ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2020, том 46, № 6, с. 503–509

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9

ЭЛЕКТРОВЗРЫВ НЕСУЩЕЙ МЕГААМПЕРНЫЙ ТОК ПОВЕРХНОСТИ

© 2020 г.
В. В. Александров[a], А. В. Браницкий[a], Е. В. Грабовский[a], А. Н. Грибов[a], А. Н. Грицук[a], В. Д. Королев[a], Я. Н. Лаухин[a], К. Н. Митрофанов[a], Г. М. Олейник[a], Е. И. Предкова[a], А. А. Самохин[a], В. П. Смирнов[a], И. Н. Фролов[a], А. О. Шишлов[a, *]

[a] *ГНЦ "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", Москва, Россия*

**e-mail: Shishlov@triniti.ru*

Поступила в редакцию 08.11.2019 г.
После доработки 12.12.2019 г.
Принята к публикации 19.12.2019 г.

Исследовалось образование плазмы на поверхности токонесущего электрода сильноточной установки при протекании по нему тока с линейной плотностью до 4 МА/см при его покрытии свинцовой фольгой или керамикой. Скорость разлета плотной плазмы из электрода, сделанного из нержавеющей стали, составила 2–10 км/с, а при его покрытии свинцом – 1–6 км/с. В проводимых экспериментах отсутствовала нагрузка, типичная для таких установок, – источник интенсивного рентгеновского излучения. Разлет плазмы с электродов, имеющих керамическое покрытие, начинается на 200 нс позже чем для металлических электродов.

Ключевые слова: вакуумные транспортирующие линии, электровзрыв поверхности металла, свинцовое покрытие электрода, керамическое покрытие электрода

DOI: 10.31857/S0367292120060013

ВВЕДЕНИЕ

Современные мощные электрофизические установки с субмикросекундными импульсами тока 1–30 МА используют вакуумные транспортирующие линии (ВТЛ) с магнитной самоизоляцией. В таких установках необходимо учитывать электрический взрыв поверхности токонесущих электродов при экстремальных состояниях. В частности, к взрыву поверхности проводника и образованию плотной низкотемпературной плазмы приводит увеличение магнитного поля до значения:

$$B_S \approx \sqrt{8\pi E_0},$$

где E_0 – энергия сублимации металлов при нормальных условиях [1].

Взрыв поверхности проводника приводит как к разрушению электродов, так и, что более важно, к образованию расширяющейся в межэлектродный зазор приэлектродной плазмы, что может привести к потерям тока в ВТЛ, уменьшая эффективность передачи энергии к нагрузке, что может потребовать замены разрушенного электрода [2–4]. Поведение электродов в мощных ВТЛ, а также динамика образования плазмы на токонесущих электродах в различных условиях, исследовалось в [4–8]. В работах [5–7] исследовалось поведение электродов, изготовленных из тяжелых металлов. В частности, в работах [4–6] рассматривается динамика разреженной плазмы в межэлектродном зазоре, которая может привести к закоротке ВТЛ; в текущей работе влияние плазмы относительно малой плотности на потери тока в ВТЛ не учитывалось. В [3] также отмечено, что для уменьшения области анода с плазменным слоем можно покрыть его тонким слоем диэлектрика. Даже если диэлектрик не изменит плазмообразование на поверхности электрода, он является препятствием для разлета плазмы в межэлектродное пространство. Для этого сам диэлектрик не должен быть источником плазмы.

В данной работе рассматривалось поведение поверхности токонесущего электрода при протекании по нему тока с линейной плотностью до 4 МА/см при его покрытии свинцовой фольгой или керамикой. В настоящем эксперименте, в отличие от большинства установок, вблизи исследуемых электродов отсутствовал источник интенсивного рентгеновского излучения. Как отмечено в статье [9], такое излучение вызывает дополнительное плазмообразование на электроде.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Работа проводилась на установке Ангара-5-1, при линейной плотности тока на исследуемом электроде 4 МА/см и плотности тока в слое 200 мкм до 2×10^8 А/см^2. Время нарастания тока

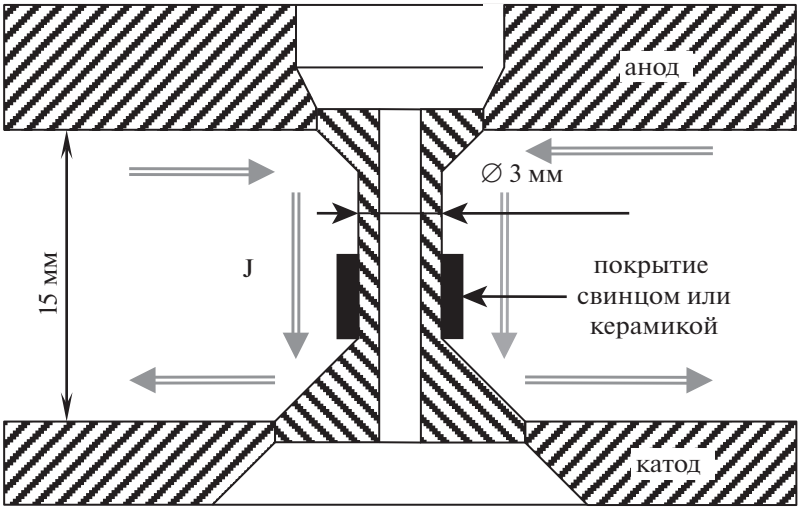

Рис. 1. Центральный узел установки с исследуемым объектом.

до максимального значения составляет около 100 нс. На рис. 1 приведена часть конструкции центрального узла установки [10], в который помещен испытуемый цилиндрический электрод, представляющий собой трубку из нержавеющей стали диаметром 3 мм, высотой 6 мм с толщиной стенки 0.5 мм. Нижняя часть рассматриваемого электрода покрывалась защитным веществом: свинцом или керамикой. Толщина покрытия из свинца составляла от 100 до 200 мкм, толщина керамического покрытия – 700 мкм.

Определение внешней границы плазмы электродов проводилось при помощи трехкадрового теневого фотографирования. Использовался лазер SL-233 [10] на длине волны 532 нм и при длительности импульса 0.1 нс. Задержки между первым и вторым, а также вторым и третьим лазерными пучками составляли соответственно 63.3 и 58.5 нс. Пространственное разрешение по объекту 40 мкм. Регистрация собственного излучения электрода в оптическом диапазоне камерой СФЭР-2 в режиме щелевой развертки проводилась с временным разрешением 0.3 нс и с пространственным разрешением по объекту около 100 мкм [10]. Щель сориентирована по центру электрода вдоль его оси.

СВИНЦОВОЕ ПОКРЫТИЕ ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА

Скорость расширения вещества на внешней границе исследуемого объекта определялась по изменению границы тени, обусловленной поглощением лазерного излучения. На рис. 2 представлены 3 кадра теневых изображений исследуемого электрода в виде описанной выше трубки из нержавеющей стали, нижняя половина которого покрыта фольгой из свинца толщиной 180 мкм. Теневые фотографии были получены в моменты времени 78, 141, 199 нс после максимума тока. На теневые изображения приэлектродного пространства наложены теневые фотографии того же электрода, полученные до пуска установки.

Из рис. 2 видно, что размеры плазменных струй, развивающихся из свинцового покрытия трубки, меньше, чем из нержавеющей стали. Зная задержку между кадрами и размеры объектов, можно оценить скорость разлета плазмы из трубки, которая составляет 1–6 км/с для свинца и 2–10 км/с для нержавеющей стали. Можно заключить, что в среднем скорость разлета плазмы из свинца в 1.5–2 раза меньше скорости разлета плазмы из нержавеющей стали. При этом неустойчивое расширение плазмы имеет место как для стали, так и для свинца.

Относительная атомная масса свинца $A_{Pb} = 207$, а железа $A_{Fe} = 56$. Температура кипения свинца 1750°C, а железа 2800°C.

Скорость звука в плазме пропорциональна $\sqrt{(1+z)kT/A}$, где z – степень ионизации. Скорость разлета плазмы соответствует этой скорости. Поэтому легкий атом железа с относительной атомной массой 56 при температуре 2800°C будет двигаться быстрее, чем тяжелый атом свинца с относительной атомной массой 207 при температуре 1750°C.

Этим можно объяснить, что скорость разлета плазмы из свинца в 1.5–2 раза меньше скорости разлета плазмы из нержавеющей стали.

Для анализа состояния свинцового покрытия на стальном проводнике были проведены численные расчеты диффузии магнитного поля и нагрева вещества в рамках модели, не учитывающей движение вещества и изменение плотности. Учи-

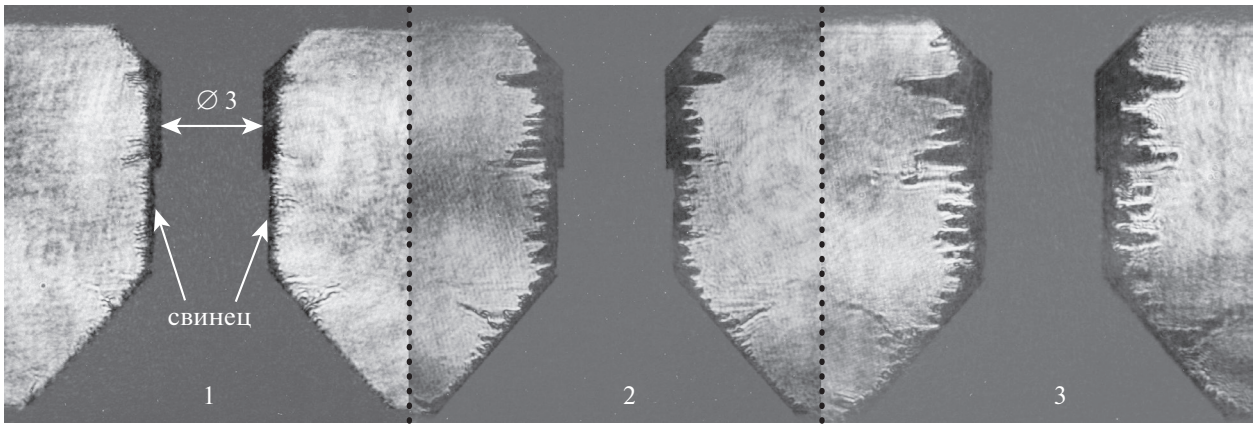

Рис. 2. Три кадра (1, 2, 3) с исследуемым электродом, нижняя часть которого покрыта свинцом, полученные соответственно в моменты времени 78, 141, 199 нс после максимума тока.

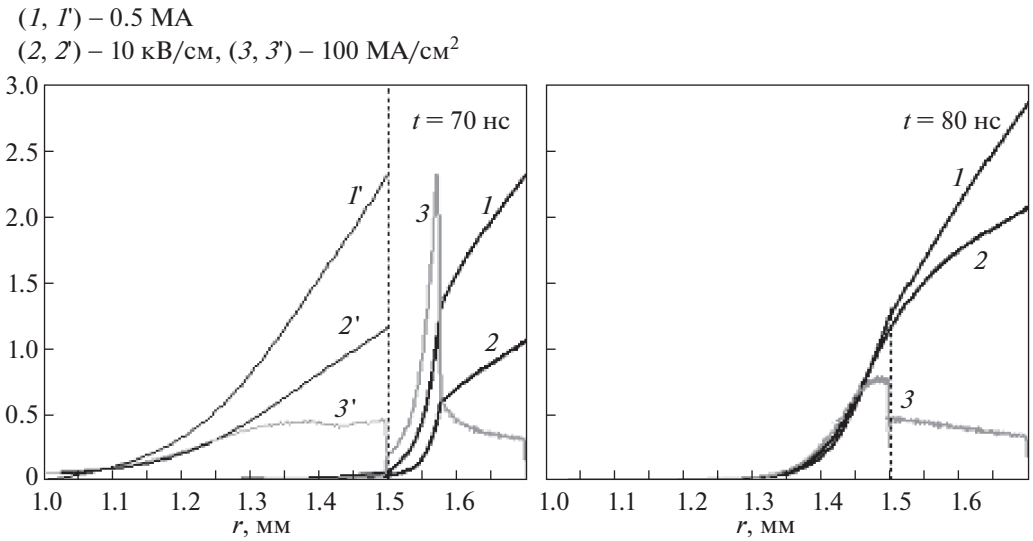

Рис. 3. Ток (*1*, *1'*), напряженность электрического поля (*2*, *2'*) и плотность тока (*3*, *3'*) для стального проводника (*1'*, *2'*, *3'*) и стального проводника, покрытого свинцом (*1*, *2*, *3*).

тывался рост сопротивления вместе с температурой [3]. Результаты представлены на рис. 3. До 70-й нс весь ток протекает по свинцовому покрытию. В течение следующих 10 нс приблизительно половина полного тока проникает в стальной проводник на глубину 200 мкм. Дальнейший счет в рамках данной модели ограничен достижением температуры испарения свинца.

КЕРАМИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА

На рис. 4 представлены 3 кадра, полученные при теневом кадровом фотографировании исследуемого электрода с покрытием нижней части керамикой толщиной 700 мкм. Керамическое покрытие было изготовлено из муллитокремнеземистой трубки, надетой на электрод, с содержанием оксида алюминия Al_2O_3 более 50% и оксида железа Fe_2O_3 менее 0.7% и SiO_2 менее 50%. Лазерные теневые изображения были получены в моменты времени за 5.5 нс до максимума тока и через 57.8 и 116.4 нс после него. На этих трех фотографиях не видно образования плазмы на поверхности керамики. Плазма на поверхности керамики появляется позже. Свечение части трубки, покрытой керамикой, представлено далее.

На рис. 5 представлена развертка по времени оптического свечения центральной части исследуемого электрода, полученная через щель, расположенную вдоль оси керамики. На рис. 6 – приведены зависимости от времени интенсивно-

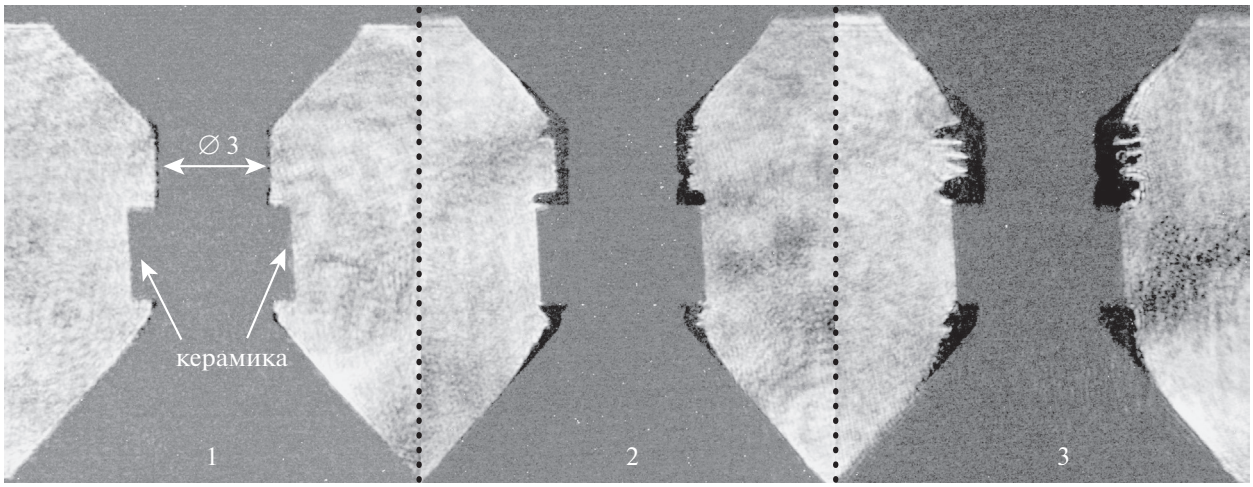

Рис. 4. Три кадра (1, 2, 3) с исследуемым электродом, нижняя часть которого покрыта керамикой, полученные соответственно в моменты времени 5.5 нс до и через 57.8 и 116.38 нс после максимума тока.

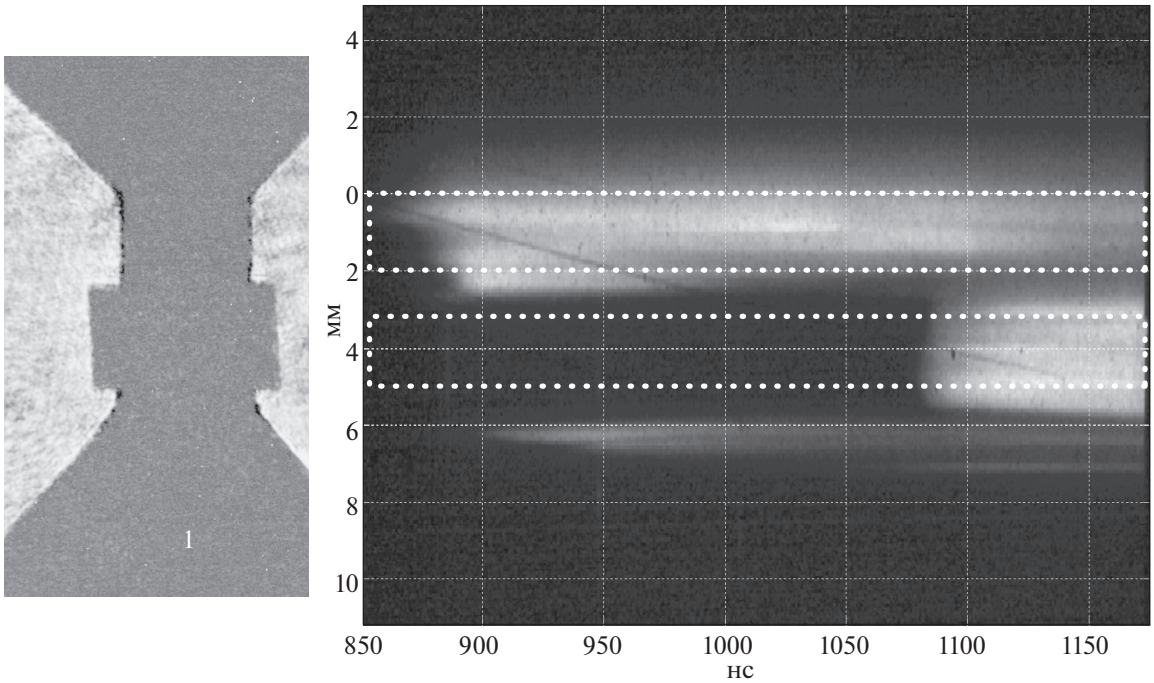

Рис. 5. Оптическая развертка по времени собственного свечения электрода (справа) и теневая фотография исследуемого электрода в масштабе (слева). По вертикали – мм. По горизонтали для теневой фотографии – мм, для развертки – нс. Прямоугольниками выделены области усреднения по яркости точек для двух участков исследуемого электрода.

стей свечения областей электрода без покрытия и с покрытием керамикой, синхронизованные с током.

Из рис. 5 видно, что свечение начинается в месте свободном от керамики и расположенном в точке перехода из конической геометрии электрода в цилиндрическую на ординате 0 мм и абсциссе 870 нс, а в течение 20 нс свечение распространяется на всю часть электрода, которая не покрыта керамикой. Керамическое покрытие начинает светиться через 200 нс после начала свечения непокрытой части электрода.

Были построены зависимости интенсивности свечения от времени. Проводилось усреднение по яркости точек в двух прямоугольниках, изображенных на рис. 5. На рис. 6 представлены дан-

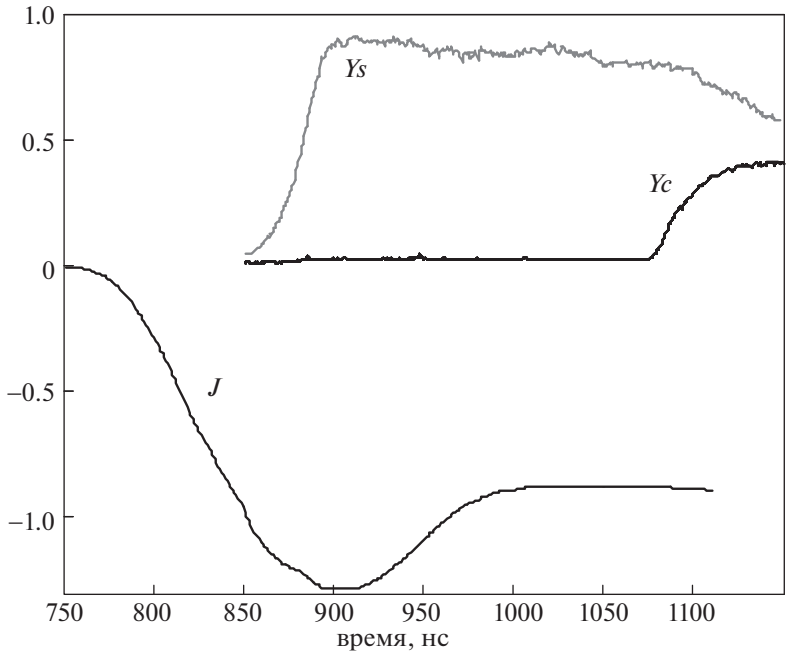

Рис. 6. Профили интенсивности свечения области электрода без покрытия (*Ys*) (отн. ед.) и с покрытием керамикой (*Yc*) (отн. ед.) от времени, полученные из оптической развертки по времени собственного свечения электрода, представленной на рис. 5. Временной профиль линейной плотности тока (*J*) (отн. ед.). Временная шкала та же, что и на рис. 5.

ные зависимости с наложением временного профиля линейной плотности тока, протекающего по электроду.

Из рис. 6 видно, что свечение поверхности электрода, не прикрытой керамикой, начинается на 100-й нс от начала тока. Рост интенсивности свечения происходит в течение 40 нс до момента достижения максимума тока. Для части поверхности трубки, покрытой керамикой, свечение появляется на 380-й нс, а значительное увеличение интенсивности свечения не прикрытой керамикой поверхности электрода происходит в течение 40 нс с момента его возникновения. Для участка трубки, покрытой керамикой, появление свечения и нарастание его интенсивности происходит значительно позже максимума тока. Амплитуда линейной плотности тока в данном эксперименте составила 2.6 МА/см.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже обсуждалось выше, в настоящем эксперименте вблизи исследуемых электродов отсутствовал источник интенсивного рентгеновского излучения. Рассмотрим возможные механизмы образования плазмы на поверхности токонесущих электродов (в том числе и на поверхности центрального электрода).

При высоких плотностях тока (~3 МА/см) поверхностный слой будет разогреваться и испаряться с образованием плазмы. В работе [10] приведены линейная плотность тока и напряженность электрического поля на внешней поверхности трубочки из нержавеющей стали с такими же размерами, что и в настоящем эксперименте, при протекании по ней тока установки Ангара-5-1. На основе этих данных была вычислена плотность выделяемой за счет нагрева мощности на поверхности электрода (см. рис. 7). На рис. 7 представлена плотность мощности на поверхности электрода, выделяемая за счет нагрева. Как видно, через 100 нс выделяемая поверхностная плотность мощности достигает 25 ГВт/см^2.

Вторым возможным механизмом возникновения плазмы на поверхности является облучение центрального электрода потоком электронов из вакуумной транспортирующей линии с магнитной самоизоляцией (ВТЛ). При транспортировке электромагнитной энергии по ВТЛ часть тока переносится электронами в вакуумном зазоре. В рамках Бриллюэновской модели [11, 12] эти электроны образуют электронный слой, текущий в зазоре между коаксиальным цилиндрическим катодом с радиусом r_1 и анодом с радиусом r_2. Поток этих электронов может вызывать нагрев электродов.

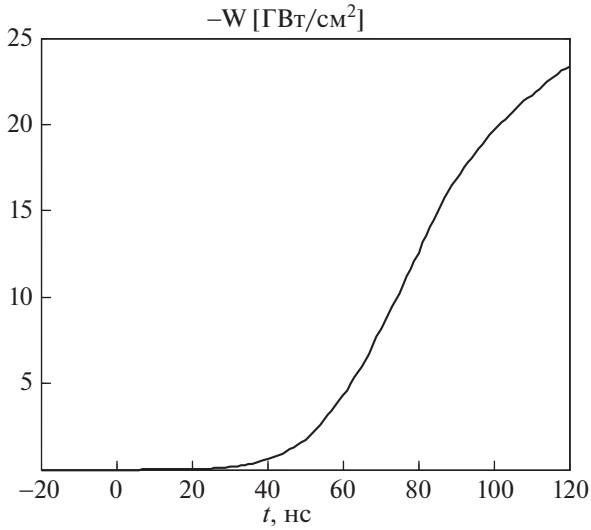

Рис. 7. Плотность потока мощности на поверхности электрода, выделяемой за счет нагрева.

Для установки Ангара-5-1 радиусы внутреннего электрода (катода) и внешнего элетрода (анода) коаксиального участка ВТЛ вблизи нагрузки составляют $r_1 = 4.7$ см и $r_2 = 5.27$ см (соответственно внешний радиус катода и внутренний радиус анода). На рис. 8 представлена возможная область локализации электронного слоя в зависимости от значения нижней границы слоя (граница слоя вакуумных электронов, обращенная к катоду ВТЛ – внутреннему электроду). Если нижняя граница слоя лежит ниже значения 5.14 см, то для электронного слоя существует только одно равновесное состояние. Если нижняя граница слоя лежит выше значения 5.14 см, то для электронного слоя существует уже два возможных равновесных состояния. Наибольшее значение верхней границы (граница слоя вакуумных электронов, обращенная к аноду ВТЛ – внешнему электроду) – поверхность анодного электрода ВТЛ. Возможная реализация конфигурации электронного слоя зависит от подробностей установления режима магнитной самоизоляции. В зависимости от конкретной реализации конфигурации электронного слоя, поток энергии, переносимый этими электронами, может колебаться в широких пределах.

Для установки Ангара-5-1, состоящей из восьми модулей, была оценена величина тока электронов в слое и мощность, переносимая электронным слоем, на выходе ВТЛ. При напряжении в линии 0.8 МВ и полном токе 3.2 МА (на 8 модулей), в зависимости от локализации электронного слоя, поток мощности движения электронного слоя на выходе ВТЛ на цилиндрическую нагрузку от 8 модулей установки АНГАРА-5-1 может варьироваться от 0.3 ГВт до 0.7 ТВт.

Рассмотрим реальную локализацию электронного слоя. В зависимости от этого, поток мощности движения электронного слоя на выходе ВТЛ, как видно выше, может отличаться в 2000 раз. В работах [11–14] отмечается, что электронный слой прижат к катодному электроду ВТЛ. Этому соответствует поток мощности движения электронного слоя на выходе ВТЛ 0.3 ГВт. В качестве оценки сверху предположим, что все электроны из электронного слоя попадут на исследуемую трубочку, площадь которой составляет около 1 см², таким образом можно считать, что поверхностная плотность мощности, выделяемая на ис-

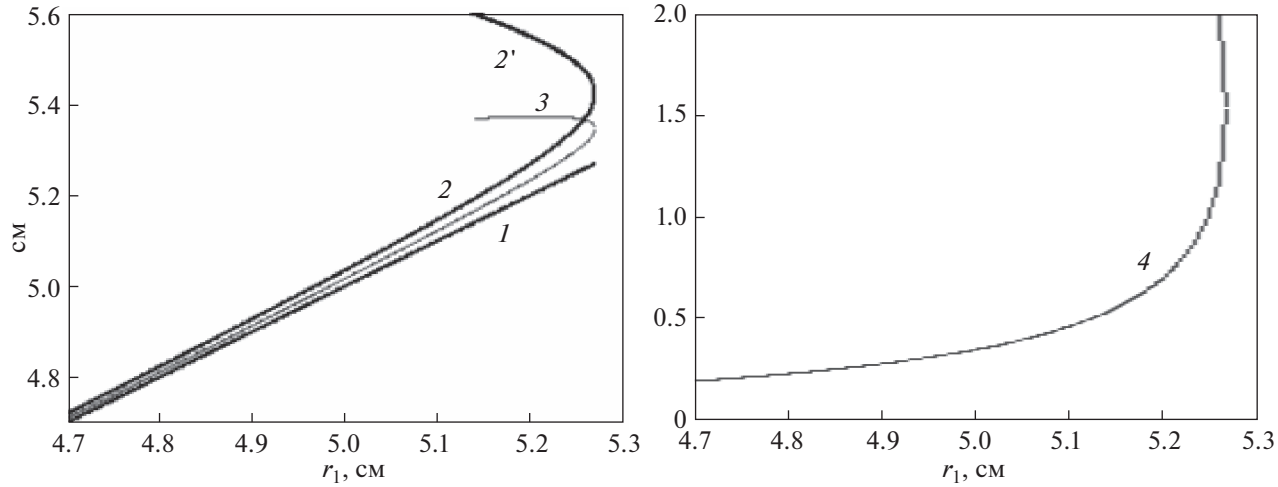

Рис. 8. Локализации электронного слоя. Слева – границы потока вакуумных электронов: нижняя граница слоя r_1 (*1*), верхняя граница слоя r_2 (*2*, *2'*) и его середина $(r_1 + r_2)/2$ (*3*), в зависимости от координаты r_1. Справа: толщина электронного слоя $(r_2 - r_1)$ (*4*) в зависимости от координаты r_1.

следуемой трубочке электронами из электронного слоя, составляет 0.3 ГВт/см^2, что является явно завышенной оценкой.

Сопоставление этой величины (0.3 ГВт/см^2) с оцененной выше плотностью мощности на поверхности электрода, выделяемой за счет омического нагрева током установки (25 ГВт/см^2), показывает, что нагрев трубочки осуществляется в основном током установки.

ВЫВОДЫ

Измерения скорости расширения приэлектродной плазмы при помощи теневого трехкадрового фотографирования показали, что покрытие электрода свинцом позволяет уменьшить скорость разлета плазмы в 1.5 раза. При этом неустойчивое расширение плазмы имеет место, как для стали, так и для свинца.

При помощи теневого фотографирования и регистрации оптического излучения в режиме щелевой развертки показано, что покрытие электрода керамикой задерживает разлет плазмы вблизи электрода в течение первых 250 нс после начала тока в отсутствие источника мощного рентгеновского излучения. Плазма возникает на поверхности металла, но керамическое покрытие замедляет ее разлет от поверхности электрода при отсутствии нагрузки.

Оценки механизма нагрева электрода показывают, что нагрев электрода, с дальнейшим образованием плазмы осуществляется током установки.

Работа выполнена при частичной поддержке госкорпорации “Росатом” по государственному контракту № 4х241.9Б.18.1048 и гранту РФФИ № 18-02-00170.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Орешкин В.И., Чайковский С.А., Дацко И.М., Лабецкая Н.А., Орешкин Е.В., Рыбка Д.В., Ванькевич В.А.* // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2018. Т. 82. № 4. С. 457.
2. *Slutz S.A., Olson C.L., Peterson P.* // Physics of Plasmas. 2003. V. 10. № 2.
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. № 9. С. 782.
4. *Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Черненко А.С., Данько С.А., Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С., Королев В.Д., Мижирицкий В.И., Смирнов В.П., Шашков А.Ю., Сасоров П.В., Ткаченко С.И.* // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 4. С. 291.
5. *Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Данько С.А., Жужунашвили А.И., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Кингсеп А.С., Королев В.Д., Мижирицкий В.К., Смирнов В.П., Устроев Г.И., Черненко А.С., Шашков А.Ю., Ткаченко С.И.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2008. № 4. С. 3
6. *Ананьев С.С., Бакшаев Ю.Л., Бартов А.В., Блинов П.И., Данько С.А., Жужунашвили А.И., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Кингсер А.С., Королев В.Д., Мижирицкий В.И., Смирнов В.П., Черненко А.С., Ткаченко С.И.* // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 7. С. 627.
7. *Chaikovsky S.A., Oreshkin V.I., Datsko I.M., Labetskaya N.A., Ratakhin N.A.* // Physics of Plasmas. 2014. V. 21. 042706.
8. *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.
9. *Бугров А.Э., Бурдонский И.Н., Гаврилов В.В., Гольцов А.Ю., Грабовский Е.В., Ефремов В.П., Жужукало Е.В., Зурин М.В., Ковальский Н.Г., Кондрашов В.Н., Олейник Г.М., Потапенко А.И., Самохин А.А., Смирнов В.П., Фортов В.Е., Фролов И.* // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 6. С. 493
10. *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.
11. *Гордеев А.В.* Препринт – Ордена Ленина Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова. М., 1978.
12. *Рудаков Л.И., Бабыкин М.В., Гордеев А.В., Демидов Б.А., Королев В.Д., Тарумов Э.З.* Генерация и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков / Под ред. Л.И. Рудакова. М.: ЭнергоАтомИздат, 1990.
13. *Баранчиков Е.И., Гордеев А.В., Королев В.Д., Смирнов В.П.* // ЖЭТФ. Т. 75. № 6. С. 2102.
14. *Smith I.D., Champney P.D.A., Creedon J.M.* // Int’l Conf. On Pulse Technology. Texas, Lubbok, November, 1976.