборок был выбран лайнер конической формы. У такого типа вложенныхборок, на основании вышесказанного, отношение  $\dot{m}_{inner}/\dot{m}_{outer}$  изменяется по высотеборок (вдоль оси  $Z$ ).

Изменение вещества внешнего каскада (капрон или вольфрам) и радиуса внешнего каскада  $R_0(z)$  за счет его конической формы позволило менять в наших экспериментах отношение  $\dot{m}_{inner}/\dot{m}_{outer}$  в широких пределах, на порядок величины, в соответствии с формулами (1) и (2) согласно следующему выражению

$$\frac{\dot{m}_{inner}}{\dot{m}_{outer}} = \frac{K_m^{inner}}{K_m^{outer}} \left( \frac{I_{inner}}{I_{outer}} \right)^\mu \left( \frac{r_{outer}}{r_{inner}} \right)^\mu \quad (3)$$

На основании этого же выражения сделан прогноз реализации того или иного режима течения плазмы в пространстве между внешним коническим и внутренним цилиндрическим каскадами

при следующих параметрах:  $r_{inner}/r_{outer} = 0.5, 0.4, 0.3$ ;  $I_{inner}/I_{outer} = 0.5-0.7$ ;  $K_m^{inner}/K_m^{outer} = 1$  – для W-проволочныхборок и  $K_m^{inner}/K_m^{outer} = 1.8-3.0$  – для капроновой сборки во внешнем каскаде и W-сборки во внутреннем каскаде. Из прогноза следует (см. столбики ■ и ■ на рис. 2а), что в широком диапазоне отношений радиусов  $r_{inner}/r_{outer} \in (0.3; 0.5)$ , которые соответствуют прикатодной и прианодной области вложенныхборок, практически по всей высоте зазора анод-катод, в пространстве между каскадами должна наблюдаться область УВ.

На рис. 2б показана рассчитанная по 1D МГД-модели зависимость радиуса расположения области УВ  $r_{SW}$  (нормирован на  $r_{outer}$ ) в пространстве между каскадами от отношения темпов плазмообразования на каскадах  $\dot{m}_{inner}/\dot{m}_{outer}$  для различных значений отношений радиусов каскадов  $r_{inner}/r_{outer} = 0.3, 0.4$  и  $0.5$ , которые соответствуют позициям вдоль высоты внешнего конического каскада с координатами:  $z = 1.6$  см (анод),  $z = 0.8$  см и  $z = 0$  (катод). На основании прогноза, сделанного по выражению (3), из данных рис. 2б следует, что положение области УВ должно меняться вдоль оси  $Z$ , т.е. радиус  $r_{SW}$  расположения УВ должен увеличиваться по высоте вложенной сборки в направлении от катода к аноду. Вблизи катода, где отношение радиусов  $r_{inner}/r_{outer} = 0.5$ , радиус  $r_{SW} \approx 0.3-0.35$  см, а вблизи анода, где отношение радиусов  $r_{inner}/r_{outer} = 0.3$ , радиус  $r_{SW}$  больше, чем у катода и лежит в диапазоне  $0.35-1.0$  см. Следует ожидать, что в эксперименте область УВ будет в основном прижата к поверхности внутреннего каскада в прикатодной части и несколько отстоять от этой поверхности в середине высоты сборки и в ее прианодной части.

Очевидно, что в эксперименте не реализуется стационарного течения плазмы в пространстве между каскадами, и поэтому, на разных стадиях имплозии вложенныхборок, вначале возможно существование сверхальфвеновского течения плазмы с внешнего каскада. При увеличении доли тока по внутреннему каскаду, возможно существование течения плазмы с УВ, меняющей со временем свое положение в направлении от внутреннего каскада к внешнему каскаду. Далее, область УВ может разрушаться под воздействием неустойчивостей плазмы, развивающихся на финальной стадии имплозии, когда закончилось плазмообразование. Таким образом, экспериментальное наблюдение области УВ является некоторым индикатором реализации того или иного режима течения плазмы в пространстве между каскадами вложенныхборок.

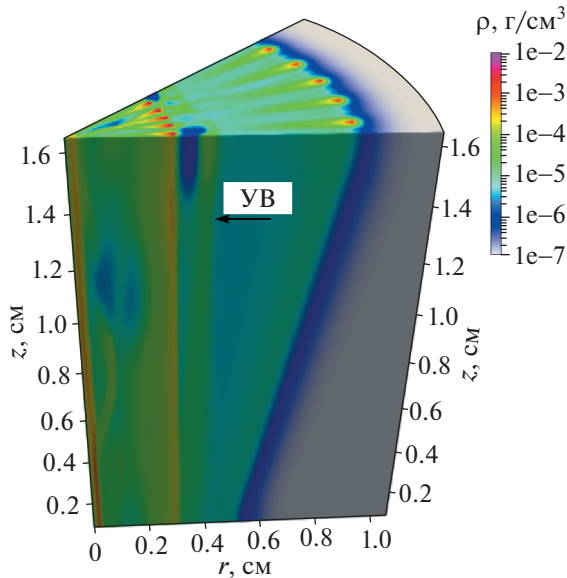


Рис. 3. Пример расчетного распределения плотности плазмы во вложенных сборках. “УВ” – положение области УВ.

### 2.2. Численные модели

Для моделирования имплозии плазмы вложенныхборок был использован трехмерный РМГД код MARPLE3D, разработанный в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [25, 26]. Данные по уравнениям состояния и оптическим свойствам вещества были рассчитаны с помощью программы THERMOS (разработка ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) [27]. Для описания испарения проволок под действием разрядного тока применяется полуэмпирическая модель (1), учитывающая экспериментальные данные о продолжительности плазмообразования. Программная реализация источника плазмы позволяет воспроизводить магнитное поле отдельных проволок сборки и в промежутках между ними, а также моделировать неоднородное распределение массы и несинхронность окончания плазмообразования вдоль длины проволоки.

Все расчеты выполнялись для вложенныхборок смешанного состава, у которых внешний конический каскад состоял из 4-х капроновых волокон, а внутренний цилиндрический каскад – из 40-ка вольфрамовых проволок. Аксиальные неоднородности на данном этапе моделирования не рассматривались. Остальные параметрыборок были такие же, как показано на рис. 1. Модельный ток генератора задавался следующей функциональной зависимостью  $I(t) = I_0 \sin^2(\pi t/2T)$  и примерно соответствовал экспериментально измеренной временной зависимости полного тока. Амплитуда разрядного тока –  $I_0 = 4$  МА,  $T = 100$  нс – время нарастания тока до максимума.

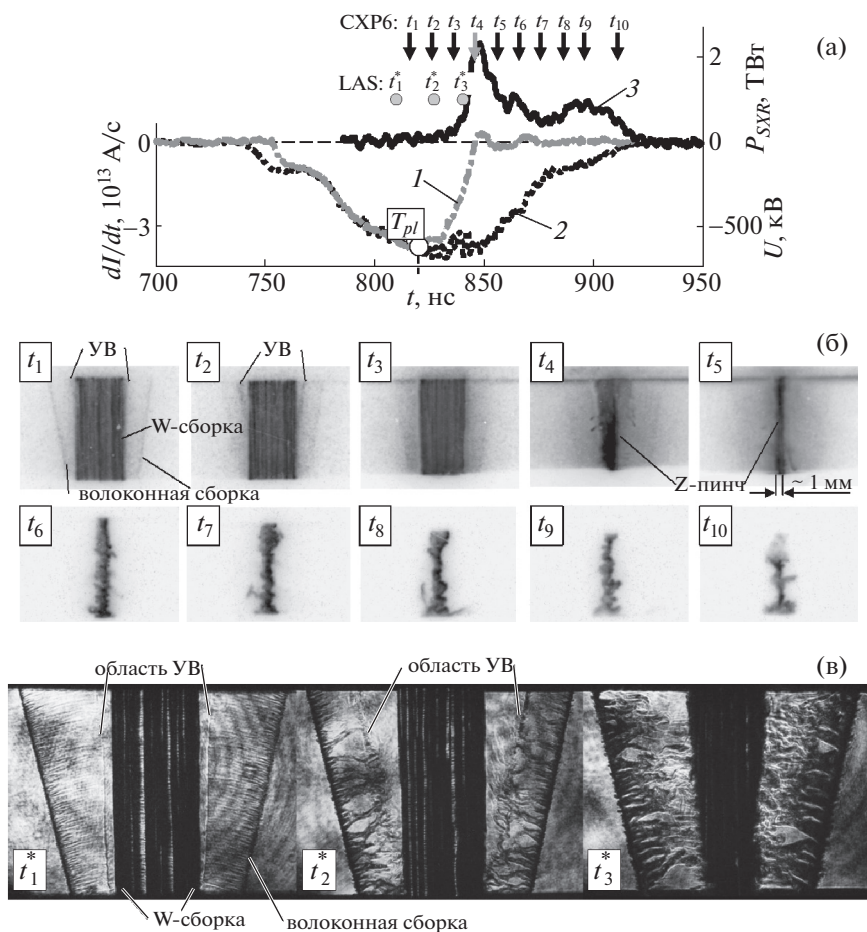
Расчеты выполнялись в области, имеющей форму сектора  $45^\circ$  (или  $90^\circ$ ) с периодическими граничными условиями, которая соответствует  $1/8$  (или  $1/4$ ) части разрядной камеры установки Ангара-5-1 с 5 (или 10) проволоками сборки во внутреннем каскаде (см. рис. 3). Разрешение расчетной сетки было 50 мкм на радиусе внешнего каскада, 7 мкм вблизи оси сборки и 140–160 мкм вдоль оси  $Z$ . Зазор между проволоками во внутреннем каскаде был разрешен на 20 расчетных ячейках, что позволяет надежно воспроизводить движение плазменных струй до момента их слияния по азимутальному углу.

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### 3.1. Эксперименты с капрон-вольфрамовыми вложенными сборками

Результаты экспериментов с цилиндрическими вложенными сборками смешанного состава были представлены ранее в работе [11]. Было показано, что в пространстве между каскадами могут быть реализованы различные режимы течения плазмы между сборками в зависимости от скорости плазмообразования и соотношения радиусов каскадов, а при определенном соотношении между радиусами каскадов образуется замкнутая плазменная оболочка вокруг внутреннего каскада. В представленных в этой работе экспериментах с конусными сборками, отношение радиусов каскадов  $r_{inner}/r_{outer}$  меняется с высотой, и это позволяет в одном выстреле получить пространственно-временную зависимость формирования области ударной волны вблизи внутреннего цилиндрического каскада (W-сборки) от геометрических параметров каскадов.

На рис. 4–6 представлены кадровые рентгеновские и лазерные теневые изображения сжимающейся плазмы в таких вложенных сборках. Из рис. 4б, в видно, что на стадии плазмообразования в моменты времени  $t < T_{pl}$  на кадровых изображениях (см. кадры  $t_1, t_2$  и кадры  $t_1^*, t_2^*$ ) зарегистрировано образование области ударной волны (УВ) в пространстве между каскадами, вблизи внутреннего каскада, где кинетическое давление потока плазмы с внешнего каскада уравновешивается магнитным давлением разрядного тока внутреннего каскада, т.е., когда  $1/2\rho V_r^2 \approx (B_{inner})^2/8\pi$ . Форма ударной волны, а также ее трансформация во времени, как следует из характеристик расположения области УВ в  $(r-z)$ -плоскости (см. рис. 7а–в), указывает на смещение области баланса кинетического и магнитного давлений в теле потока плазмы в направлении от поверхности внутреннего каскада в сторону внешнего каскада. Это происходит из-за перераспределения разрядного тока между каскадами в процессе длительного плазмообразования за счет переключения суще-



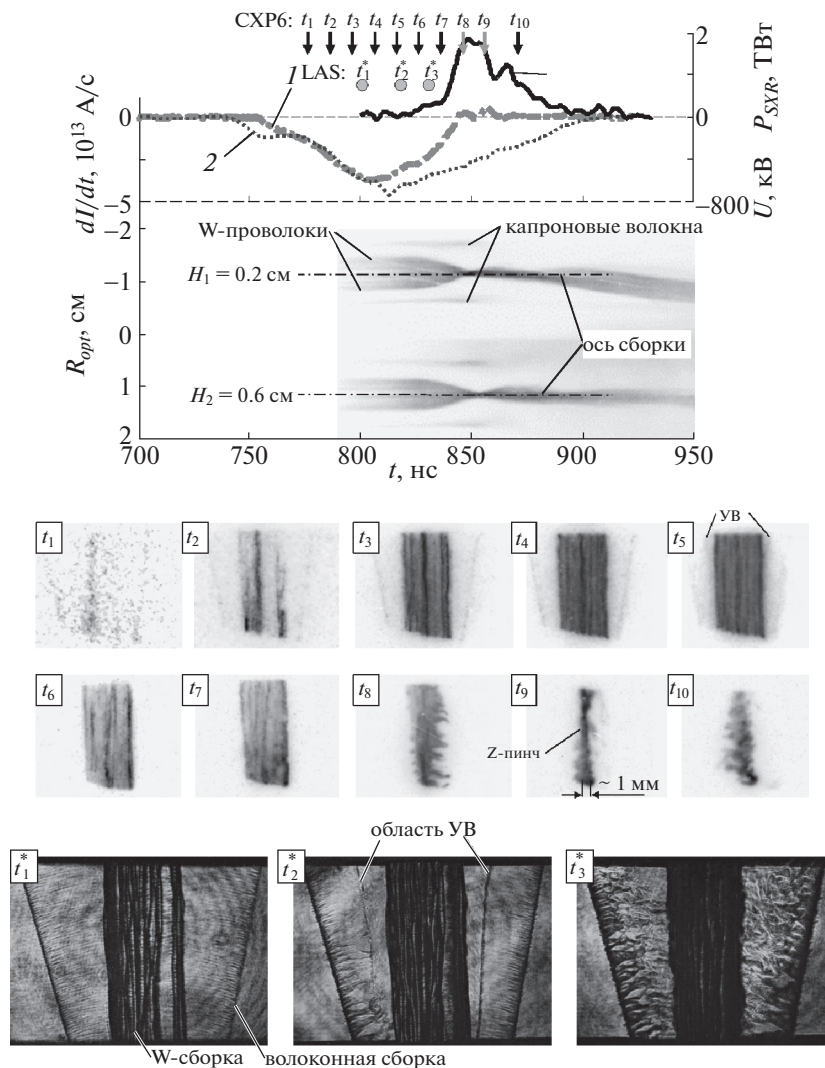
**Рис. 4.** Результаты эксперимента с вложенными сборками (выстрел № 6279): **внешний каскад** коническая сборка из 4 капроновых 25 мкм волокон, линейной массы 22 мкг/см, радиус сборки – 10/6 мм; **внутренний каскад** сборка из 40 W 6 мкм проволоки, линейной массы 220 мкг/см, радиус сборки – 3 мм. Высотаборок – 16 мм: а) – временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения на сепаратресе; 3 – импульса мощности МРИ в спектральном диапазоне  $h\nu > 100$  эВ; б) – рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии вложенной сборки, синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми. Там же времена кадров  $t_1$ – $t_{10}$  указаны вертикальными стрелками ( $\downarrow$ СХР6). Анод – вверх, катод – вниз; в) – кадровые изображения (позитив) плазмы вложенныхборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров  $t_1^*$ – $t_3^*$  указаны кружками ( $\bullet$  LAS). Анод – вверх, катод – вниз.

ственной доли тока во внутренний каскад. Таким образом, перемещение области ударной волны в межкаскадном пространстве вложенныхборок является визуальным индикатором изменения характеристик потоков плазмы (ее плотности и кинетической энергии). Ширина области УВ в радиальном направлении, определенная по лазерному кадровому изображению ее тени составила не более 150–200 мкм (см. рис. 7г).

Следует отметить, что интенсивности свечения плазмы в области ударной волны хватает, чтобы уверенно регистрировать ее на кадровых рентгеновских изображениях с наносекундной длительностью экспозиции (см. рис. 4б, рис. 5б и рис. 6б). Данный экспериментальный факт позволяет сделать убедительный вывод о том, что область УВ, которая индуцирована столкновением потока капроновой плазмы с магнитным полем

внутреннего каскада еще на стадии плазмообразования в процессе имплозии вложенныхборок, является достаточно интенсивным источником рентгеновского излучения. Необходимо учитывать радиационное воздействие такого источника излучения на характеристики состояния плазменной оболочки, формирующейся из вещества внутреннего каскада перед стадией финального сжатия вложенной двухкаскадной сборки.

В последующие моменты времени  $t > T_{pl}$  (см. лазерные и рентгеновские кадры на рис. 4–6), а также оптические щелевые развертки радиально-го сжатия плазмы, наблюдается финальное сжатие плазмы и разрушение области УВ неустойчивостями плазменного потока с внешнего каскада. При этом плазма внутреннего каскада (W-сборки) сжимается без видимых неоднородностей, присущих развитию магнитной Релей-Тейлоров-



**Рис. 5.** Результаты эксперимента № 6281 с вложенными сборками: внешний каскад – коническая сборка из 4 капроновых 25 мкм волокон, линейной массы 22 мкг/см. Радиус сборки – 10/6 мм; внутренний каскад – цилиндрическая сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см. Радиус сборки – 3 мм, высота вложенныхборок – 16 мм: а) – временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения; 3 – импульса мощности МРИ в спектральном диапазоне  $h\nu > 100 \text{ эВ}$ ; изображения (негатив) сжатия плазмы, полученные с помощью оптических радиальных разверток, синхронизированные с представленными на рис. (а) кривыми. Щели оптических разверток расположены на высотах  $H_1 = 0.2 \text{ см}$  и  $H_2 = 0.6 \text{ см}$  над поверхностью катода; б) – рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии вложенной сборки, синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми, где времена регистрации кадров  $t_1$ – $t_{10}$  указаны вертикальными стрелками ( $\downarrow$ СХР6). Анод – вверх, катод – внизу; в) – кадровые изображения (позитив) плазмы вложенныхборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров  $t_1^*$ – $t_3^*$  указаны вертикальными стрелками ( $\bullet$  LAS) на рис. (а). Анод – вверх, катод – внизу.

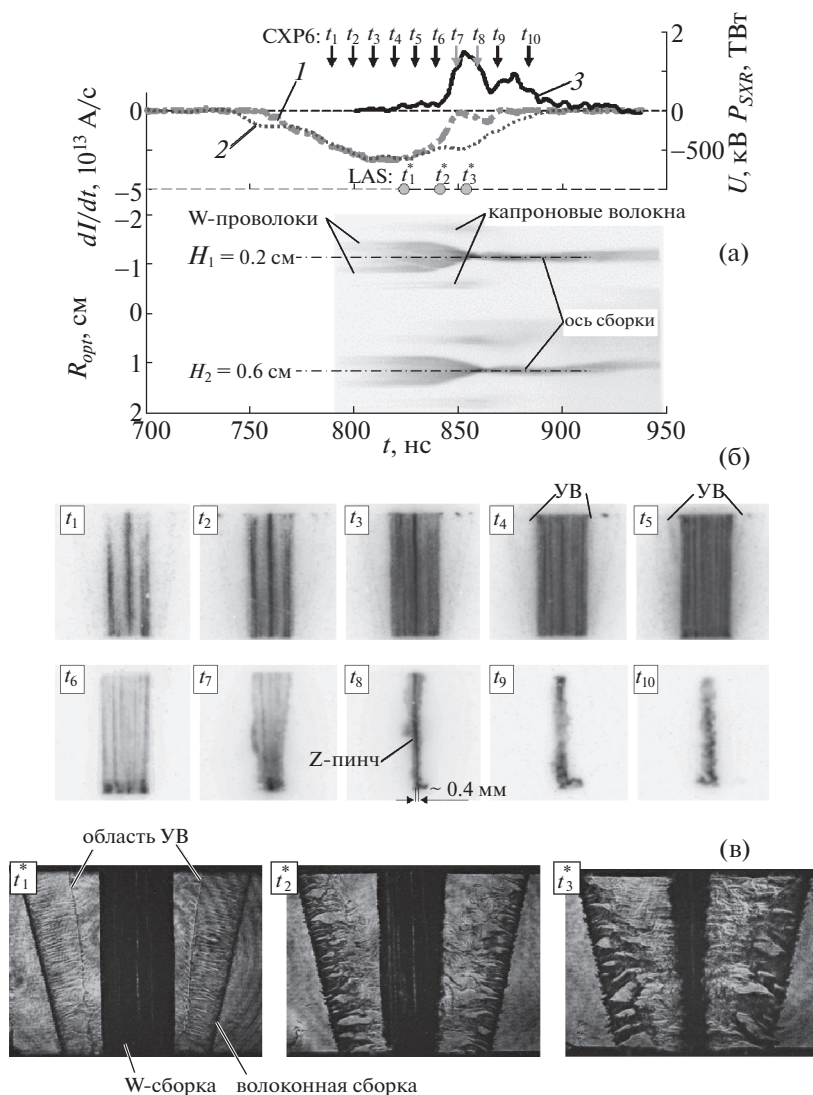
ской неустойчивости при сжатии одиночных W-борок. Как следствие этого процесса, в моменты времени  $t_4$  и  $t_5$  (см. рентгеновские кадры на рис. 4б) или  $t_8$  на рис. 5б, близкие к моменту максимума импульса мощности МРИ (см. кривую 3 на рис. 4а), на оси вложенныхборок образуется компактный (диаметр ~ 1 мм) и устойчивый пинч. К моменту максимального сжатия плазмы, определенному по изображениям оптических щелевых разверток (см. рис. 5а и 6а) и максимуму импульса мощности МРИ, на последовательных кадровых

рентгеновских изображениях процесса имплозии вокруг Z-пинча отсутствует отстающая излучающая плазма с высоким атомным номером.

### 3.2. Эксперименты с вольфрамовыми вложенными сборками

Известно, что при сжатии одиночных проволочныхборок наблюдается влияние на компактность сжатия Z-пинча явлений, связанных с “zipper-эффектом” – несинхронностью сжатия

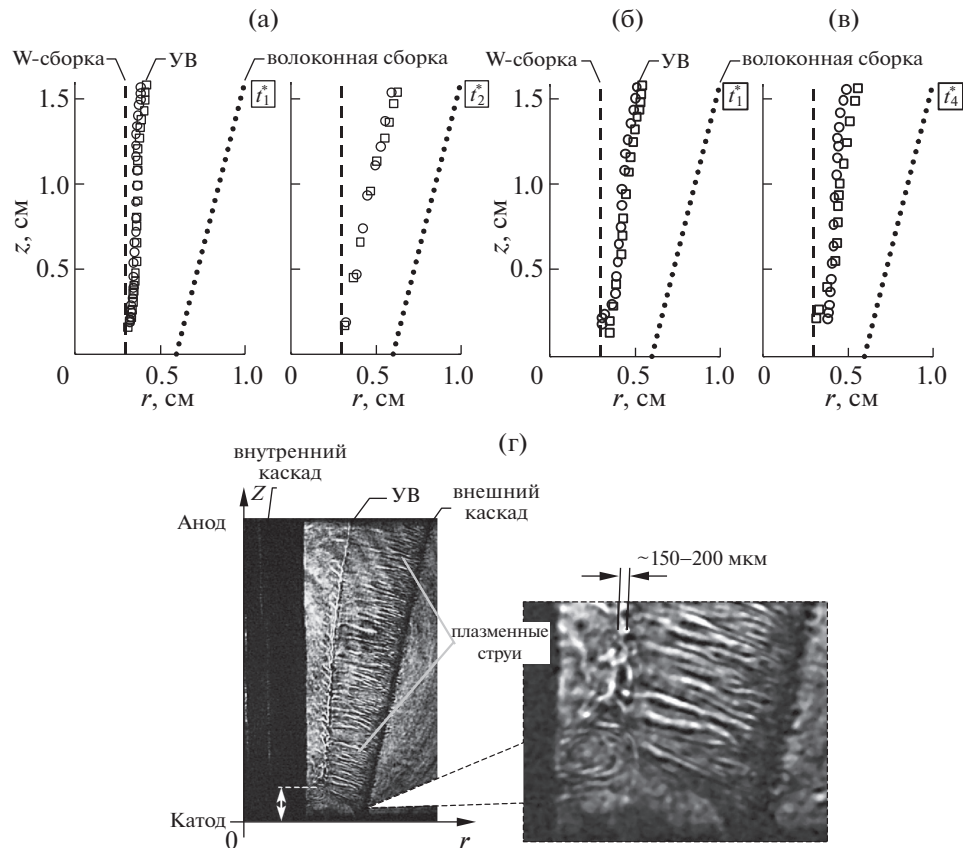




**Рис. 6.** Результаты эксперимента № 6283 с вложенными сборками: внешний каскад – коническая сборка из 4 капроновых 25 мкм волокон, линейной массы 22 мкг/см. Радиус сборки – 10/6 мм; внутренний каскад – цилиндрическая сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см. Радиус сборки – 3 мм, высота вложенных сборок – 16 мм: а) – временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения; 3 – импульса мощности МРИ в спектральном диапазоне  $h\nu > 100$  эВ; изображения (негатив) сжатия плазмы, полученные с помощью оптических радиальных разверток, синхронизированные с представленными кривыми. Щели радиальных оптических разверток расположены на высотах  $H_1 = 0.2$  см и  $H_2 = 0.6$  см над поверхностью катода; 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 вложенныхборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров  $t_1^*$ – $t_3^*$  указаны вертикальными стрелками ( $\bullet$  LAS) на рис. (а). Анод – вверху, катод – внизу.

плазмы по высоте пинча (в основном от катода к аноду), которая приводит к увеличению длительности импульса МРИ и снижает его мощность [28, 29]. Методы компенсации влияния зиппер-эффекта: за счет нанесения дополнительной массы в прикатодной части проволок в сборке или за счет небольшого увеличения начального радиуса расположения проволок вблизи катода по сравнению с начальным радиусом лайнера у анода, были успешно применены в экспериментах по

имплозии квазисферических проволочных лайнеров [14]. Другим методом на установке Sphinx (до 5 МА,  $\Delta t = 600$  нс) [30] показано положительное влияние “медленного” предимпульса (10 кА,  $\Delta t = 50$  мкс) на уменьшение зиппер-эффекта сжатия плазмы. В работе [31] на установке Z исследовалось влияние зиппер-эффекта на синхронность выхода рентгеновского излучения в радиальном и аксиальном направлениях вложенных проволоч-



**Рис. 7.** Восстановленная пространственно-временная характеристика поведения области УВ в пространстве между каскадами вложенныхборок в  $(r-z)$ -плоскости по результатам обработки кадровых теневых изображений вложенныхборок: а) — по данным рис. 4в; б) — по данным рис. 5б; в) — по данным рис. 5в.  $\circ$  — УВ, расположенная слева от оси сборки;  $\square$  — УВ, расположенная справа от оси сборки; г) — пример лазерного теневого изображения меж-каскадного пространства вложенныхборок. Во врезке к рисунку показан увеличенный фрагмент прикатодной области вложенныхборок.

ныхборок с целью применения их в схеме “динамический хольраум” для ИТС.

В наших экспериментах исследовалось влияние внутреннего цилиндрического каскада на проявление зиппер-эффекта на финальной стадии имплозии вложенных конусно-цилиндрическихборок из вольфрамовых проволок. При помощи камеры оптической развертки с пространственным разрешением вдоль оси  $Z$  измерялось время  $\Delta t_z$  распространения сжатия плазмы в направлении от катода к аноду в приосевой областиборок. В эксперименте, результаты которого представлены на рис. 8а, время  $\Delta t_z$  составило около 6–7 нс. С другой стороны, по данным многокадровой регистрации рентгеновских изображений следует, что зиппер-эффект на финальной стадии имплозии вложенныхборок составляет промежутки времени между 2-мя соседними кадрами (см. кадры  $t_7$  и  $t_8$  на рис. 8б) — 10 нс. По порядку величины это соответствует промежутку времени  $\Delta t_z$ , определенному по данным оптической развертки.

Сделаем “грубую” оценку такой несинхронности сжатия плазмы конической сборки в случае, если бы на пути ее сжатия отсутствовала плазма внутреннего каскада (W-цилиндрической сборки), т.е. для одиночной конусной сборки. Скорость сжатия плазмы внешнего каскада (конусной сборки) на финальной стадии имплозии была определена по данным многокадровой регистрации рентгеновских изображений (см. рис. 8б) и составила величину  $\sim (1-2) \times 10^7$  см/с. Разница времен прихода плазмы на ось сборки с “большого” ( $r_{outer}^{anode}$ ) и “малого” ( $r_{outer}^{cathode}$ ) радиусов, учитывая, что вектор скорости плазменных потоков из области плазмообразования перпендикулярен поверхности взорванной проволоки [32–34], составляет около 15–30 нс.

Сделанная выше оценка величины разницы времен прихода плазмы на ось сборки с радиусов  $r_{outer}^{anode}$  и  $r_{outer}^{cathode}$  для однокаскадной конусной сборки в несколько раз больше промежутка времени, определенного из анализа изображения шелевой оптической развертки свечения плазмы на рис. 8а

при имплозии вложенной конусно-цилиндрической сборки и равного  $\Delta t_z \sim 6\text{--}7$  нс.

Таким образом, использование конусной сборки во внешнем каскаде не привело к существенно-му развитию зиппер-эффекта на финальной стадии сжатия плазмы внутреннего каскада и образования пинча. Скорее всего, это обусловлено эффективным взаимодействием плазменных потоков внешнего конического каскада с магнитным полем внутреннего каскада цилиндрической формы.

Также, как и при имплозии смешанных по составу капрон-вольфрамовых вложенныхборок, во вложенных вольфрамовых сборках зарегистрировано формирование области УВ в пространстве между каскадами (см. лазерные теневые изображения на рис. 8в в моменты времени  $t_2^*$  и  $t_3^*$ ). Одним из основных отличий имплозии вольфрамовых вложенныхборок от имплозии вложенныхборок смешанного состава с внешним каскадом из капрона, является присутствие отставшей плазмы с высоким атомным номером вещества внешнего каскада (вольфрама). В данном случае на рентгеновских кадровых изображениях (см. рис. 8б) в момент максимума импульса МРИ (кадр  $t_7$ ) вокруг пинча диаметром  $\sim 1$  мм зарегистрирована излучающая отставшая плазма.

Спектральные измерения, выполненные с помощью ВУФ-спектрографа (GIS-3d) с пространственным (вдоль высотыборок) и временным разрешениями, также демонстрируют особенности динамики сжатия плазмы вложенныхборок, у которых внешний каскад имеет коническую форму. На рис. 9 представлены результаты обработки кадровых спектральных измерений в моменты времени  $t_1'$  и  $t_2'$  за 5 нс до и через 5 нс после максимума импульса мощности МРИ, которые отмечены двумя вертикальными стрелками ( $\uparrow$ GIS) на рис. 8а. Из представленных спектральных плотностей мощности МРИ следует, что, вследствие наклона проволок во внешнем каскаде сборки, при токовой имплозии плазма сжимается неоднородно в аксиальном направлении. При этом максимум спектральной мощности излучения пинча из разных областей лайнера: прикатодной, прианодной или в его середине (по высоте), соответствует разным длинам волн. Такая картина аналогична распределению излучения пинча по высоте в обычных конусных сборках (см. рис. 10а).

Электронную (спектральную) температуру плазмы в этих областях можно оценить по максимуму спектра  $\lambda_{max}$  [Å] в предположении черного источника излучения  $T_{spectr} = 2431/\lambda_{max}$  [эВ] (см. рис. 9). В экспериментах с вложеннымиборками она лежит в диапазоне  $T_{spectr} \approx 30\text{--}37$  эВ для момента времени  $t_1'$ , а для момента времени  $t_2'$  — в диапазоне 23–26 эВ. В случае одиночной

конусной сборки температура, полученная из интегральных по времени спектров (см. рис. 10а), аналогично падает в направлении от катода к аноду и находится в диапазоне 33–43 эВ. В то же время, в случае имплозии цилиндрическихборок спектральное распределение излучения пинча является аксиально-однородным, и максимумы в спектрах излучения пинча из прианодной и прикатодной областей совпадают (см. рис. 10).

Присутствие вокруг цилиндрической сборки внешнего конусного каскада (даже из небольшого числа проволок или волокон) приводит к изменению пространственного распределения магнитного поля вокруг нее, и, как следствие, к изменению темпа плазмообразования в цилиндрическойборке. В свою очередь, это приводит к изменению характера имплозии такой вложенной сборки.

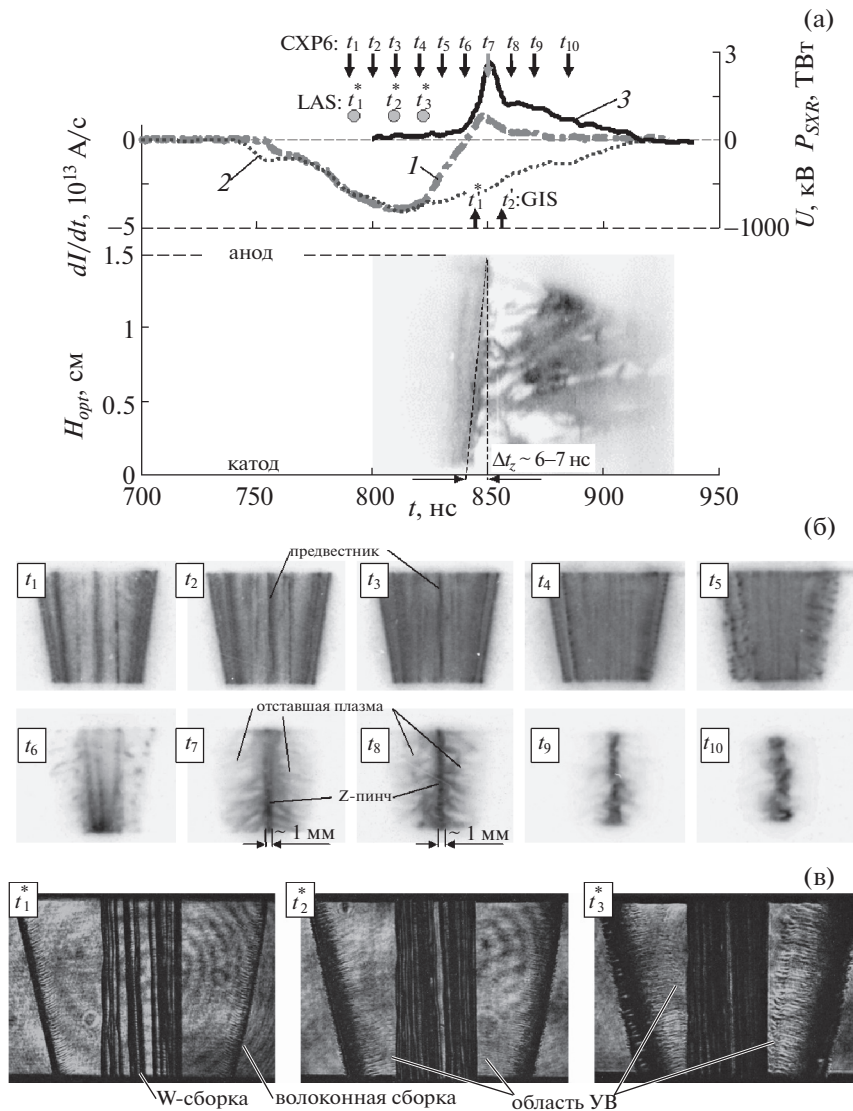
Следует отметить, что моменты времени  $t_1'$  и  $t_2'$  соответственно близки к моментам времени  $t_6$  и  $t_8$  кадровых изображений, представленных на рис. 8б, на которых зарегистрировано появление рентгеновского излучения вначале в прикатодной области, а позже в прианодной области вложенной сборки. Таким образом, отсюда следует, что изменением формы внешнего каскада можно управлять характером сжатия внутренней цилиндрической сборки, параметрами импульса МРИ и его спектром излучения. Это, в дальнейшем, можно использовать для реализации квазисферической имплозии во вложеннойборке.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ 3D РМГД-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведено численное РМГД-моделирование сжатия плазмы вложенныхборок смешанного состава, у которых внешний каскад был конусной волоконнойборкой, а внутри располагалась цилиндрическая вольфрамовая проволочнаяборка. Параметры каскадов были такие же, что и в представленных ранее в данной статье экспериментах.

На рис. 11 представлены рассчитанные распределения плотности плазмы  $\rho(r, z, t_i)$  в  $(r\text{--}z)$ -плоскости на различные моменты времени  $t_i$  имплозии вложенныхборок. Вначале, к 62 нс разряда, область УВ прижата к поверхности внутреннего цилиндрического каскада (см. рис. 11а). Далее, начиная с 65 нс и вплоть до 80 нс имплозии, область УВ отходит от внутреннего каскада в сторону внешнего каскада (см. рис. 11б–г). При этом в прикатодной части лайнера УВ все время остается прижатой к поверхности внутреннего каскада, как было получено в п. 2.1 настоящей статьи на основании 1D МГД-модели.

На рис. 12 показан пример определения положения и формы УВ в  $(r\text{--}z)$ -плоскости по максимуму плотности плазмы  $max[\rho(r, z, t_i)]$  на расчет-



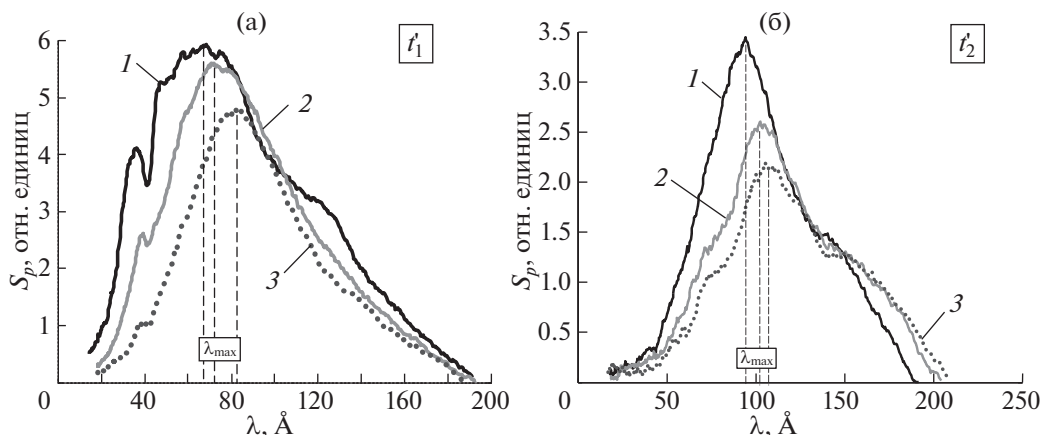
**Рис. 8.** Результаты эксперимента № 6296 с вложенными сборками: внешний каскад – коническая сборка из 4 вольфрамовых 12 мкм проволок, линейной массы 88 мкг/см. Радиус сборки – 10/6 мм; внутренний каскад – цилиндрическая сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см. Радиус сборки – 3 мм, высота вложенныхборок – 16 мм: а) – временные зависимости: 1 – производной полного тока; 2 – напряжения; 3 – импульса мощности МРИ в спектральном диапазоне  $h\nu > 100$  эВ; изображение (негатив) сжатия плазмы, полученное с помощью оптической осевой щелевой развертки, синхронизированное с представленными кривыми. Щель шириной 300 мкм аксиальной оптической развертки расположена вдоль оси вложенной сборки; б) – рентгеновские кадровые изображения (негатив) имплозии вложенной сборки, синхронизованные с представленными на рис. (а) кривыми, где времена регистрации кадров  $t_1-t_{10}$  указаны вертикальными стрелками ( $\downarrow$ СХР6). Анод – вверху, катод – внизу; в) – кадровые изображения (позитив) плазмы вложенныхборок, полученные при помощи теневого лазерного зондирования в различные моменты времени. Времена кадров  $t_1^*-t_3^*$  указаны вертикальными стрелками ( $\bullet$  LAS) на рис. (а). Времена регистрации  $t_1'$  и  $t_2'$  кадровых изображений спектра пинча, полученных спектрографом GIS, указаны на оси времен вертикальными стрелками ( $\uparrow$ GIS). Анод – вверху, катод – внизу.

ном распределении  $\rho(r, z, t_i)$  в этой области на некоторый момент времени. Такое определение положения и формы УВ было необходимо для восстановления пространственно-временной характеристики поведения области УВ в пространстве между каскадами вложенныхборок и проведения сравнения с результатами обработки кадровых лазерных теневых изображений, пред-

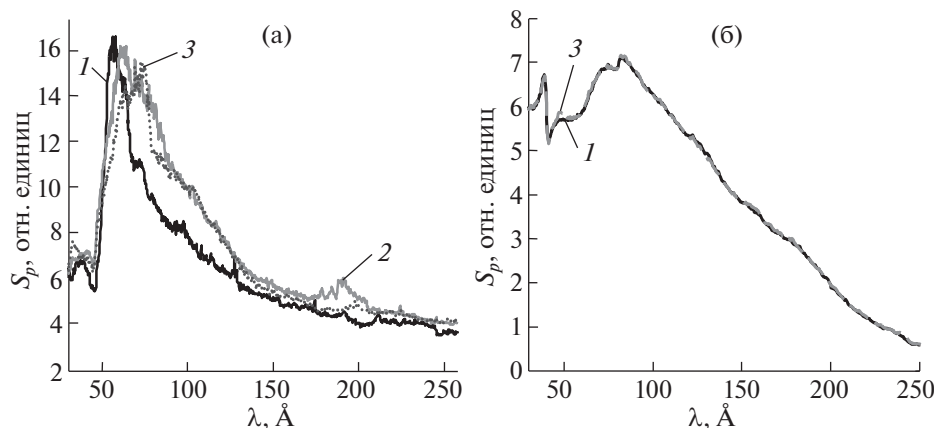
ставленными на рис. 7. Результаты такого сравнения подробно представлены ниже.

*Сравнение форм УВ, полученных при РМГД моделировании и в эксперименте*

На рис. 13а представлены результаты сравнения формы области УВ и ее изменения во време-



**Рис. 9.** Результаты эксперимента № 6296 с вложенными сборками: **внешний каскад** – коническая сборка из 4 вольфрамовых 12 мкм проволок, линейной массы 88 мкг/см. Радиус сборки – 10/6 мм; **внутренний каскад** – цилиндрическая сборка из 40 вольфрамовых 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см. Радиус сборки – 3 мм, высота вложенныхборок – 16 мм. Спектральная плотность мощности ( $h\nu > 60$  эВ): а) – за 5 нс до максимума импульса МРИ; б) – 5 нс после максимума импульса МРИ. Кривые: 1 – в прикатодной части лайнера,  $h \in [0, 4]$  см; 2 – в средней части лайнера,  $h \in [4, 9]$  см; 3 – в прианодной части лайнера,  $h \in [9, 16]$  см. Времена регистрации кадровых спектральных изображений  $t_1$  и  $t_2$  указаны вертикальными стрелками ( $\uparrow$ GIS) на рис. 8а.



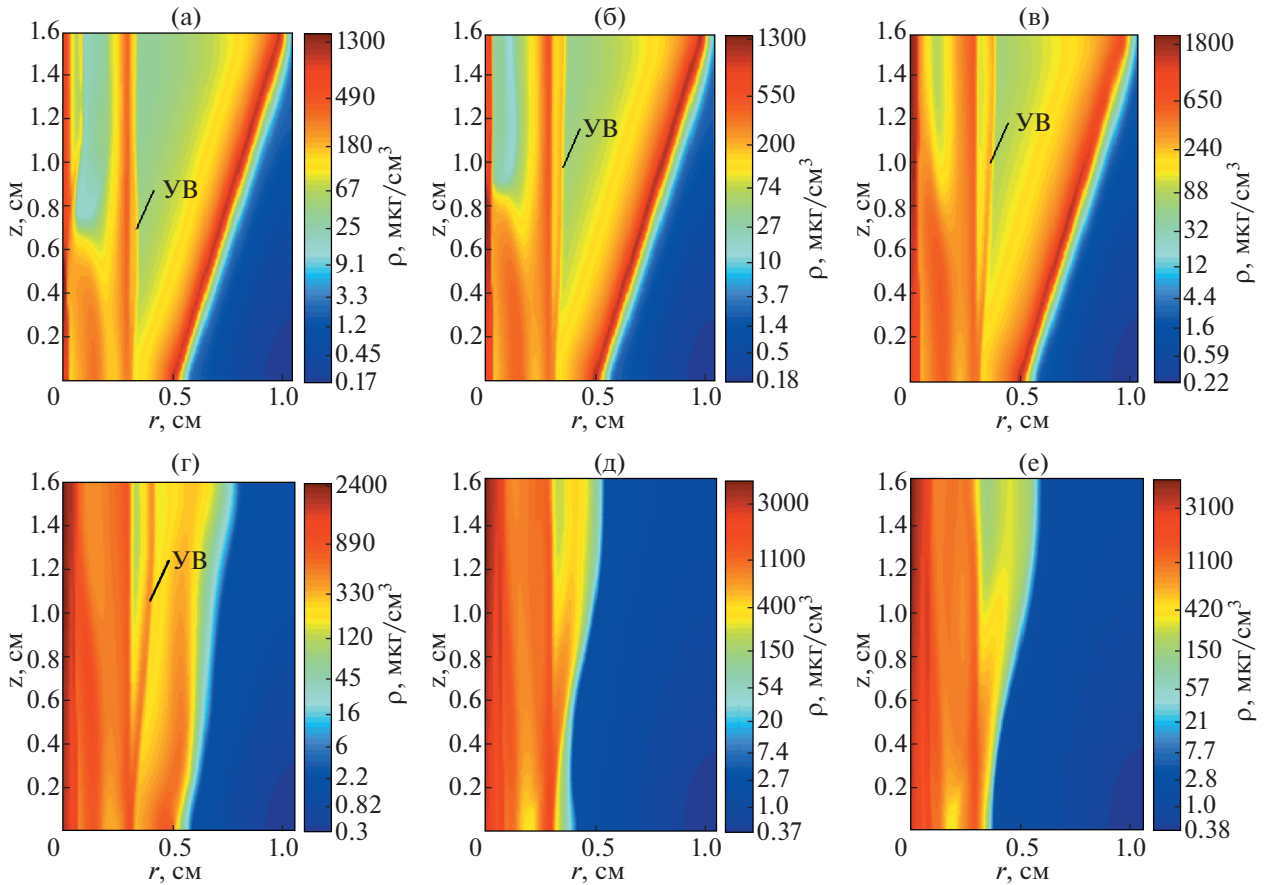
**Рис. 10.** а) – спектральная плотность энергии в эксперименте № 4903, нагрузка – **конусная сборка** из 40 W 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см, радиус сборки – 10/6 мм; б) – спектральная плотность мощности через 5 нс после максимума импульса мощности МРИ в эксперименте № 6403, нагрузка – **цилиндрическая сборка**, 40 W 6 мкм проволок, линейной массы 220 мкг/см, радиус сборки – 6 мм. Кривые: 1 – в прикатодной части лайнера,  $h \in [0, 4]$  см; 2 – в средней части лайнера,  $h \in [4, 9]$  см; 3 – в прианодной части лайнера,  $h \in [9, 16]$  см.

ни в пространстве между каскадами вложенныхборок в  $(r-z)$ -плоскости, восстановленных из РМГД-расчета и лазерных теневого кадровых изображений. Как следует из проведенного сравнения, область УВ прижата к поверхности внутреннего цилиндрического каскада в прикатодной части лайнера по высоте  $\Delta z \approx 0.10 \pm 0.05$  см.

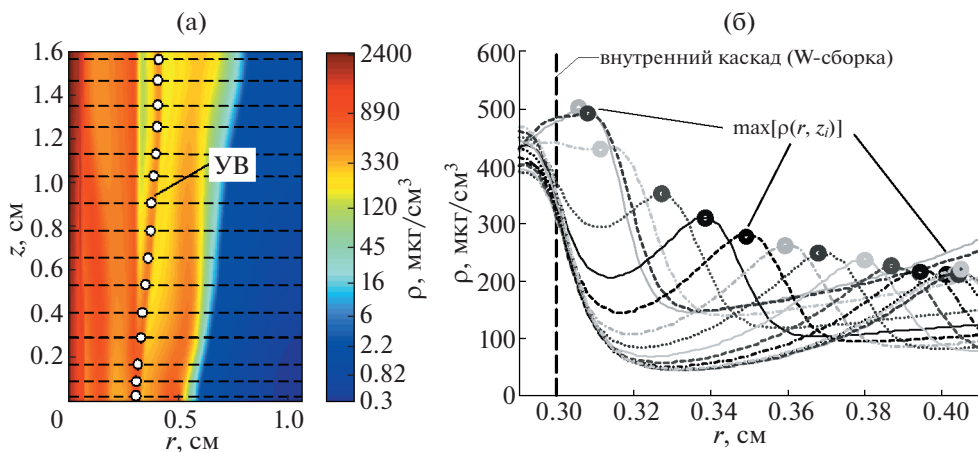
С другой стороны, вектор скорости  $\vec{V}$  плазменных потоков, вылетающих из области плазмообразования внешнего каскада, перпендикулярен его поверхности (см. напр. рис. 7г), то высоту поднятия плазмы над катодом вблизи поверхности внутреннего каскада можно оценить

как  $\Delta z = (r_{outer}^{cathode} - r_{inner}) \cdot \text{tg}(\alpha)$ , согласно показанной справа на рис. 13б схемы. Учтя параметры каскадов вложенныхборок и угол  $\alpha \approx 13^\circ$ , получим оценку  $\Delta z \approx 0.07$  см, что по порядку величины совпадает с величиной  $\Delta z$ , полученной из лазерных теневого изображений и представленной выше.

Следует заметить, что форма области УВ, реализованная в эксперименте на 57-ю нс разряда, несколько отлична от формы УВ, полученной в результате РМГД-расчета. Однако, основная тенденция прослеживается – радиус расположения УВ растет по направлению от катода к аноду. Основное отличие наблюдается вблизи анода. В экспери-



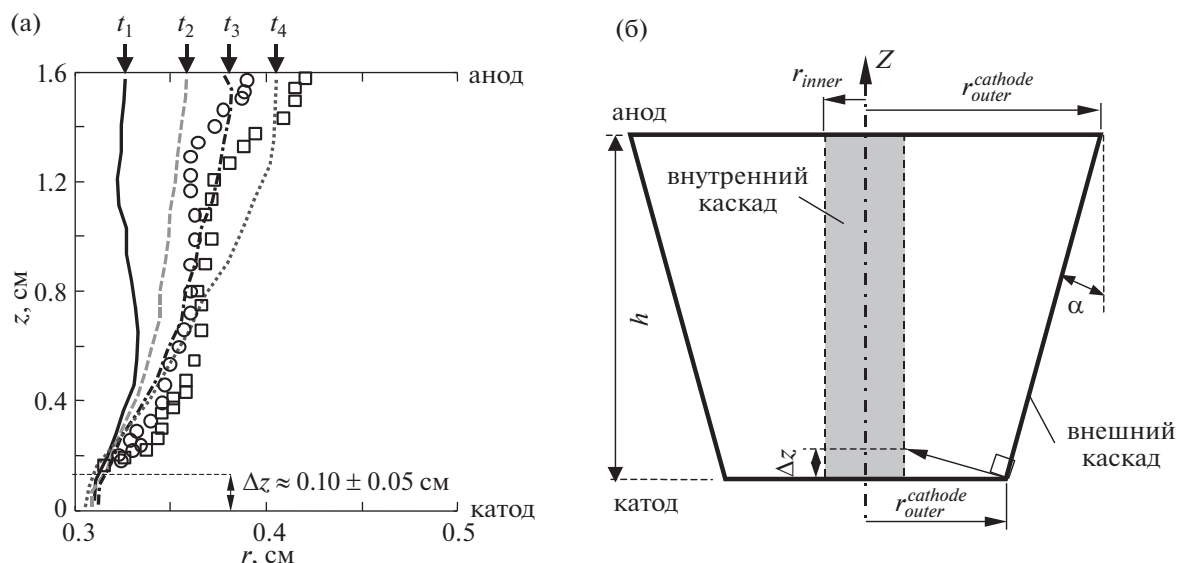
**Рис. 11.** Рассчитанные по РМГД модели распределения плотности плазмы  $\rho(r, z, t_i)$  вложенных сборок смешанного состава (внешний каскад – конусная волоконная сборка из капроновых волокон, внутренний каскад – цилиндрическая W-проволочная сборка) в  $(r-z)$ -плоскости на различные моменты времени  $t_i$ : а)–е) – на 62 нс, 65 нс, 70 нс, 80 нс, 88 нс и 90 нс разряда, соответственно. УВ – область ударной волны. Цветовая шкала плотности плазмы представлена в логарифмическом масштабе.



**Рис. 12.** Пример определения положения и формы УВ в  $(r-z)$ -плоскости по максимуму плотности плазмы в этой области на некоторый момент времени  $t = t_i$ : а) – распределение плотности плазмы  $\rho(r, z, t_i)$  на момент времени  $t_i$ ; б) – восстановленные радиальные распределения плотности плазмы  $\rho(r, z_i)$  в некоторых позициях  $z_i$  по высоте лайнера, которые указаны горизонтальными пунктирными линиями на рис. (а). Кружками отмечены максимумы плотности плазмы в области УВ.

менте область УВ отклонена в сторону внешнего каскада, в то время, как расчетная область УВ практически не отклонена. Скорее всего, такое отличие

связано с различием форм анодного электрода вложенных сборок в эксперименте и в расчете. Использованный в эксперименте анодный электрод



**Рис. 13.** Сравнение формы области УВ и ее изменения во времени в пространстве между каскадами вложенныхборок, полученных из данных РМГД-расчета и лазерных теневых кадровых изображений: а) — линиями представлены формы области УВ на несколько моментов времени ( $t_1 = 62$  нс,  $t_2 = 65$  нс,  $t_3 = 70$  нс и  $t_4 = 80$  нс разряда), восстановленные из РМГД-расчета способом, представленным на рис. 12. Кружками (○) и квадратами (□) представлена форма УВ (обозначения те же, как на рис. 5) на 57 нс разряда, восстановленная из лазерного теневого изображения; б) — геометрия распространения плазменных потоков от поверхности внешнего конического каскада в направлении внутреннего цилиндрического каскада область конической сборки.

сборок имел кольцевую полость в пространстве между каскадами, как показано на рис. 1, чтобы исключить из поля зрения лазерной диагностики явления, связанные с взаимодействием плазменных потоков с поверхностью анода. В РМГД-расчете был использован сплошной анодный электрод.

## 5. ВЫВОДЫ

На основании проведенных экспериментов с конусно-цилиндрическими вложенными сборками смешанного состава можно сделать следующие выводы:

1. Нецилиндрический характер сжатия плазменных струй с внешнего конусного каскада позволяет экспериментально моделировать трехмерную динамику плазмы и ее взаимодействие с сильным магнитным полем разрядного тока, протекающего по внутреннему цилиндрическому каскаду.

2. Таким способом исследована динамика формирования области УВ в пространстве между каскадами вложенныхборок. Обнаружено, что положение ударной волны в  $(r-z)$ -плоскости меняется во времени, а ее форма позволяет судить о некоторых параметрах плазменного потока внешнего каскада, а именно: его радиальной скорости движения  $V_r$ , кинетическом давлении плазмы  $\rho V_r^2$  и характерном пространственном масштабе неустойчивостей в плазменном потоке.

3. Получено, что радиус расположения области формирования УВ растет по направлению от катода к аноду. При этом в прикатодной части лайнера УВ все время остается прижатой к поверхности внутреннего каскада. Радиальный размер области УВ не превышает 150–200 мкм.

4. Форма ударной волны, а также ее трансформация во времени, указывает на смещение области баланса кинетического и магнитного давлений в теле потока плазмы в направлении от поверхности внутреннего каскада в сторону внешнего каскада. Это происходит из-за перераспределения разрядного тока между каскадами в процессе длительного плазмообразования за счет переключения существенной доли тока на внутренний каскад.

5. Проведено сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами численного расчета движения плазмы между каскадами с помощью трехмерного РМГД-кода. Получено, что профиль УВ в  $(r-z)$ -плоскости, зарегистрированный на кадровых изображениях при помощи лазерной и рентгеновской многокадровой диагностики, по форме близок к расчетному профилю распределения плотности плазмы  $\rho(r, z, t_i)$ .

6. Взаимодействие плазменных потоков внешней конусной сборки с магнитным полем внутреннего цилиндрического каскада приводит к существенному уменьшению развития зиппер-эффекта на финальной стадии сжатия плазмы внутреннего каскада и образования пинча.

Дальнейшие исследования взаимодействия плазменных потоков и магнитного поля будут направлены на:

– изучение фундаментальных процессов, которые определяют эффективность трансформации энергии потоков замагниченной плазмы при их взаимодействии с магнитными полями, в зависимости от состава и пространственно-временных параметров исследуемых плазменных потоков;

– разработку методов трехмерного моделирования пространственно-временных характеристик процессов взаимодействия потоков замагниченной плазмы и магнитного поля при высокой плотности энергии импульсных полей;

– измерение температуры плазменного потока при столкновении его с магнитным полем (в области формирования УВ), которое будет проводиться методами ВУФ-спектроскопии с временным и пространственным разрешением.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 20-02-00007, 18-29-21005, 18-02-00170 и 20-31-70015).

Численные расчеты выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова и вычислительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МЦЦ РАН).

Авторы выражают благодарность коллективу установки Ангара-5-1 за инженерно-техническое сопровождение экспериментов, а также благодарят проект High Field Initiative Европейского фонда регионального развития (the project High Field Initiative [CZ.02.1.01/0.0/0.0/15\_003/0000449] from the European Regional Development Fund).

## 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. Enhancement of X-Ray Power from a Z Pinch Using Nested-Wire Arrays // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 81. № 22. P. 4883–4886.
2. Lebedev S.V., Aliaga-Rossel R., Bland S.N., Chittenden J.P., Dangor A.E., Haines M.G., Zakauallah M. Two Different Modes of Nested Wire Array Z-Pinch Implosions // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. № 8. P. 1708–1711.
3. Bland S.N., Lebedev S.V., Chittenden J.P., Jennings C., Haines M.G. Nested wire array Z-pinch experiments operating in the current transfer mode // *Phys. Plasmas.* 2003. V. 10. № 4. P. 1100–1112.
4. Grabovskii E.V., Zukakishvili G.G., Mitrofanov K.N., Oleinik G.M., Frolov I.N., Sasorov P.V. Study of the magnetic fields and soft X-ray emission generated in the implosion of double wire arrays // *Plasma Physics Reports.* 2006. V. 32. № 1. P. 32–46.
5. 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. Compact single and nested tungsten-wire-array dynamics at 14–19 MA and applications to inertial confinement fusion // *Phys. Plasmas.* 2006. V. 13. № 5. P. 056318-1-056318-18.
6. Kalinin Yu.G., Kingsep A.S., Smirnov V.P., Bakshaev Yu.L., Bartov A.V., Blinov P.I., Dan'ko S.A., Dubas L.G., Korel'ski A.V., Korolev V.D., Mizhiritski V.I., Ustrov G.I., Chernenko A.S., Chikin R.V., Shashkov A.Yu., Li Z., Hua X., Peng X., Feng S., Guo C., Jiang S., Ning C., Song F., Xu R., Xu Z., Yan C., Yang J., Yang L. Experiments on the implosion of heterogeneous wire arrays on the S-300 facility // *Plasma Physics Reports.* 2006. V. 32. № 8. P. 656–667.
7. Ampleford D.J., Jennings C.A., Hall G.N., Lebedev S.V., Bland S.N., Bott S.C., Suzuki-Vidal F., Palmer J.B.A., Chittenden J.P., Cuneo M.E., Frank A., Blackman E.G., Ciardi A. Bow shocks in ablated plasma streams for nested wire array z-pinch: A laboratory astrophysics testbed for radiatively cooled shocks // *Phys. Plasmas.* 2010. V. 17. № 5. P. 056315-1-056315-7.
8. Mitrofanov K.N., Aleksandrov V.V., Grabovski E.V., Branitsky A.V., Gritsuk A.N., Frolov I.N., Laukhin Ya.N. Stability of Compression of the Inner Array Plasma in Nested Arrays // *Plasma Physics Reports.* 2017. V. 43. № 9. P. 916–927.
9. Mitrofanov K.N., Aleksandrov V.V., Grabovski E.V., Sasorov P.V., Branitsky A.V., Gritsuk A.N., Frolov I.N., Laukhin Ya.N. Study of Implosion of Combined Nested Arrays // *Plasma Physics Reports.* 2017. V. 43. № 12. P. 1147–1171.
10. Mitrofanov K.N., Aleksandrov V.V., Gritsuk A.N., Branitsky A.V., Frolov I.N., Grabovski E.V., Sasorov P.V., Ol'khovskaya O.G., Zaitsev V.I. Study of Plasma Flow Modes in Imploding Nested Arrays. // *Plasma Physics Reports.* 2018. V. 44. № 2. P. 203–235.
11. Aleksandrov V.V., Branitski A.V., Gasilov V.A., Grabovskiy E.V., Gritsuk A.N., Mitrofanov K.N., Olkhovskaya O.G., Sasorov P.V., Frolov I.N. Study of interaction between plasma flows and the magnetic field at the implosion of nested wire arrays // *Plasma Physics and Controlled Fusion.* 2019. V. 61. № 3. P. 035009-1-035009-16.
12. Mitrofanov K.N., Grabovski E.V., Aleksandrov V.V., Frolov I.N., Oleinik G.M., Laukhin Ya.N., Gritsuk A.N., Sasorov P.V., Medovshchikov S.F. Study of the Implosion of Foam–Wire Loads at the Angara-5-1 Facility // *Plasma Physics Reports.* 2012. V. 38. № 12. P. 941–959.
13. Sasorov P. Dynamics of plasma jets in multiwire arrays // 6<sup>th</sup> Intern. Conf. on Dense Z-Pinches. Oxford. Ed.: J. Chittenden. AIP Conf. Proc. 2006. V. 808. P. 81–84.
14. Aleksandrov V.V., Volkov G.S., Grabovski E.V., Gribov A.N., Gritsuk A.N., Laukhin Ya.N., Mitrofanov K.N., Oleinik G.M., Sasorov P.V., Frolov I.N. Study of the Implosion Characteristics of QuasiSpherical Wire Arrays on the Angara-5-1 Facility at Currents of up to 4 MA // *Plasma Physics Reports.* 2012. V. 38. № 4. P. 315–337.
15. Альбиков 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., Латманникова 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.* Импульсный термоядерный комплекс “Ангара-5-1” // Атомная энергия. 1990. Т. 68. Вып. 1. С. 26–35.
16. *Yu E.P., Oliver B.V., Sinars D.B., Mehlhorn T.A., Cuneo M.E., Satorov P.V., Haines M.G., Lebedev S.V.* Steady-state radiation ablation in the wire-array Z pinch // *Phys. Plasmas*. 2007. V. 14. P. 022705-1-022705-15.
  17. *Aleksandrov V.V., Branitskii A.V., Volkov G.S., Grabovskii E.V., Zurin M.V., Nedoseev S.L., Oleinik G.M., Samokhin A.A., Satorov P.V., Smirnov V.P., Fedulov M.V., Frolov I.N.* Dynamics of Heterogeneous Liners with Prolonged Plasma Creation // *Plasma Physics Reports*. V. 27. № 2. 2001. P. 89–109.
  18. *Alexandrov V.V., Frolov I.N., Fedulov M.V., Grabovskiy E.V., Mitrofanov K.N., Nedoseev S.L., Oleinik G.M., Porofeev I.Yu., Samokhin A.A., Satorov P.V., Smirnov V.P., Volkov G.S., Zurin M.V., Zukakishvili G.G.* Prolonged plasma production at current-driven implosion of wire arrays on Angara-5-1 facility // *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 2002. V. 30. № 2. P. 559–566.
  19. *Zukakishvili G.G., Mitrofanov K.N., Aleksandrov V.V., Grabovski E.V., Oleinik G.M., Porofeev I.Yu., Satorov P.V., Frolov I.N.* Measurements of the Azimuthal Magnetic Field within Imploding Multiwire Arrays in the Angara-5-1 Facility // *Plasma Physics Reports*. V. 31. № 11. 2005. P. 908–918.
  20. *Aleksandrov V.V., Grabovski E.V., Gritsuk A.N., Laukhin Ya.N., Medovshchikov S.F., Mitrofanov K.N., Oleinik G.M., Satorov P.V., Fedulov M.V., Frolov I.N.* Studies of the Implosion of Cylindrical Fiber Arrays on the Angara-5-1 Facility // *Plasma Physics Reports*. 2010. V. 36. № 6. P. 482–506.
  21. *Mitrofanov K.N., Grabovski E.V., Oleinik G.M., Aleksandrov V.V., Gritsuk A.N., Frolov I.N., Laukhin Ya.N., Satorov P.V., Samokhin A.A.* Study of the Radial Distribution of the Magnetic Field in the Wire Array Plasma at the Angara-5-1 Facility // *Plasma Physics Reports*. 2012. V. 38. № 10. P. 797–819.
  22. *Aleksandrov V.V., Mitrofanov K.N., Gritsuk A.N., Frolov I.N., Grabovski E.V., Laukhin Ya.N.* Effect of the Plasma Production Rate on the Implosion Dynamics of Cylindrical Wire/Fiber Arrays with a Profiled Linear Mass // *Plasma Physics Reports*. 2013. V. 39. № 10. P. 809–821.
  23. *Mitrofanov K.N., Aleksandrov V.V., Gritsuk A.N., Grabovski E.V., Frolov I.N., Laukhin Ya.N., Breshkov S.S.* Specific Features of Implosion of Metallized Fiber Arrays // *Plasma Physics Reports*. 2017. V. 43. № 2. P. 141–163.
  24. *Grabovski E.V., Aleksandrov V.V., Volkov G.S., Gasilov V.A., Gribov A.N., Gritsuk A.N., Dyachenko S.V., Zaytsev V.I., Medovshchikov S.F., Mitrofanov K.N., Laukhin Ya.N., Oleinik G.M., Ol'khovskaya O.G., Samokhin A.A., Satorov P.V., Frolov I.N.* Use of Conical Wire Arrays for Modeling Three-Dimensional MHD Implosion Effects // *Plasma Physics Reports*. 2008. V. 34. № 10. P. 815–829.
  25. *Gasilov V., D'yachenko S., Olkhovskaya O., Boldarev A., Kartasheva E., Boldyrev S.* Object-Oriented Programming and Parallel Computing in Radiative Magnetohydrodynamics Simulations // *Proceedings ECCOMAS, Venetia, 2008. Section: Parallel Computing: Architectures, Algorithms and Applications*. IOS Press: Advances in Parallel Computing. 2008. V. 15. P. 475–482.
  26. *Gasilov V.A., Boldarev A.S., D'yachenko S.V., Olkhovskaya O.G., Kartasheva E.L., Boldyrev S.N., Bagdasarov G.A., Gasilova I.V., Boyarov M.S., Shmyrov V.A.* Program package MARPLE3D for simulation of pulsed magnetically driven plasma using high performance computing // *Matem. Mod.* 2012. V. 24. № 1. P. 55–87.
  27. <http://www.keldysh.ru/cgi/thermos/navigation.pl?en,home>
  28. *Aleksandrov V.V., Grabovski E.V., Gribov A.N., Gritsuk A.N., Medovshchikov S.F., Mitrofanov K.N., Oleinik G.M.* Spatiotemporal Behavior of X-ray Emission above 20 keV from a Z-Pinch Produced by Wire-Array Implosion // *Plasma Physics Reports*. 2009. V. 35. № 2. P. 136–148.
  29. *Alexandrov V.V., Volkov G.S., Grabovsky E.V., Zaitsev V.I., Zurin M.V., Medovshchikov S.F., Mitrofanov K.N., Nedoseev S.L., Oleinik G.M., Porofeev I.Yu., Samokhin A.A., Smirnov V.P., Frolov I.N., Fedulov M.V., Lee Zhenhong, Hua Xincheng, Peng Xianjue, Xu Rongkun, Xu Zeping, Yang Jianlun, Guo Cun, Ding Ning, Gu Yuanchao, Liu Qiang, Li Linbo, Ning Jiamin, Xia Guangxin* Study of a Fine Spatial-Temporal Structure of X-ray Emission of Z Pinch at the “Angara-5-1” Installation // *Proc. of the 15<sup>th</sup> Int. Conf. on High-Power Particle Beams. BEAMS'04.* (Saint-Petersburg, Russia. July 18–23. 2004). Edited by Engelko V., Glukhikh V., Mesyats G., Smirnov V., Saint-Petersburg. D.E. Efremov Institute. 2005. P. 686–690.
  30. *Calamy H., Lassalle F., Loyer A., Zucchini F., Chittenden J.P., Hamann F., Maury P., Georges A., Bedoch J.P., Morell A.* Use of microsecond current prepulse for dramatic improvements of wire array Z-pinch implosion // *Phys. Plasmas*. 2008. V. 15. P. 012701-1-012701-11.
  31. *Sanford T.W.L., Jennings C.A., Rochau G.A., Rosenthal S.E., Sarkisov G.S., Satorov P.V., Stygar W.A., Bennett L.F., Bliss D.E., Chittenden J.P., Cuneo M.E., Haines M.G., Leeper R.J., Mock R.C., Nash T.J., Peterson D.L.* Wire Initiation Critical for Radiation Symmetry in Z-Pinch-Driven Dynamic Hohlraums // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98. P. 065003-1-065003-4.
  32. *Ivanov V.V., Kantsyrev V.L., Sotnikov V.I., Fedin D.A., Astanovitskiy A.L., Le Galloudec B., Nalajala V., Shrestha I., Cowan T.E.* Investigation of regimes of wire array implosion on the 1 MA Zebra accelerator // *Phys. Plas.* 2006. V. 13. P. 012704-1-012704-8.
  33. *Grabovski E.V., Zukakishvili G.G., Nedoseev S.L., Oleinik G.M., Porofeev I.Yu.* Roentgenographic Investigations of the Dynamics and Spatial Structure of Wire-Array Z-Pinches // *Plasma Physics Reports*. V. 30. № 1. 2004. P. 30–37.
  34. *Lebedev S.V., Ampleford D.J., Bland S.N., Bott S.C., Chittenden J.P., Jennings C., Haines M.G., Palmer J.B.A., Rapley J.* Implosion dynamics of wire array Z-pinches: experiments at Imperial College // *Nucl. Fusion*. 2004. V. 44. № 12. P. S215–S220.