

**MATTER DENSITY DISTRIBUTION OF COPPER CYLINDRICAL
CONDUCTORS AT SKIN EXPLOSION**

Natalia Anatolievna Labetskaya^{1a}, *Igor Mikhailovich Datsko*^{1,2},
Stanislav Anatolievich Chaikovskiy^{1,2}, *Vladislav Alexeevich Vankevich*^{1,2},
Vladimir Ivanovich Oreshkin^{1,2}

¹ Institute of High Current Electronics, Akademicheskyy pr. 2/3, 634055, Tomsk, Russia

² Institute of Electrophysics, Ural Division of the Russian Academy of Sciences, Amundsen str. 106, 620016, Ekaterinburg, Russia

^a natalia@ovpe2.hcei.tsc.ru

ABSTRACT

Large-scale plasma instabilities arising from the skin explosion of cylindrical copper conductors at fast rising strong magnetic fields with induction up to 400 T are studied. The experiments were carried out on a high-current MIG generator at a current amplitude of up to 2.5 MA and a rise time of 100 ns. The radial distribution of the material of the exploded conductor and the internal structure of the instabilities were studied using X-ray patterns obtained by probing with X-ray radiation formed at the X-pinch “hot spot”. The experimental data obtained can be used to verify one- and two-dimensional magnetohydrodynamic models of the behavior of matter under extreme conditions.

KEYWORDS

Strong magnetic fields; skin explosion of conductors; large-scale instabilities; X-pinch; X-ray patterns.

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЫ
ПРИ СКИНОВОМ ВЗРЫВЕ МЕДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ**

Наталья Анатольевна Лабецкая^{1a}, *Игорь Михайлович Дацко*^{1,2},
Станислав Анатольевич Чайковский^{1,2}, *Владислав Алексеевич Ванькевич*^{1,2},
Владимир Иванович Орешкин^{1,2}

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

² Институт электрофизики УрО РАН, Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

^a natalia@ovpe2.hcei.tsc.ru

АННОТАЦИЯ

Проведены исследования крупномасштабных неустойчивостей плазмы, возникающих при скиновом взрыве цилиндрических медных проводников в быстро нарастающих сильных магнитных полях с индукцией до 400 Т. Эксперименты проводились на сильноточном гене-

раторе МИГ при амплитуде тока до 2,5 МА и времени его нарастания 100 нс. Радиальное распределение вещества взорванного проводника и внутренняя структура неустойчивостей исследовались по рентгенограммам, полученным с помощью зондирования рентгеновским излучением, сформированным в «горячей точке» X-пинча. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для верификации одно- и двумерных магнитогидродинамических моделей поведения вещества в экстремальных условиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сильные магнитные поля; скиновый взрыв проводников; крупномасштабные неустойчивости; рентгенограммы; X-пинч.

Введение

Образование плазмы на поверхности металлических проводников в результате их скинового взрыва, а также ее распространение являются одним из ключевых вопросов эффективности транспортировки энергии по вакуумным линиям мощных импульсных генераторов мультитераваттного уровня [1, 2]. Такие генераторы с уровнем тока (30÷50) МА и временем нарастания тока менее 100 нс предполагается использовать для реализации схем управляемого термоядерного синтеза на основе Z-пинчей [3, 4]. Плотность электромагнитной энергии в области нагрузки мощных импульсных генераторов настолько велика, что может произойти взрыв проводящей поверхности и образование плазмы, приводящее к значительному снижению эффективности транспортировки электромагнитной энергии к нагрузке. В связи с этим поверхностный взрыв тяжелых металлических лайнеров, а также крупномасштабные неустойчивости, развивающиеся на их поверхности, изучаются на различных импульсных генераторах тераваттного уровня мощности.

Процесс протекания тока мегаамперного уровня по тяжелым металлическим лайнерам сопровождается распространением внутрь проводника ударной волны и волны нелинейной диффузии магнитного поля. Если время ввода энергии в проводник меньше или сравнимо со временем диффузии магнитного поля в нем, то протекание тока и, соответственно, основное джоулево тепло-

выделение происходит в поверхностном слое проводника [4–8]. Если плотность тепловой энергии близка или больше плотности энергии сублимации металла, происходит взрыв его поверхности, образование на ней плотной низкотемпературной плазмы и развитие крупномасштабных неустойчивостей. Причем, в зависимости от режима взрыва, могут развиваться как перегревные, так и рэлей-тейлоровские неустойчивости [9–12].

Как было показано ранее в наших работах, в скиновом режиме электрического взрыва наблюдается развитие крупномасштабных неустойчивостей с длиной волны, превышающей 200 мкм [13–15]. При этом характер развития наблюдаемых на границе плазма/магнитное поле структур может быть описан на основе механизма развития желобковых неустойчивостей [13–17]. Экспериментальные данные, позволившие сделать данные выводы, были получены из снимков взрывающегося проводника в оптическом диапазоне спектра. Диагностическая аппаратура позволяла получить в каждом «выстреле» 4 снимка с временным разрешением 3 нс каждый. Из этих снимков были получены данные об амплитудах и длинах волн неустойчивостей, а также о расширении основного вещества проводника. Однако данный тип диагностики не позволяет получить данные о плотности вещества взрывающегося проводника. Целью данной работы являлось исследование развития крупномасштабных неустойчивостей, возникающих при скиновом взрыве проводников, по рент-

генограммам, полученным при просвечивании проводников рентгеновским излучением от X-пинча, а также оценка плотности вещества взрывающегося проводника.

1. Постановка эксперимента

Эксперименты проводились на высоко-точном генераторе МИГ с амплитудой тока до 2 МА и временем его нарастания 100 нс [18, 19]. Основными элементами генератора являются линейный импульсный трансформатор, водяные формирующие линии, узел нагрузки. Нагрузка генератора МИГ представляла собой медный стержень круглого сечения диаметром около 2 мм. Фотография нагрузки представлена на рис. 1, а. В экспериментах задействована только цилиндрическая часть проводника, конусная часть служит для закрепления нагрузки в межэлектродном зазоре генератора МИГ. Импульс тока генератора в нагрузку имеет предимпульс, который начинается примерно за 250 нс до начала основного импульса, нарастает примерно линейно и достигает значений 3% от амплитуды основного импульса. При работе генератора МИГ с нагрузками,

описание которых приведено выше, приблизительно на максимуме обратной полуволны импульса напряжения происходит перекрытие вакуумной поверхности проходного изолятора «вода-вакуум». За счет «захвата» магнитного потока в вакуумной передающей линии ток в нагрузке после (130÷150) нс от его начала принимает форму слабо убывающей экспоненты с характерным временем спада, составляющим несколько микросекунд. Диагностический комплекс генератора МИГ включал в себя пояса Роговского, магнитные зонды, вакуумные рентгеновские диоды (ВРД), а также систему рентгеновского зондирования на основе X-пинча.

Система рентгеновского зондирования основана на просвечивании взрывающейся металлической нагрузки генератора МИГ излучением X-пинча и регистрации получаемого изображения на фотопленках. Кривые пропускания фильтров, обеспечивающих получение рентгенограмм в данных экспериментах, приводятся на рис. 1, б. Подробная схема системы зондирования на основе X-пинча приведена в работах [20, 21].

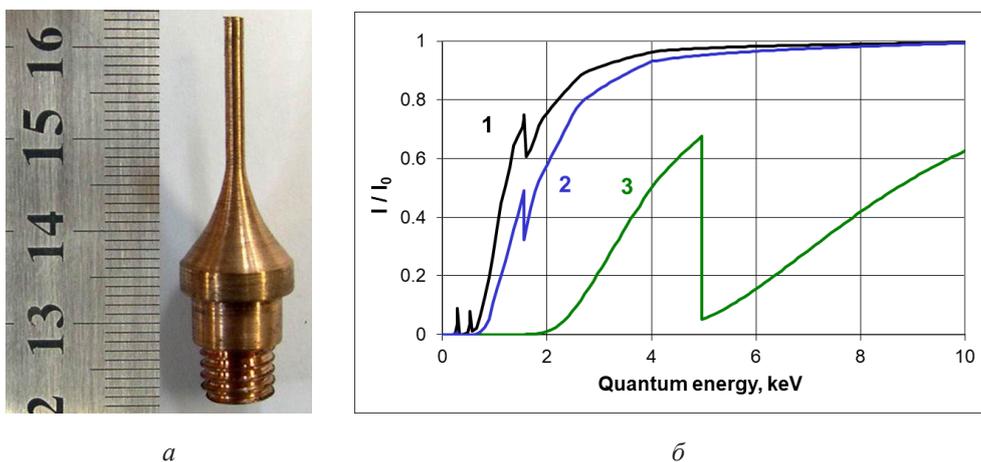


Рис. 1. а) фотография медного цилиндрического проводника с начальным диаметром 2 мм, используемого в качестве нагрузки генератора МИГ; б) кривые пропускания используемых в системе рентгеновского зондирования фильтров: 1 фильтр – майлар 2 мкм + Al 0,2 мкм; 2 фильтр – полипропилен 6 мкм + Al 0,2 мкм + фильтр 1; 3 фильтр – Ti 9,3 мкм + фильтр 2

Fig. 1. а) photograph of a copper rod used as a load of the MIG generator; б) transmission curves of filters used in the X-ray probing system: 1 filter – Mylar 2 μm + Al 0.2 μm ; 2 filter – polypropylene 6 μm + Al 0.2 μm + filter 1; 3 filter – Ti 9.3 μm + filter 2

Узел нагрузки, в котором размещался X-пинч, располагался непосредственно в вакуумной камере генератора МИГ. Импульсное питание X-пинча осуществлялось от отдельного компактного импульсного сильноточного генератора XPG-3, расположенного на небольшом расстоянии снаружи вакуумной камеры генератора МИГ. Ток, протекающий через X-пинч, измерялся магнитным зондом, расположенным в непосредственной близости к нагрузке. Временная зависимость рентгеновского излучения X-пинча регистрировалась с помощью вакуумного рентгеновского диода с алюминиевым катодом за фильтром, определяющим измерение в спектральном диапазоне $h\nu > 0,8$ кэВ. Генератор XPG-3 обеспечивал протекание через X-пинч тока с амплитудой до 250 кА при времени его нарастания (150÷200) нс, что позволяло получить короткий импульс рентгеновского излучения в спектральном диапазоне с энергией квантов $h\nu > 0,8$ кэВ длительностью на половине высоты не более 2 нс.

X-пинч формировался из двух скрещенных молибденовых проволочек диаметром 24 мкм. Коэффициент увеличения схемы составлял около 4,4, поскольку блок фильтров и сами фотопленки должны были быть установлены на значительном расстоянии от исследуемого взрывающегося металлического проводника для защиты от продуктов взрыва. Изображение фиксировалось на фотопленках Микрат ОРТО и РФ-3, расположенных друг за другом, что позволяло регистрировать рентгенограммы в двух спектральных диапазонах. Перед фотокамерой, непосредственно в которой были размещены фотопленки, располагалась система диафрагм для ее защиты от продуктов взрыва проводника. Для защиты фотопленок от видимой части спектра излучения X-пинча и исследуемого проводника, перед ними устанавливался

составной защитный фильтр, состоящий из майлара толщиной 2 мкм с алюминиевым нанесенным слоем толщиной 0,2 мкм и полипропиленовой пленки толщиной 6 мкм с напыленным на нее алюминиевым слоем толщиной 0,2 мкм. Ступенчатый ослабитель из меди, используемый для дальнейших оценок плотности вещества, наносился на верхнюю часть того же полипропиленового фильтра способом магнетронного напыления [22]. Суммарный составной фильтр определял диапазон энергии квантов зондирующего излучения X-пинча. В этой серии экспериментов дополнительно к составному защитному фильтру был использован титановый фильтр толщиной 9,3 мкм. Таким образом, суммарный составной фильтр представлял собой майлар 2 мкм + полипропилен 6 мкм + алюминий 0,4 мкм и титан толщиной 9,3 мкм. Кривые пропускания всех видов фильтров приведены на рис. 1, б.

Из рентгенограмм были получены данные о расширении основного вещества взрывающегося проводника и размерах крупномасштабных неустойчивостей. Для восстановления профиля распределения плотности вещества по данным рентгенографических исследований электрического взрыва проводников в вакууме применялся разработанный расчетный код, в котором используется преобразование Абеля [20].

2. Экспериментальные результаты

При протекании мощных импульсов тока по поверхности металлического проводника его поверхность взрывается. В условиях наших экспериментов взрыв поверхности медного цилиндрического проводника диаметром 2 мм обычно происходит примерно на (65÷75) нс от начала тока генератора [13]. После взрыва на поверхности металлического проводника образуется плазма и развиваются неустойчивости.

Как определено в [23], максимум излучения молибденового X-пинча находится в диапазоне 2,6÷2,8 кэВ и спадает в области более высоких энергий квантов; при этом интенсивность излучения X-пинча с энергиями квантов $h\nu > 6$ кэВ низка. Применение основных титановых фильтров различной толщины с К-скачком поглощения 4,966 кэВ позволяет уменьшить диапазон зондирующего излучения. За титановым фильтром толщиной 9,3 мкм (по уровню пропускания 0,2) излучение X-пинча будет находиться в диапазоне энергий квантов 3÷4,966 кэВ (см. рис. 1, б, кривая 3). Излучение источника через систему фильтров попадает на пленку Микрат ОРТО и далее на пленку РФ-3, которая имеет более толстый слой эмульсии с большей концентрацией более крупных зерен бромистого серебра. Фотопленка Микрат ОРТО сужает диапазон попадающего на пленку РФ-3 зондирующего излучения до 4,3÷4,966 кэВ и более после скачка пропускания титанового фильтра. А так как интенсивность излучения X-пинча с $h\nu > 6$ кэВ низка, то можно говорить о довольно узком рабочем диапазоне

пленки РФ-3: 4,3÷4,966 кэВ за основным титановым фильтром толщиной 9,3 мкм (с учетом дополнительных фильтров).

На рис. 2 приведены рентгенограммы, полученные с помощью просвечивания излучением X-пинча цилиндрического медного проводника с начальным диаметром 1,91 мм на 252 нс от начала тока генератора МИГ. Рентгенограммы были получены на пленках Микрат ОРТО и РФ-3, установленных друг за другом.

Из экспериментальных рентгенограмм были получены данные о расширении проводника, амплитудах и длинах волн крупномасштабных неустойчивостей. На 252 нс от начала протекания тока генератора МИГ по проводнику были получены следующие экспериментальные данные: усредненное расширение проводника составило 290 мкм, усредненные амплитуда и длина волны неустойчивостей – 460 и 240 мкм соответственно.

Далее приведены оценки плотности вещества на разных радиусах взрывающегося проводника.

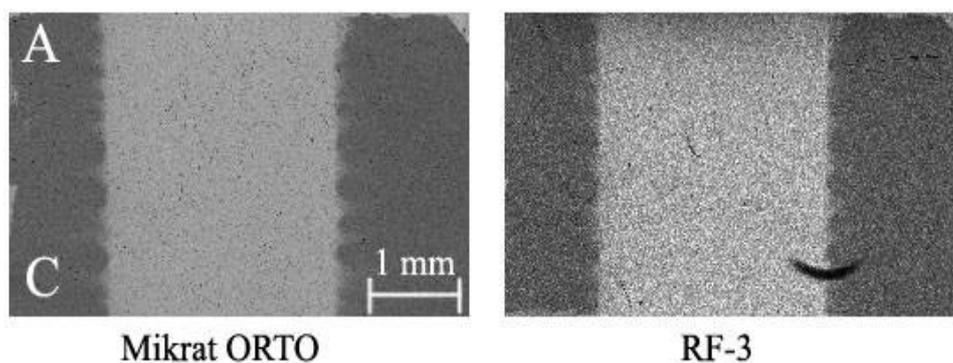


Рис. 2. Рентгенограммы цилиндрического медного проводника с начальным диаметром 1,91 мм на 252 нс от начала протекания тока генератора МИГ на пленках Микрат ОРТО и РФ-3 (С – катод, А – анод)

Fig. 2. X-ray patterns of a cylindrical copper conductor with an initial diameter of 1.91 mm at 252 ns from the start of the MIG generator current flow on Mikrat ORTO and RF-3 films (C is the cathode, A is the anode)

3. Оценки плотности вещества при взрыве медных цилиндрических проводников

Для численного решения задачи восстановления профиля распределения вещества по данным рентгенографических исследований электрического взрыва металлических проводников в вакууме был разработан расчетный код, позволяющий в качестве исходных данных использовать рентгенограммы его взрыва [20, 21].

Как уже говорилось в предыдущем разделе 3, в экспериментах изображение взрывающегося проводника фиксировалось на пленках Микрат ОРТО и РФ-3. Далее пленки сканировались (см. рис. 2), а полученное изображение инвертировалось и обрабатывалось в соответствии с требованиями численного кода к исходному изображению. Оценки плотности вещества проводились в выбранных сечениях проводника, которые соответствуют одному из локальных минимумов или максимумов радиуса плазмы. Локальный минимум можно соотнести с основной массой вещества (кern), а локальный максимум – выбросу плазмы, обусловленному развитием неустойчивости. Результатом обработки рентгенограмм с помощью расчетного кода является распределение $\mu \cdot \rho(r)$, где μ – массовый коэффициент поглощения, $\rho(r)$ – распределение плотности вещества по радиусу взрывающегося проводника.

Для оценки непосредственно самого распределения $\rho(r)$ необходимо выбрать значение массового коэффициента поглощения излучения μ . Эффективная энергия квантов и, соответственно, массовый коэффициент поглощения веществом нагрузки μ зондирующего излучения определялись по пропусканию ступенчатого ослабителя, представлявшего собой фильтры разной толщины, материал которых соответствовал материалу проводника. В данных экспериментах ступенчатый ослабитель представлял собой набор медных фольг с толщинами 6, 12 и 20 мкм. Рентгенограмма ступенчатого осла-

бителя также была получена в эксперименте и обработана с использованием упомянутого выше расчетного кода для получения значений μ . Следует отметить, что оцениваемая этим методом плотность вещества сильно зависит от коэффициента поглощения μ этим веществом зондирующего излучения, а он, в свою очередь, сильно зависит от энергии квантов [24]. То есть, точность измерения плотности будет повышаться с уменьшением диапазона энергий квантов зондирующего рентгеновского излучения, а значит, что в идеальном случае необходим монохроматический источник для зондирования плазменных объектов.

Значения коэффициента поглощения μ , полученные из обработанных с помощью кода рентгенограмм на пленке Микрат ОРТО для ступенчатого ослабителя с толщинами медных фильтров 6, 12 и 20 мкм, составляют ~ 200 ; 229 и 329 см²/г для соответствующих энергий квантов зондирующего излучения 4,87; 4,63 и 4,04 кэВ. Аналогичные оценки коэффициента поглощения μ из рентгенограмм на пленке РФ-3 дают 82, 136 и 198 см²/г для соответствующих энергий квантов зондирующего излучения 6,75; 5,65 и 4,88 кэВ. Первые две оценки μ для пленки РФ-3 при дальнейших оценках плотности не учитывались, так как зондирующее излучение X-пинча резко спадает после 6 кэВ.

На рис. 3 приведены распределения плотности вещества $\rho(r)$ вблизи поверхности проводника для энергий квантов зондирующего излучения 4,04 кэВ и 4,88 кэВ и соответствующих им значений массового коэффициента поглощения излучения μ . Рис. 3, а соответствует распределениям плотности вещества $\rho(r)$ в локальном минимуме (кern), а рис. 3, б – в локальном максимуме (выброс). Зависимости $\rho(r)$, соответствующие левому и правому краю проводника, представлены на рис. 4 голубой и пунктирной розовой кривыми; темно-синим обозначен начальный радиус r_0 «холодного» проводника до начала протекания по нему тока генератора МИГ.

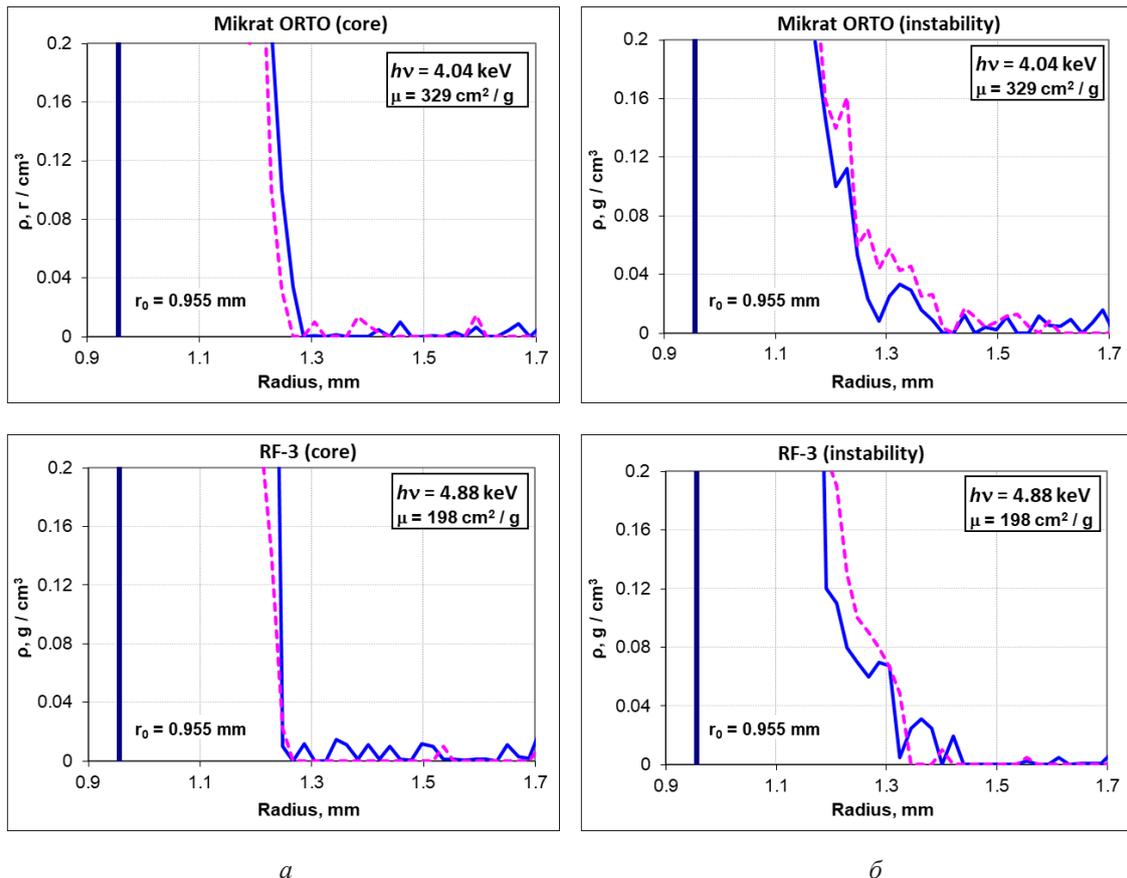


Рис. 3. Зависимости $\rho(r)$ для цилиндрического медного проводника с начальным диаметром 1,91 мм, полученные на 252 нс от начала протекания тока генератора МИГ при энергиях квантов зондирующего излучения 4,04 и 4,88 кэВ:

a – для одного из локальных минимумов вещества (кern); *б* – для одного из локальных максимумов вещества (выброс). Голубая и пунктирная розовая кривые соответствуют левой и правой границам проводника на рентгенограммах, представленных на рис. 2. Темно-синим цветом обозначен начальный радиус проводника r_0

Fig. 3. Dependences $\rho(r)$ for a cylindrical copper conductor with an initial diameter of 1.91 mm, obtained at 252 ns from the beginning of the MIG generator current flow at probing radiation photon energies of 4.04 and 4.88 keV: *a* – for one of the local minima of matter (kern); *б* – for one of the local maxima of matter (spike). The blue and dashed pink curves correspond to the left and right boundaries of the conductor in the X-ray patterns shown in fig. 2. The initial radius of the conductor r_0 is marked in dark blue

Вследствие сильного поглощения излучения веществом цилиндрического проводника, центральная часть изображения, зарегистрированного детектором, приходится на область, находящуюся за пределами динамического диапазона детектора, что не позволяет получить для нее соответствующее распределение $\rho(r)$. В связи с этим оценки распределения плотности при данной энергии квантов зондирующего излучения возможно получить только на краях проводника.

Как можно видеть из рис. 3, за время 252 нс от начала протекания тока генератора МИГ основной материал проводника (кern) расширился как минимум на 275÷295 мкм по радиусу. Распределение плотности монотонное в диапазоне плотностей 0,01÷0,2 г/см³ со средним градиентом 50 г/см⁴. Плотность вещества на радиусе 1,23 мм взорванного проводника составила 0,2÷0,25 г/см³ по обеим рентгенограммам. Энергии квантов зондирующего излучения

недостаточно для просвечивания более плотных слоев вещества в обрабатываемом динамическом диапазоне плотности почернения фотопленок. Распределение плотности в области выброса гораздо менее равномерное. Наблюдаются несколько пиков плотности (см. рис. 3, б). Значения плотности на радиусах (1,15÷1,3) мм в области выброса отчетливо ниже значений плотности в области ядра, что говорит о том, что структура ядра также возмущена неустойчивостями. В области выброса на радиусе 1,38 мм плотность вещества составила $0,024 \pm 0,025$ г/см³, а на радиусе 1,52 мм – $0,013$ г/см³.

Выводы

Исследованы крупномасштабные неустойчивости плазмы, возникающие при скиновом взрыве цилиндрических медных проводников в быстронарастающих магнитных полях с индукцией до 400 Т на сильноточном генераторе МИГ при уровне тока до 2,5 МА.

Радиальное распределение вещества взорванного проводника и внутренняя структура неустойчивостей исследовались по рентгенограммам, полученным с помощью зондирования наносекундным импульсом рентгеновского излучения X-пинча. Из экспериментальных рентгенограмм было определено радиальное распределение плотности вещества на границе плазмы взрывающегося проводника. Полученные результаты демонстрируют успешную реализацию предложенной рентгеновской методики определения абсолютных значений плотности электрически взрывающегося в скиновом режиме проводника. Экспериментальные данные могут быть использованы для верификации одно- и двумерных магнитогидродинамических моделей поведения вещества в экстремальных условиях.

Благодарности / Acknowledgments

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00364, <https://rscf.ru/project/20-19-00364/>.

Авторы благодарят ТомЦКП СО РАН за предоставленную высокоскоростную камеру видеорегистрации HSFC Pro. Авторы выражают благодарность техническому персоналу уникальной установки «Многоцелевой импульсный генератор» МИГ.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 20-19-00364, <https://rscf.ru/project/20-19-00364/>.

The authors are grateful to the Shared Research Facilities of the Tomsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for providing the fourchannel optical camera HSFC Pro. The authors express their gratitude to the technical staff of the unique installation “Multi-Purpose Pulse Generator” MIG.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim A. A., Mazarakis M. G., Sinebryukhov V. A., Kovalchuk B. M., Visir V. A., Volkov S. N., Bayol F., Batrikov A. N., Durakov V. G., Frolov S. V., Alexeenko V. M., McDaniel D. H., Fowler W. E., LeChien K., Olson C., Stygar W. A., Struve K. W., Porter J., Gilgenbach R. M. Development and tests of fast 1-MA linear transformer driver stages // Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams. 2009. V. 12. Article number 050402. P. 1–9. DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.12.050402.
2. Aleksandrov V. V., Gasilov V. A., Grabovski E. V., Gritsuk A. N., Laukhin Ya. N., Mitrofanov K. N., Oleinik G. M., Sasorov P. V., Smirnov V. P., Frolov I. N., Shevel'ko A. P. Increase in the energy density of the pinch plasma in 3D implosion of quasi-spherical wire arrays // Plasma Physics Reports. 2014. V. 40. P. 939–954. DOI: 10.1134/S1063780X14110014.
3. Stygar W. A., Awe T. J., Bailey J. E., Bennett N. L., Breden E. W., Campbell M., Clark R. E., Cooper R. A., Cuneo M. E., Ennis J., Fehl D. L., Genoni T. C., Gomez M. R., Greiser G. W., Gruner F. R., Herrmann M. C., Hutsel B. T., Jennings C. A., Jobe D. O., Jones B. M., Jones P. A., Knapp P. F., Lash J. S., LeChien K. R., Leckbee J., Leeper R., Lewis S. A., Long F. W., Lucero D. J., Madrid E. A., Martin M. R., Matzen M. K., Mazarakis M. G., McBride R. D., Mckee G. R., Miller C., Moore J. K., Mostrom C. B., Mulville T. D., Peterson K. J., Porter J. L., Reisman D., Rochau G. A., Rochau G. E., Rose D. V., Rovang D. C., Savage M. E., Sceiford M. E., Schmit P., Schneider R. F., Schwarz J., Sefkow A., Sinars D. B., Slutz S. A., Spielman R. B., Stoltzfus B. S., Thoma C.,

- Vesey R. A., Wakeland P. E., Welch D., Wisher M. L., Woodworth J. R. Conceptual designs of two petawatt-class pulsed-power accelerators for high-energy-density-physics experiments // *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams*. 2015. V. 18, Iss. 11. Article number 110401. P. 1–30. DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.18.110401.
4. Lindemuth I. R. The ignition design space of magnetized target fusion // *Physics of Plasmas*. 2015. V. 22, Iss. 12. Article number 122712. DOI: 10.1063/1.4937371.
5. Бурцев В. А., Калинин Н. В., Лучинский А. В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
6. Oreshkin V. I., Barenkol'ts S. A., Chaikovsky S. A. Numerical calculation of the current specific action integral at the electrical explosion of wires // *Technical Physics*. 2007. V. 52. P. 642–650. DOI: 10.1134/S1063784207050179.
7. Oreshkin V. I., Chaikovsky S. A. Stability of a nonlinear magnetic field diffusion wave // *Physics of Plasmas*. 2012. V. 19, Iss. 2. Article number 022706. DOI: 10.1063/1.3683557.
8. Peterson K. J., Sinars D. B., Yu E. P., Herrmann M. C., Cuneo M. E., Slutz S. A., Smith I. C., Atherton B. W., Knudson M. D., Nakhleh C. Electrothermal instability growth in magnetically driven pulsed power liners // *Physics of Plasmas*. 2012. V. 19, Iss. 9. Article number 092701. DOI: 10.1063/1.4751868.
9. Oreshkin V. I. Thermal instability during an electrical wire explosion // *Physics of Plasmas*. 2008. V. 15, Iss. 9. Article number 092103. DOI: 10.1063/1.2966121.
10. Oreshkin V. I. Overheat instabilities in the electric explosion of wires // *Technical Physics Letters*. 2009. V. 35, Iss. 1. P. 36–39. DOI: 10.1134/S1063785009010118.
11. Peterson K. J., Awe T. J., Edmund P. Yu., Sinars D. B., Field E. S., Cuneo M. E., Herrmann M. C., Savage M., Schroen D., Tomlinson K., Nakhleh C. Electrothermal Instability Mitigation by Using Thick Dielectric Coatings on Magnetically Imploded Conductors // *Physical Review Letters*. 2014. V. 112, Iss. 13. Article number 135002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.135002.
12. Velikovich A. L., Schmit P. Bell-Plesset effects in Rayleigh-Taylor instability of finite-thickness spherical and cylindrical shells // *Physics of Plasmas*. 2015. V. 22, Iss. 12. Article number 122711. DOI: 10.1063/1.4938272.
13. Лабецкая Н. А., Дацко И. М., Лавринович Д. Р. Развитие крупномасштабных неустойчивостей плазмы в сильных магнитных полях // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2016. № 59. С. 98–101.
14. Oreshkin V. I., Chaikovsky S. A., Datsko I. M., Labetskaya N. A., Mesyats G. A., Oreshkin E. V., Ratakhin N. A., Rybka D. V. MHD instabilities developing in a conductor exploding in the skin effect mode // *Physics of Plasmas*. 2016. V. 23, Iss. 12. Article number 122107. DOI: 10.1063/1.4971443.
15. Labetskaya N. A., Oreshkin V. I., Chaikovsky S. A., Datsko I. M., Rybka D. V., Van'kevich V. A. Optical recording of the surface plasma of cylindrical conductors in strong magnetic fields // *Russian Physics Journal*. 2019. V. 62, Iss. 7. P. 1228–1234. DOI: 10.1007/s11182-019-01839-0.
16. Кадомцев Б. Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1976. 240 с.
17. Иванов А. А. Физика сильнонеравновесной плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 352 с.
18. Лучинский А. В., Ратахин Н. А., Федущак В. Ф., Шепелев Н. А. Многоцелевой импульсный генератор трансформаторного типа (МИГ) // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 1997. Т. 40, № 2. С. 67–75.
19. Petin V. K., Shljakhtun S. V., Oreshkin V. I., Ratakhin N. A. X-ray source for irradiation of large-area objects // *Technical Physics*. 2008. V. 53. P. 776–782. DOI: 10.1134/S1063784208060170.
20. Datsko I. M., Labetskaya N. A., Vankevich V. A. Investigation of the near-surface matter density radial distribution in the skin explosion of cylindrical conductors // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2064. Article number 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/2064/1/012011.
21. Дацко И., Лабецкая Н., Чайковский С., Ванькевич В., Орешкин В. Распределение плотности приповерхностного вещества на начальной стадии процесса плазмообразования при скин-взрыве цилиндрических проводников // *Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*. Tomsk: TPU Publishing House, 2022. P. 199–205. DOI: 10.56761/EFRE2022.S2-P-024801.
22. Semenov V., Rabotkin S., Solovyev A., Datsko I., Grenadyorov A., Oskomov K. X-ray Filter Obtained by Magnetron Sputtering on Light-melting Polymer Substrate // *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, IEEE Xplore*, 2020. Article number 9242184. P. 836–839. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241971.