

## ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЕ НА ТОКОНЕСУЩИХ ЭЛЕКТРОДАХ УСТАНОВКИ АНГАРА-5-1\*

© 2022 г. В. В. Александров<sup>а</sup>, Е. В. Грабовский<sup>а</sup>, Я. Н. Лаухин<sup>а</sup>, К. Н. Митрофанов<sup>а</sup>,  
Г. М. Олейник<sup>а, \*</sup>, Е. И. Предкова<sup>а</sup>, О. Б. Решетняк<sup>а</sup>, С. И. Ткаченко<sup>а, b, c</sup>, И. Н. Фролов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Троицк, Москва, Россия

<sup>б</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный, Россия

<sup>с</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

\*e-mail: oleinik@triniti.ru

Поступила в редакцию 15.06.2021 г.

После доработки 23.09.2021 г.

Принята к публикации 25.09.2021 г.

На установке Ангара-5-1 проведены эксперименты для изучения влияния импульсных сверхсильных токов и мягкого рентгеновского излучения (МРИ) на образование плазмы на поверхности токонесящих электродов. Линейная плотность тока составляла около 1 МА/см, плотность потока мощности МРИ достигала  $\sim 0.8$  ТВт/см<sup>2</sup> в спектральной области излучения 50–500 эВ. Время нарастания тока до максимума –  $\sim 100$  нс. Показано, что в условиях наших нагрузок ионизованные пары, формирующиеся при абляции материала с поверхности электродов, движутся симметрично к середине межэлектродного промежутка со скоростью до 90–95 км/с. Было получено, что воздействие импульсных сверхсильных токов и МРИ на плазмообразование на металлических электродах со слоем органического вещества приводит к более раннему образованию плазмы из органического вещества и, соответственно, к более быстрому (с более высокими скоростями) заполнению межэлектродного промежутка этой плазмой. При интенсивном облучении мягким рентгеновским излучением плазма с электродов расширяется со скоростью до 150 км/с.

*Ключевые слова:* плазма, плазмообразование, сверхсильные магнитные поля, абляция плазмы с электродов, мягкое рентгеновское излучение, гетерофазная система

DOI: 10.31857/S0367292122020019

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На установках по исследованию сильноточных Z-пинчей энергия передается на нагрузку по вакуумным линиям с магнитной самоизоляцией. Линейная плотность тока, протекающего по электроду, может достигать 10 МА/см. Воздействие импульсных сверхсильных токов и МРИ на токонесящие электроды может привести к образованию плазменных потоков, распространяющихся с различными скоростями. Эффективность такой линии в значительной мере зависит от параметров возникающего на электродах плазменного слоя. Образование плазменного слоя может приводить к ионным и электронным утечкам тока поперек межэлектродного зазора.

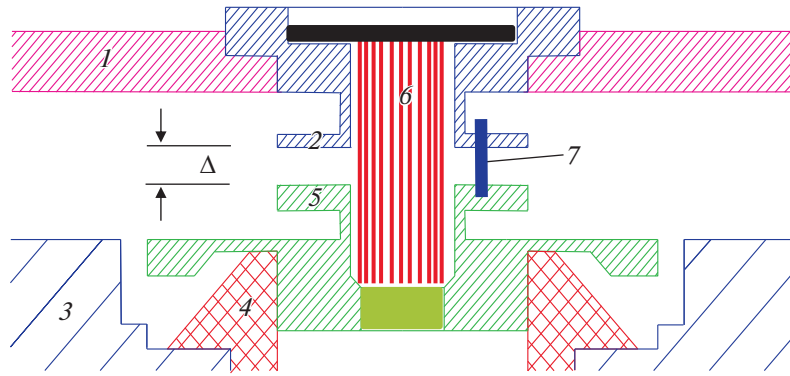
Детальное исследование процессов, происходящих при протекании тока с высокой линейной плотностью по электродам из нержавеющей стали, представлено в различных работах [1–6]. Особый интерес представляет изучение перемыкания зазора редкой плазмой [7–9]. В работе [10] ис-

следовался взрыв поверхности токонесящих электродов. В работах [7–10] исследовалось поведение электродов, изготовленных из тяжелых металлов. В [11] также отмечено, что можно работать с гетерофазной системой – покрыть электрод тонким слоем диэлектрика.

Цель нашей работы состояла в изучении процессов образования плазмы на поверхности электродов из нержавеющей стали вблизи излучающего Z-пинча на установке Ангара-5-1.

Показано, что в нашем случае процесс образования плазмы в большей степени обусловлен облучением электродов МРИ, чем воздействием импульсных сверхсильных токов.

Представлены результаты исследования воздействия импульсных сверхсильных токов и МРИ на плазмообразование в двухкомпонентных системах. Для этого на поверхность электродов из нержавеющей стали была нанесена тонкая пленка (несколько микрон) из цапон-лака. Наличие тонких пленок, состоящих из органических ве-



**Рис. 1.** Схема размещения проволочной сборки и исследуемых электродов. Цифрами обозначены следующие узлы: 1 – анод установки; 2 – сменный исследуемый анодный электрод; 3 – катод установки; 4 – предимпульсный разрядник; 5 – сменный исследуемый катодный электрод; 6 – проволочная сборка диаметром 8 мм; 7 – расположение изображения входной щели ЭОПа; регистрация излучения ЭОПом производилась в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка.

ществ (например, слой вакуумного масла, пары которого поступают в экспериментальную камеру при работе диффузионных насосов), приводит к более раннему образованию плазмы: еще до возникновения мощного импульса МРИ.

## 2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на восьмимодульной установке Ангара-5-1 [12]. Источником мягкого рентгеновского излучения (МРИ) являлся Z-пинч, образованный при токовом сжатии проволочной сборки. Расположение электродов и проволочной сборки, формирующей Z-пинч при токовом сжатии, представлено на рис. 1.

В экспериментах использовались сборки со следующими параметрами: высота проволочной сборки – 16 мм, диаметр – 8 мм; число проволок в сборке 30–60; диаметр проволок 6–7 мкм; материал, из которого изготовлены проволоки – вольфрам. Для размещения такой проволочной сборки в исследуемых частях анода и катода имелись симметричные полости, диаметр полостей равнялся 10 мм. Расстояние между проволочной сборкой и исследуемыми электродами составляло 1 мм; зазор  $\Delta$  между анодом и катодом изменялся в разных экспериментах от 2 до 5 мм. Последовательно с проволочной сборкой устанавливался предимпульсный разрядник [13] для предотвращения влияния предимпульса установки на плазмообразование.

Плотность потока мощности МРИ на минимальном радиусе 5 мм для цилиндрической поверхности электродов достигала  $0.8 \text{ ТВт/см}^2$ , для радиальной поверхности электродов –  $0.2 \text{ ТВт/см}^2$ .

Максимальная линейная плотность тока там же составляла около  $\sim 1 \text{ МА/см}$ , время его нарастания до максимума – около 100 нс.

### 2.1. Диагностические методы

В опытах использовался следующий набор диагностических методик:

1. Полный ток, протекающий через лайнерную нагрузку, регистрировался с помощью 8-ми магнитных зондов, расположенных на радиусе 55 мм от оси лайнера.

2. Набор из 4-х вакуумных рентгеновских диодов (ВРД) за разными фильтрами был размещен на расстоянии 3.5 м от проволочной сборки в радиальном направлении и позволял оценивать мощность излучения Z-пинча [14]. Временное разрешение составляло 0.7 нс. Спектральный диапазон и чувствительность для каждого канала системы регистрации зависят от спектральной чувствительности фотокатода ВРД и спектрального пропускания выбранных фильтров. Зависимости коэффициентов поглощения от энергии квантов взяты из [15], а квантовые эффективности используемых катодов – из [16]. Эти данные сравнивались с базами данных Sandia Laboratories и Ecole Polytechnique. Совпадение было хорошим. Эти данные соответствовали также и полной энергии МРИ, зарегистрированной термопарным калориметром. Было показано, что вклад потоков плазмы в показания термопарного калориметра незначителен.

На основе этих данных была получена оценка плотности потока мощности МРИ в месте расположения ВРД и, в предположении точечного (на расстоянии 3.5 м) и сферически симметричного источника МРИ, полной мощности  $P$ , излучаемой сквозь небольшой зазор  $\Delta$  между электрода-

ми 2 и 5, изображенными на рис. 1. Хотя плазма, сгенерированная проволочным лайнером неустойчива, и яркость ее излучения неоднородна по высоте, тем не менее, по опыту предыдущей работы, можно считать пинч (на радиусе  $r = 5$  мм) линейным однородным источником МРИ. Вся видимая детектором мощность  $P$  излучается через цилиндрическую поверхность площадью  $(2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta)$ , поэтому грубая оценка средней плотности потока мощности на этой поверхности будет  $P/(2\pi r \Delta)$ . Можно провести более аккуратную оценку плотности потока мощности МРИ для разных частей поверхности электрода 2: для плоской, самой нижней на рис. 1, и для цилиндрической в том месте, где они переходят друг в друга на радиусе  $r = 5$  мм. Разумную оценку этих величин можно сделать, предполагая пинч бесконечно тонким линейным источником с мощностью излучения на единицу длины  $P/\Delta$ , и учитывая конечную длину пинча, косинус падения излучения на поверхность и видимую с поверхности электрода часть пинча. Для цилиндрической поверхности электрода в том месте, где она переходит в плоскую на радиусе  $r = 5$  мм оценка плотности потока мощности составит  $0.82P/(2\pi r \Delta)$ . Для плоской поверхности электрода в том месте, где она переходит в цилиндрическую на радиусе  $r = 5$  мм оценка плотности потока мощности составит  $0.28P/(2\pi r \Delta)$ . При зазоре между электродами  $\Delta = 2$  мм эти оценки составят соответственно  $0.84P/(2\pi r \Delta)$  и  $0.26P/(2\pi r \Delta)$ . Такой алгоритм оценки плотности потока мощности на минимальном радиусе  $r = 5$  мм исследуемых электродов использовался для всех опытов в этой работе.

3. Образование плазмы на поверхности электродов регистрировалось по появлению собственного свечения в МРИ на поверхности электродов и межэлектродного зазора. Изображения получены с наносекундным разрешением с помощью 4-х кадрового рентгеновского оптического преобразователя (РЭОП), разработанного для регистрации импульсных источников излучения наносекундного диапазона длительностей. Основа РЭОПа – 4-х кадровая рентгеновская камера на основе секционированной микроканальной пластины (МКП) усилителя яркости изображений. Четыре изображения исследуемого объекта в рентгеновском излучении создавались на четырех секциях открытого фотокатода МКП с помощью четырех камер-обскур. Включение электронного усиления каждой секций МКП осуществлялось подачей импульсного высоковольтного питания в требуемые моменты времени. Длительность экспозиции кадра составляла 3 нс. Область спектральной чувствительности камеры лежит в диапазоне от 100 эВ до нескольких тысяч эВ с максимумом в районе 200 эВ. Пространственное разрешение методики составляло 85–100 мкм на объекте для рентгеновских кван-

тов в диапазоне энергий 250–600 эВ. Ось РЭОПа располагалась перпендикулярно оси лайнера.

4. Для получения интегральных по времени изображений использовалась рентгеновская камера-обкура, которая обеспечивала пространственное разрешение по объекту 30 мкм для квантов с энергией 700 эВ. Малое входное отверстие в камере не позволяло фиксировать детали изображения в квантах менее 60 эВ. Изображение регистрировалось на фотопластинку типа ВР-П с разрешающей способностью 1730 штр/мм.

5. Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) СФЭР–2 [17] в режиме щелевой развертки использовался для регистрации свечения в видимом диапазоне спектра. Временное разрешение составляло 0.3 нс. Пространственное разрешение по объекту составляло менее 80 мкм, а глубина резкости в области объекта составляла  $\pm 23$  мм в радиальном направлении. Прибор настраивался так, чтобы в щель прибора попадал свет из узкой области (90 мкм) на радиусе 7 мм от оси.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

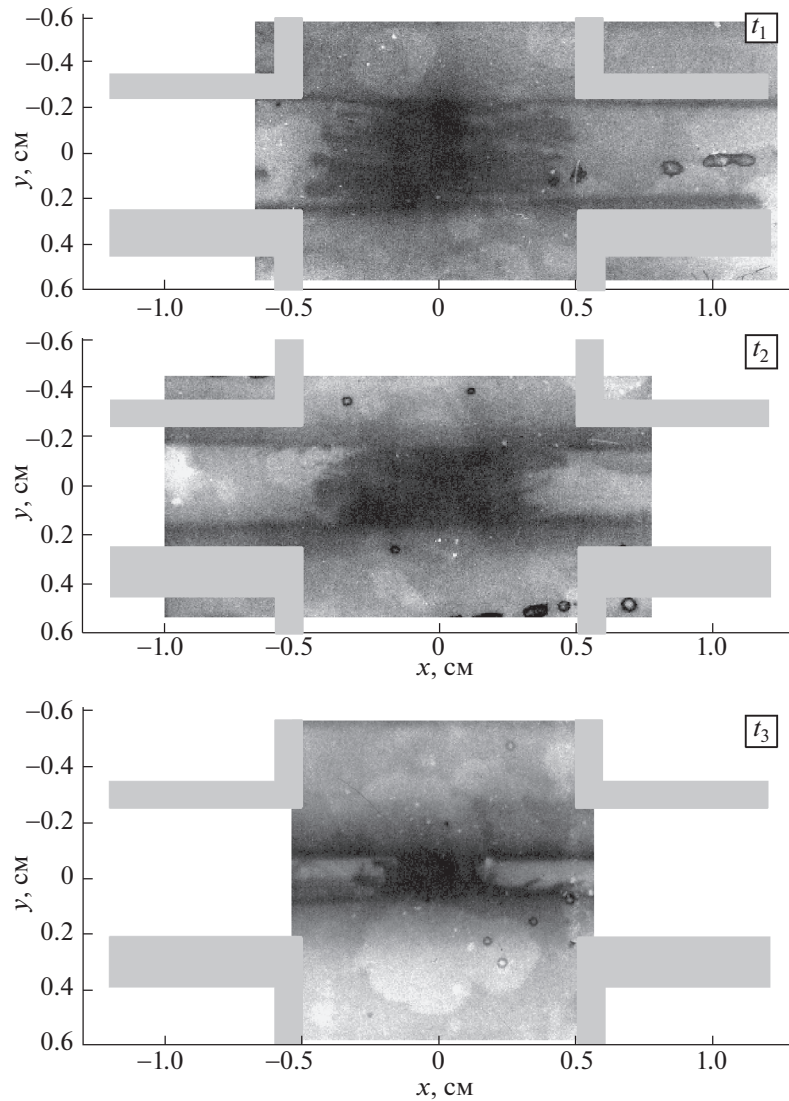
#### 3.1. Эксперименты с зазором между электродами 5 мм

На рис. 2 представлены три последовательные фотографии исследуемых электродов из нержавеющей стали в процессе протекания по ним тока и облучения МРИ; изображения получены с помощью РЭОПа. Зазор между анодом и катодом составлял 5 мм. Время между кадрами составляет 10 нс. (Временная синхронизация этих кадров с током и МРИ представлена на рис. 3.) На каждом кадре, показанном на рис. 2 в том же масштабе с пространственной привязкой изображены в виде угловых профилей: сверху – нижняя часть исследуемого анодного электрода, снизу – верхняя часть исследуемого катодного электрода.

Известно, что магнитные поля на поверхности металла  $< 1$  МГс не приводят к образованию плазмы [19]. В нашем случае здесь и далее появление плазмы на поверхности электродов в большей степени объясняется облучением электродов интенсивным МРИ.

На рис. 3 представлены зависимости от времени тока через разряд и мощности МРИ, тремя стрелками показаны моменты времени, соответствующие трем кадрам, представленным на рис. 2. Амплитуда тока составляет около 2 МА, он нарастает до максимума за  $\sim 95$  нс; максимальная линейная плотность тока составила 0.63 МА/см; максимальная магнитная индукция на поверхности электродов составила 0.8 МГс.

Зарегистрированная мощность  $P$  в этом выстреле составила около 1 ТВт; в соответствии с оценкой плотность потока мощности МРИ на радиусе 5 мм для цилиндрической поверхности



**Рис. 2.** Три последовательные фотографии исследуемых электродов, полученные с помощью РЭОПа в процессе протекания по ним тока и облучения МРИ. Времена между кадрами 10 нс. Моменты времени ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ) указаны стрелками на рис. 3. Угловые профили сверху – нижняя часть анода, снизу – верхняя часть катода.

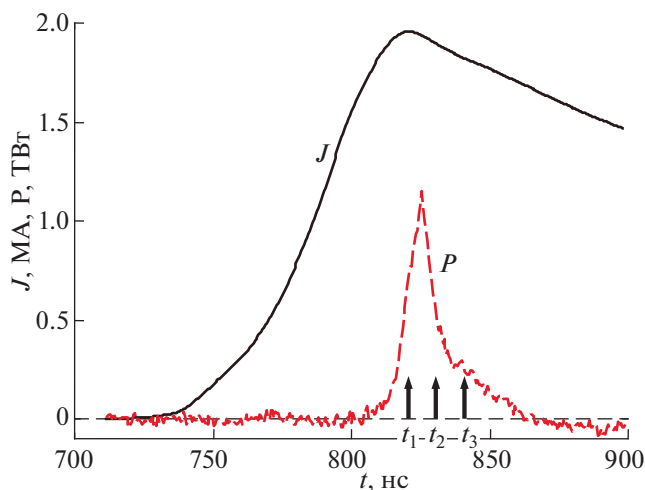
электродов достигала  $0.5 \text{ ТВт/см}^2$ , для плоской поверхности электродов –  $0.2 \text{ ТВт/см}^2$  (см. пункт 2 раздела 1.1).

Первый кадр из представленных изображений получен на фронте нарастания импульса МРИ. На изображении отчетливо виден сжимающийся лайнер, рассеянный горизонтальными полосами, по которым происходит прорыв магнитного потока в центральную область лайнера [18].

Отчетливо также видно свечение плазмы на поверхности электродов. Нанесенные на рисунок контуры исследуемых электродов изображены в том же масштабе, что и изображение пинча. Как видно, изображения светящихся электродов и контуры этих деталей совпадают. Это означает, что на момент получения этого кадра плазма, ре-

гистрируемая по свечению в рентгеновском диапазоне, не успела значительно удалиться от электродов.

Второй кадр из представленных изображений получен после достижения максимума импульса МРИ. Как видно, области свечения плазмы, образованной на анодных и катодных электродах, переместились ближе к центральной области межэлектродного пространства. Тот факт, что области ярко светящейся плазмы оторвались от электродов, может свидетельствовать о том, что ток, в основном, течет по этой плазме и проводимость этой плазмы достаточна для заметного скинирования тока. В результате тепловыделение от протекающего тока сосредоточено на внешней поверхности плазменного слоя, что и видно на



**Рис. 3.** Временные зависимости полного разрядного тока  $J$  и мощности МРИ ( $P$ ). Внизу стрелками ( $\uparrow$ ) условно показаны три момента времени ( $t_1, t_2, t_3$ ), соответствующие трем кадрам, представленным на рис. 2. Приведенная мощность МРИ соответствует излучению видимой детектором части пинча (5 мм).

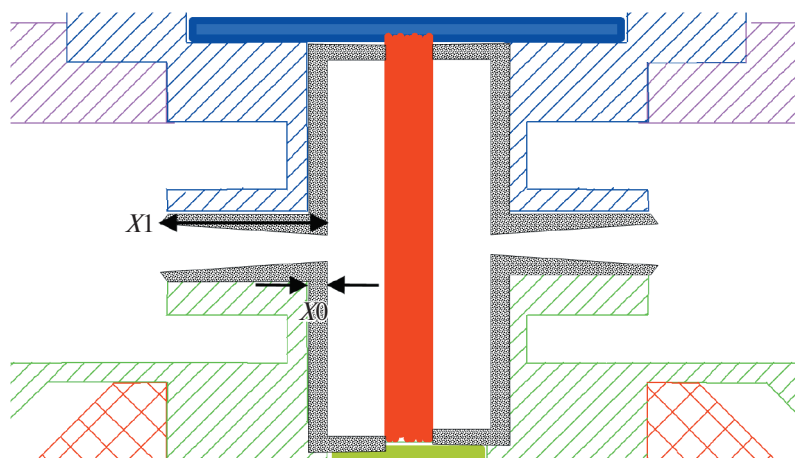
полученном изображении. В соответствии с оценкой средняя скорость движения плазменного слоя между первым и вторым кадром составляет 90 км/с.

Третий кадр получен через 15 нс после максимума импульса МРИ. Как видно, области свечения плазмы, образованной на анодных и катодных электродах, переместились еще ближе к центральной области межэлектродного пространства. В соответствии с оценкой средняя скорость движения плазменного слоя между вторым и третьим кадром составляет 95 км/с.

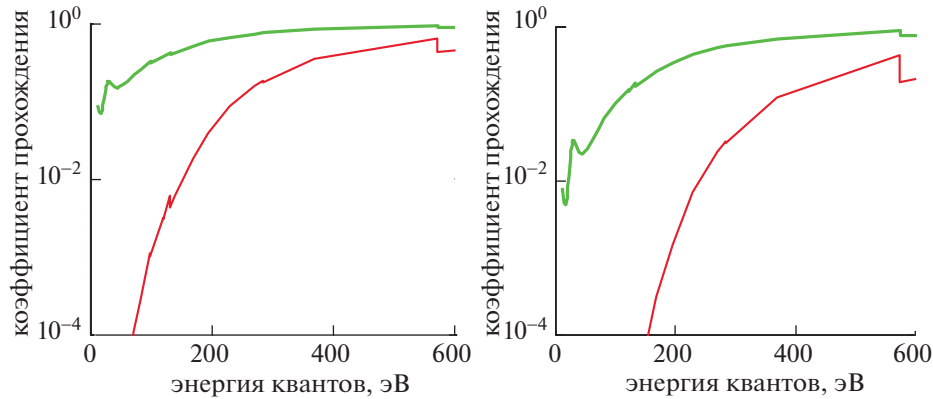
Судя по изображениям, представленным на рис. 2 в моменты времени  $t_2$  и  $t_3$ , можно отметить, что МРИ пинча полностью поглощается в приэлектродной плазме. Почему же, тем не менее, МРИ доходит до поверхности электродов, производя плазму при взаимодействии с ними? На рис. 4 условно изображены сжимающийся пинч и электроды, покрытые плазмой. Излучению пинча, чтобы достичь поверхности электродов, надо пройти по плазме расстояние  $X_0$  (в нашем случае для момента  $t_3$ ,  $X_0 \sim 0.2$  см), а чтобы попасть в регистратор (РЭОП), надо пройти по плазме расстояние  $X_1$  (в нашем случае для момента  $t_3$ ,  $X_1 \sim 1.2$  см).

Чтобы оценить коэффициент прохождения МРИ по плазме надо знать распределение ее плотности. Грубую оценку коэффициента прохождения МРИ можно получить, используя зависимости коэффициентов поглощения от энергии квантов [15] и предполагая распределение плотности плазмы однородным. На рис. 5 представлены коэффициенты прохождения МРИ для двух значений расстояния  $X_0$  и  $X_1$  и для двух значений плотности плазмы  $R_0$ : 100 и 200 мкг/см<sup>3</sup>.

Как видно из рисунка, для энергий квантов 100–200 эВ коэффициент прохождения МРИ на расстояние  $X_0$  гораздо больше, чем при прохождении на расстояние  $X_1$ . Поэтому в моменты времени  $t_2$  и  $t_3$  излучение пинча полностью поглощается в приэлектродной плазме на пути  $X_1$ , соответственно, и пинч, находящийся за приэлектродной плазмой, не виден. Тем не менее, излучение пинча доходит до поверхности электродов, проходя расстояние  $X_0$ , и вызывает на их поверхности плазмообразование. Таким образом, отсюда имеем грубую оценку плотности плазмы 100–200 мкг/см<sup>3</sup>.



**Рис. 4.** Схема прохождения МРИ к облучаемым электродам ( $X_0$ ) и к РЭОПу ( $X_1$ ). Основные элементы на схеме такие же, как и на рис. 1; серым показан приэлектродный слой плазмы.



**Рис. 5.** Зависимости коэффициентов прохождения МРИ от энергии квантов на расстояниях  $X_0$  и  $X_1$  для двух значений плотности плазмы: слева – 100, справа – 200  $\text{мкг}/\text{см}^3$ . Верхние кривые – для расстояния  $X_0$ , нижние – для  $X_1$ .

### 3.2. Эксперименты с зазором между электродами 2.5 мм

На рис. 6 представлены три последовательных изображения в МРИ исследуемых электродов. Расстояние между исследуемыми частями анода и катода было 2.5 мм; время между кадрами составляло 10 нс. На каждом кадре рис. 6 в том же масштабе с пространственной привязкой изображены в виде угловых профилей: сверху – нижняя часть исследуемого анодного электрода, снизу – верхняя часть исследуемого катодного электрода.

На рис. 7 представлены зависимости от времени тока через разряд (верхняя кривая) и мощности МРИ (нижняя кривая). Три стрелками отмечены моменты времени регистрации трех кадров, приведенных на рис. 6. Так же, как и в предыдущем подразделе, амплитуда тока составляет около 2 МА, он нарастает до максимума за  $\sim 100$  нс. Минимальный радиус исследуемых электродов равнялся 5 мм, так что максимальная линейная плотность тока составила 0.63 МА/см. Максимальная магнитная индукция на поверхности электродов составила 0.8 МГс.

В отличие от предыдущего эксперимента с зазором 5 мм, представленные на рис. 6 кадры были зарегистрированы до достижения максимума в импульсе МРИ. Оценка мощности МРИ в момент регистрации первого и второго кадров была меньше уровня шума и составила менее 0.05 ТВт. Оценка мощности МРИ в момент получения последнего кадра составила около 0.1 ТВт; оценка плотности потока мощности МРИ на радиусе 5 мм для цилиндрической поверхности электродов достигала 0.1 ТВт/см<sup>2</sup>, для плоской поверхности электродов – 0.03 ТВт/см<sup>2</sup> (см. пункт 2 раздела 1.1).

На первом и втором кадрах отчетливо видно свечение плазмы, заполняющей внутренность проволочной сборки. На третьем кадре видно,

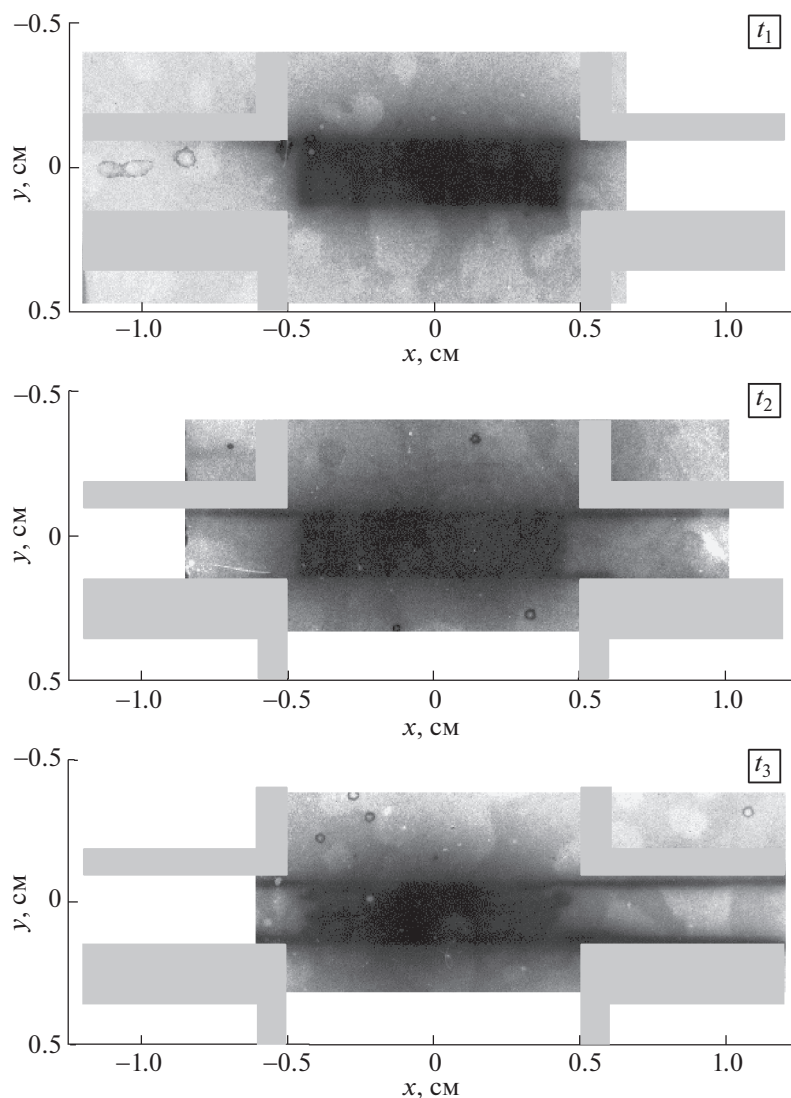
что вертикальные границы этой плазмы перестают быть прямой линией: начинается прорыв магнитного потока в центральную область лайнера. Заметим, что на этих трех кадрах видно свечение плазмы, практически совпадающее с положением электродов. Возникновение этой плазмы, так же, как и в предыдущем случае, вызвано МРИ. При этом, при плотности потока мощности  $\sim 0.03$  ТВт/см<sup>2</sup> еще не видно движения плазменных слоев от плоской поверхности электродов к центру межэлектродного промежутка.

### 3.3. Электроды с пленкой, состоящей из органического вещества

Исследование свойств двухкомпонентных систем при высоких плотностях тока представляет большой интерес. Воздействие импульсных сверхсильных магнитных полей и токов на такие системы может привести к образованию нескольких различных плазменных потоков, распространяющихся с различными скоростями.

Испарение пленок, состоящих из органических веществ, которые появляются на токонесящих электродах (например, слоя масла, поступающего при работе диффузионных насосов) может привести к раннему заполнению плазмой межэлектродного промежутка. Для выяснения возможных изменений эволюции приэлектродной плазмы в таких условиях, на поверхность электродов из нержавеющей стали наносилась тонкая пленка (несколько микрон) из цапон-лака.

В этом эксперименте межэлектродный зазор составлял 2.5 мм. Ток в максимуме составлял 1.1 МА, длительность нарастания тока до его максимального значения – 100 нс. На радиусе 5 мм получены следующие значения: линейная плотность тока – 0.35 МА/см, магнитное поле – 0.44 МГс.



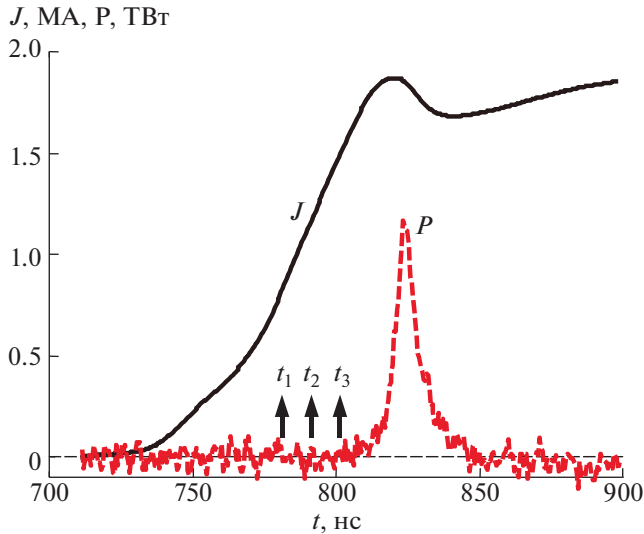
**Рис. 6.** Три последовательные фотографии исследуемых электродов с зазором 2.5 мм, полученные с помощью РЭОПа в процессе протекания по ним тока и облучения МРИ. Времена между кадрами 10 нс. Моменты времени ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ) указаны стрелками на рис. 7. Угловые профили сверху – нижняя часть анода, снизу – верхняя часть катода.

Эксперимент с пленкой из цапон-лака позволил нам рассмотреть структуру плазменного слоя в середине межэлектродного промежутка. На рис. 8 представлено изображение пинча и межэлектродного зазора, полученное через 10 нс после достижения максимума МРИ. Длительность экспозиции – 10 нс. На этом рисунке два участка изображения представлены с другим уровнем контраста. В середине анодно-катодного промежутка, несмотря на пространственное разрешение 100 мкм, отчетливо видны две яркие линии, расстояние между ними  $\sim 0.2$  мм. Таким образом, в середине межэлектродного промежутка между токовыми слоями через 10 нс после достижения максимума МРИ остается зазор порядка 0.2 мм.

Повышенная светимость этих линий обусловлена взаимодействием (столкновением) потоков расширяющейся плазмы со стороны катода и анода.

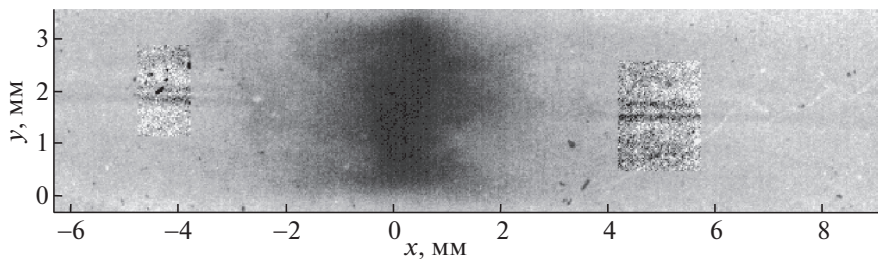
Скорость движения плазменных слоев, полученных из органики, составляет  $\sim 150$  км/с, что превышает скорость движения плазмы для нержавеющей стали ( $\sim 90$  км/с). Пленка из органических веществ может испаряться и переходить в плазменное состояние за счет токового нагрева и воздействия на нее мягкого рентгеновского излучения задолго до достижения максимума МРИ.

На рис. 9 представлено интегральное по времени изображение пинча и межэлектродного зазора в МРИ, полученное с помощью камеры обскуры. Внутри радиуса 4 мм видно свечение ис-



**Рис. 7.** Временные зависимости полного разрядного тока  $J$  и мощности МРИ ( $P$ ). Внизу стрелками ( $\uparrow$ ) условно показаны три момента времени ( $t_1, t_2, t_3$ ), соответствующие трем кадрам, представленным на рис. 6. Приведенная мощность МРИ соответствует излучению видимой детектором части пинча (2.5 мм).

ходной лайнерной сборки диаметром 8 мм. В центре, вблизи радиуса 0 мм, виден пинч на фазах схлопывания и начала разлета. Яркая горизонтальная линия в середине анодно-катодного промежутка обусловлена взаимодействием (столкновением) потоков расширяющейся плазмы со стороны катода и анода. Удивительно и неожиданно, что эта область ровная, без видимых неустойчивостей, что свидетельствует о том, что плазма расширяется однородно, образуя плоский двойной слой. Следует отметить, что яркая узкая горизонтальная область в середине анодно-катодного промежутка, представленная на рис. 8 и на рис. 9, была зарегистрирована в разных выстрелах и разными приборами, что подтверждает достоверность этого факта. Вне радиуса 5.5 мм эта область становится более широкой, размытой, диффузной, и с увеличением радиуса пропадает. Видимо,



**Рис. 8.** Изображение пинча и анодно-катодного промежутка в собственном свечении МРИ через 10 нс после достижения пиковой мощности МРИ в эксперименте с пленкой из цапон-лака. Длительность экспозиции 10 нс. Анод —верху, катод — внизу.

в этой области интенсивность воздействия излучения на электрод была заметно меньшей.

Несмотря на то, что образованная на электродах плазма практически перекрыла зазор анод-катод, видимо, она не перехватывает весь ток: сжатое состояние пинча все же было сформировано, что отчетливо видно на рис. 9 в центре.

### 3.4. Сопоставление влияния МРИ и нагрева током

Возможны две причины возникновения плазмы на поверхности токонесущих электродов: 1) за счет высокой плотности тока и соответственно нагрева поверхностного слоя металла током и 2) за счет облучения импульсом МРИ.

При высоких плотностях тока ( $\sim 3$  МА/см) поверхностный слой будет разогреваться, испаряться с последующим образованием плазмы и разлетаться. В работе [20] приведена напряженность электрического поля на внешней поверхности электрода из нержавеющей стали с теми же параметрами, что и в настоящем эксперименте, при протекании по нему тока установки Ангара-5-1. На основе этих данных была вычислена плотность мощности, выделяемой на нагрев поверхности электрода: через 100 нс после начала тока она составила  $\sim 25$  ГВт/см<sup>2</sup>.

Поскольку плотность потока мощности излучения пинча на плоской поверхности электродов составляет  $\sim 0.2$  ТВт/см<sup>2</sup>, то естественно ожидать, что в этом случае роль нагрева электродов током будет крайне мала. Для экспериментального подтверждения этого утверждения были проведены эксперименты (см. рис. 10) с закороткой, установленной вместо проволочного лайнера. В качестве закоротки использовался полый цилиндр из нержавеющей стали диаметром 8 мм и толщиной 150 мкм. Во время этих экспериментов с закороткой импульс МРИ практически отсутствовал, а разрядный ток был на уровне 3 МА.

На рис. 10 приведена временная развертка видимого свечения межэлектродного зазора, полученная с помощью ЭОПа на радиусе 7 мм от оси.

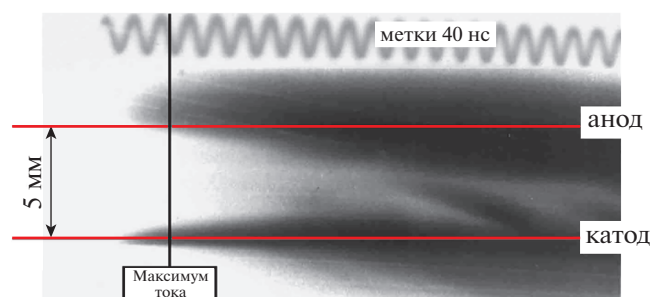




**Рис. 9.** Интегральная по времени обскурограмма пинча и анодно-катодного промежутка в собственном свечении МРИ. Значения радиусов  $R$  указаны в [мм].

Положение входной щели ЭОПа представлено на рис. 1, регистрация излучения производилась ЭОПом в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка. Мы видим, что здесь также происходят процессы генерации светящейся плазмы, обусловленные джоулевым нагревом электродов и испарением тонких слоев масла, появившихся при работе диффузионных насосов. Длительность развертки ЭОПа в этом эксперименте была увеличена, чтобы можно было регистрировать медленный разлет плазмы. Скорость разлета плазмы в этом случае была гораздо меньше, чем в предыдущих опытах, и составила 5–6 км/с. Подчеркнем, что в этом эксперименте свечение в центре зазора регистрируется в видимом, а не в мягком рентгеновском диапазоне спектра.

Эта постановка эксперимента, в совокупности с представленными выше результатами, позволила точно установить, что в наших условиях основной причиной относительно быстрых абляционных процессов на электродах является облучение МРИ с плотностью потока мощности  $\sim 0.2$  ТВт/см<sup>2</sup>, а не джоулев нагрев электродов током с линейной плотностью  $\sim 1$  МА/см.



**Рис. 10.** Временная развертка видимого свечения плазмы, возникающей в эксперименте с короткой (без импульса МРИ). Пространственная щель развертки располагалась перпендикулярно зазору на радиусе  $R = 7$  мм от оси.

#### 4. ВЫВОДЫ

На установке Ангара-5-1 проведены эксперименты с целью изучения влияния импульсных сверхсильных токов и мягкого рентгеновского излучения на образование плазмы на поверхности токонесущих электродов. Линейная плотность тока составляла около 1 МА/см, плотность потока мощности МРИ – около 0.5 ТВт/см<sup>2</sup> в спектральной области излучения 50–500 эВ; время нарастания тока до максимума составляло около 100 нс.

Изучались образование и динамика плазмы при разных расстояниях (2.5–5 мм) между исследуемыми частями анода и катода из нержавеющей стали. Показано, что в условиях наших нагрузок потоки плазмы, сформированной из вещества, испарившегося с электродов, движутся симметрично к середине межэлектродного промежутка со скоростью до 90–95 км/с.

Было получено, что воздействие импульсных сверхсильных токов и МРИ на плазмообразование в двухкомпонентных (нержавеющая сталь–цапон-лак) системах приводит к более раннему образованию плазмы из органического вещества и к более быстрому (с более высокими скоростями) заполнению межэлектродного промежутка этой плазмой. Таким образом, наличие пленки на электродах, состоящей из органики (например, слоя масла, появляющегося при работе диффузионных насосов), приведет к ее раннему испарению еще на стадии начала воздействия импульса МРИ. При интенсивном облучении МРИ такая плазма будет расширяться со скоростью около 150 км/с и образует в середине межэлектродного промежутка двойной слой. Вслед за плазмой, сформированной из органики, в зазор поступает плазма, сформированная из вещества металлических электродов.

Столкновение потоков расширяющейся плазмы приводит к образованию в центре межэлектродного зазора ярко светящейся узкой области–линии. Установлено, что при столкновении в середине зазора массы светящегося вещества, абли-

рованного с противоположных электродов, как правило, не смыкаются и образуют двойной слой: между ними остается зазор около 0.2 мм с магнитным полем, которое препятствует поперечному перетеканию зарядов (рис. 8 и рис. 9). Удивительно и неожиданно, что, этот двойной слой ровный, без неустойчивостей, что свидетельствует о том, что плазма расширяется однородно.

Показано, что эта плазма не перехватывает весь ток, поскольку позже происходит пинчевание нагрузки.

Таким образом, проведенные эксперименты дают основания надеяться, что при зазоре 5 мм, при плотности тока по электроду из нержавеющей стали  $\sim 1$  МА/см и поверхностной плотности потока МРИ  $\sim 0.5$  ТВт/см<sup>2</sup>, большая часть запащенной в генераторе энергии может быть передана в нагрузку. Таким образом, при наших условиях во время рабочего разряда тока через лайнер, в течение, по крайней мере, не менее 25 нс после достижения максимума МРИ можно не опасаться больших поперечных потерь тока.

Авторы благодарят Самохина А.А. за содержательную критику этой работы и полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-21-00082).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cuneo M.E.* // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1999. V. 6. № 4. P. 469
2. *Welch D.R., Bennett N., Genoni T.C., Rose D.V., Thoma C., Miller C., Stygar W.A.* // Physical Review Accelerators and Beams. 2019. V. 22. P. 070401.
3. *Грабовский Е.В., Левашов П.Р., Олейник Г.М., Олсон С.Л., Сасоров П.В., Смирнов В.П., Ткаченко С.И., Хищенко К.В.* // Физика плазмы. 2006. Т. 32. С. 782.
4. *Ткаченко С.И., Грабовский Е.В., Калинин Ю.Г., Олейник Г.М., Александров В.В., Хищенко К.В., Левашов П.Р., Ольховская О.Г.* // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 12–2. С. 279.
5. *Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Гришук А.Н., Королев В.Д., Лаухин Я.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Предкова Е.И., Самохин А.А., Смирнов В.П., Фролов И.Н., Шишлов А.О.* // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 6. С. 503–509.
6. *Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Олейник Г.М., Предкова Е.И., Самохин А.А., Ткаченко С.И., Фролов И.Н., Хищенко К.В., Шишлов А.О.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 4. С. 327.
7. *Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Черненко А.С., Данько С.А., Калинин Ю.Г., Кингсен А.С., Королев В.Д., Мижирецкий В.И., Смирнов В.П., Шашков А.Ю., Сасоров П.В., Ткаченко С.И.* // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 4. С. 291.
8. *Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Данько С.А., Жужунашвили А.И., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Кингсен А.С., Королев В.Д., Мижирецкий В.К., Смирнов В.П., Устровев Г.И., Черненко А.С., Шашков А.Ю., Ткаченко С.И.* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2008. № 4. С. 3.
9. *Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Данько С.А., Жужунашвили А.И., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Кингсен А.С., Королев В.Д., Мижирецкий В.И., Смирнов В.П., Ткаченко С.И., Черненко А.С.* // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 7. С. 627.
10. *Chaikovsky S.A., Oreshkin V.I., Datsko I.M., Labetskaya N.A., Ratakhin N.A.* // Physics of Plasmas. 2014. V. 21. P. 042706.
11. *Грабовский Е.В., Левашов П.Р., Олейник Г.М., Олсон С.Л., Сасоров П.В., Смирнов В.П., Ткаченко С.И., Хищенко К.В.* // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 9. С. 782.
12. *Альбикиев З.А., Велихов Е.П., Веретенников А.И., Глухих В.А., Грабовский Е.В., Грязнов Г.М., Гусев О.А., Жемчужников Г.Н., Зайцев В.И., Золотовский О.А., Истомин Ю.А., Козлов О.В., Крашенинников И.С., Курочкин С.С., Латманнизова Г.М., Матвеев В.В., Минеев Г.В., Михайлов В.Н., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Певчев В.П., Перлин А.С., Печерский О.П., Письменный В.Д., Рудаков Л.И., Смирнов В.П., Царфин В.Я., Ямпольский И.Р.* // Атомная энергия. 1990. Т. 68. С. 26.
13. *Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю., Фролов И.Н.* // Влияние скорости нарастания тока на эффект поляризации в сборке на установке Ангара-5-1. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 11. С. 1006.
14. *Браницкий А.В., Олейник Г.М.* // ПТЭ. 2000. № 3. С. 49.
15. *Day R.H., Lee P.* // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. № 11. P. 6965.
16. *Wm. J. Veigele.* Atomic Data Tables. (1973). 5, 51. P. 51–111.
17. *Борисов В.В., Веретенников А.И., Вихарев В.Д., Зайцев В.И., Зотов В.П., Леонтьевский А.Е., Михайлов В.Н., Славнов Ю.К., Смирнов В.П., Усов Ю.Б., Хромочкин Е.Д., Царфин В.Я.* // ПТЭ. 1989. № 1. С. 215.
18. *Александров В.В., Грабовский Е.В., Зукакишвили Г.Г., Зурин М.В., Комаров Н.Н., Красовский И.В., Митрофанов К.Н., Недосеев С.Л., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю., Самохин А.А., Сасоров П.В., Смирнов В.П., Федулов М.В., Фролов И.Н., Чернов А.А.* // ЖЭТФ. 2003. Т. 124. В. 10. С. 829.
19. *Knoepfel H.* Pulsed High Magnetic Fields. Physical Effects and Generation Methods Concerning Pulsed Fields up to Megaersted Level (London: North-Holland, 1970).
20. *Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Джангобегов В.В., Лаухин Я.Н., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Сасоров П.В., Ткаченко С.И., Фролов И.Н.* // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 4. С. 342.