

# Экспериментальное исследование процесса инициации вакуумного дугового разряда постоянного тока в парах гадолиния с электронно-лучевым подогревом катода

Р. А. Усманов, В. П. Полищук, И. С. Самойлов, М. А. Валинуров и  
Р. Х. Амиров

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва  
125412, Россия

E-mail: usmanov.r@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2023 г.

**Аннотация.** В работе экспериментально исследуется процесс возникновения вакуумной дуги на горячем катоде из гадолиния. Исследуется влияние начальной температуры катода и длины разрядного промежутка на напряжение, при котором возникает дуга. В ходе измерений получены временные зависимости напряжения на промежутке, а также развитие свечения плазмы гадолиния. Обнаружено появление вспышки излучения, предшествующей пробоем дуги. Показано, что увеличение начальной температуры катода понижает величину напряжения, необходимую для пробоя, а изменение расстояния между катодом и анодом в диапазоне 25–50 мм влияния на нее не оказывает. Результаты работы могут быть использованы для разработки источников плазмы металлов, в том числе для задач плазменной сепарации. <https://doi.org/10.33849/2023203>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей в технологиях, использующих низкотемпературную плазму, является создание бескапельных генераторов плазмы с контролируемым зарядовым составом. Такие источники востребованы при создании наноматериалов, функциональных покрытий, легировании полупроводников, а также в технологиях масс-сепарации изотопов, в том числе, технологии разделения компонентов отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

В целях развития методов плазменной сепарации веществ сегодня активно исследуется возможность создания плазмы монозарядового ионного состава материала катода в вакуумном дуговом разряде с электронно-лучевым подогревом катода [1]. При достаточно высокой температуре катода данный разряд может генерировать интенсивный бескапельный плазменный поток катодного материала, в том числе диэлектрика. Условия генерации пара и плазмы в вакуумной дуге зависят от типа катодных материалов, отличающихся способностью эмитировать электроны. Поэтому важно экспериментально исследовать механизмы иницирования и функционирования вакуумной дуги с горячим катодом, что в перспективе позволило бы оптимизировать работу источников плазмы для конкретных применений. Отличительная особенность вакуумной дуги с подогреваемым катодом — отсутствие пятен контракции тока на катоде и пульсаций напряжения горения [1]. Эти обстоятельства способствуют формированию бескапельного потока плазмы материала катода, что является преимуществом перед разрядом на холодном катоде с микропятнами, где приходится принимать специальные меры для удаления капель катодного материала из плазменного потока [2].

Материалы катодов вакуумной дуги делятся на два вида по способности к термоэлектронной эмиссии и значению давления насыщенных паров [3]. Вещества, для которых отношение потока испаряющихся атомов к потоку электронов термоэмиссии меньше единицы, относят к термоэмиссионным, а вещества, для которых это отношение больше единицы, относят к нетермоэмиссионным.

Эти два типа катодных материалов значительно отличаются механизмами переноса заряда на их поверхности, интенсивностью генерации заряженных частиц в плазме, а также процессами инициации дуги.

При создании источников плазмы для достижения требуемых характеристик ионных потоков конкретного катодного материала важны физические параметры, при которых осуществляется зажигание и функционирование разряда, а также технические характеристики источника питания и разрядного устройства — размеры и форма электродов, геометрические характеристики межэлектродного промежутка.

В данной работе проведено исследование процесса инициации дугового разряда в парах гадолиния. Оно ориентировано на применение результатов в разработке технологии плазменной сепарации ОЯТ, поскольку гадолиний, как и уран, являющийся одним из основных компонентов ОЯТ, относится к термоэмиссионным веществам.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

На рисунке 1 представлена схема эксперимента.

Эксперименты проводились в вакуумной камере при давлении остаточных газов менее 10 мПа. Межэлектродный промежуток был ориентирован вертикально с катодом внизу.

В качестве материала катода использовался гадолиний, который закладывался в молибденовый цилиндрический тигель с внешним и внутренним диаметром 25 и 19 мм соответственно, диаметр выходного отверстия тигля равнялся 14 мм. Под тиглем находился электронно-лучевой подогреватель (ЭЛП) для внешнего подогрева. Мощность ЭЛП достигала 1.5 кВт. Во время эксперимента температура катода на  $\sim 200$  °С превышала температуру плавления гадолиния, площадь поверхности его расплава составляла  $\sim 5$  см<sup>2</sup>.

Использовались аноды двух типов. В первой серии экспериментов использовался радиационно-охлаждаемый анод из молибденовой фольги толщиной 0.5 мм, имевший центральное отверстие диаметром

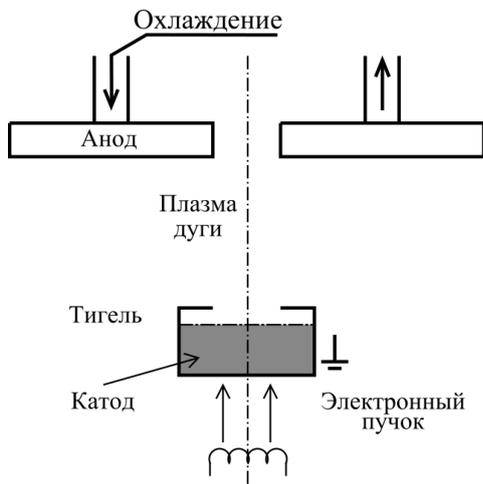


Рисунок 1. Схема вакуумного дугового разряда.

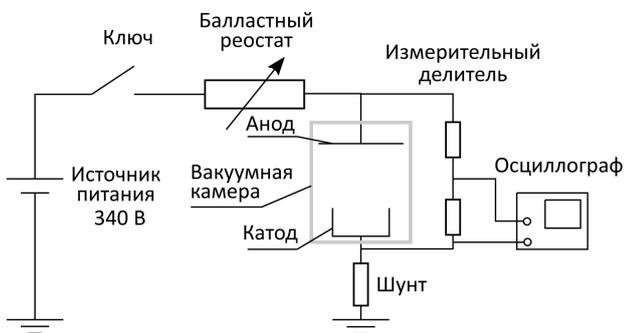


Рисунок 2. Электрическая схема питания разряда.

5 мм. В эксперименте такой анод разогревался до нескольких сотен градусов Цельсия, в зависимости от мощности разряда. Во второй серии экспериментов использовался анод из нержавеющей стали с водяным охлаждением, выполненный в виде круглого диска с центральным отверстием диаметром 15 мм. Его температура во время экспериментов не превышала 100 °С. Межэлектродное расстояние варьировалось перемещением анода вдоль оси разряда. На рисунке 2 представлена электрическая схема питания дугового разряда.

Для питания дуги постоянным током использовался трехфазный выпрямитель с емкостным фильтром. Ток дуги регулировался ступенчатым водоохлаждаемым реостатом. Напряжение на промежутке подавалось после нагрева катода с помощью ЭЛП до температуры, при которой давление насыщенных паров катода превышало ~ 1 Па. В момент зажигания разряда регистрировалась динамика напряжения на электродах при помощи осциллографа АКИП-72208В MSO (полоса пропускания 100 МГц), подключенного к разрядному промежутку через резистивный делитель напряжения. Видеокамерой Panasonic HC-V760 с использованием нейтральных светофильтров проводилась съемка разряда. Температура боковой поверхности катодного тигля  $T_c$  регистрировалась яркостным пирометром IS-140 на длине волны 0.9 мкм, с пространственным и временным разрешениями 0.9 мм и 10 мс соответственно. Отличие измеряемой температуры от средней температуры поверхности катода по оценкам не превышало 3%. Изменя-

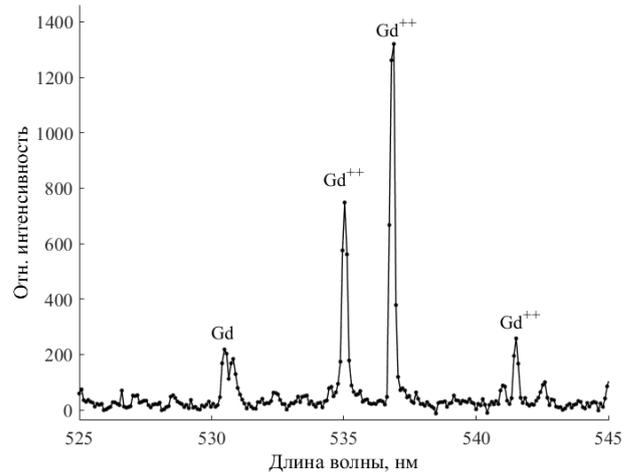


Рисунок 3. Спектр излучения плазмы гадолиния в диапазоне длин волн 525–545 нм.

лись ток и напряжение дуги, а также мощность ЭЛП. Излучение плазмы дугового разряда регистрировалось с помощью фотоумножителя ФЭУ-85. Перед фотокаодом ФЭУ, на который фокусировалось изображение плазмы дугового разряда при помощи кварцевой линзы, располагался интерференционный фильтр 535 нм с шириной области пропускания 10 нм. Спектр излучения гадолиния в исследуемом диапазоне длин волн представлен на рисунке 3. В область пропускания фильтра попадало несколько спектральных линий излучения иона  $Gd^{++}$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первой серии экспериментов исследовалось поведение дуги в зависимости от температуры катода, регулируемой ЭЛП. Расстояние между катодом и радиационно-охлаждаемым анодом составляло 27 мм.

Осуществлялась следующая последовательность действий. Напряжение подавалось на промежуток при начальной температуре катода около 1.8 кК. Затем с помощью ЭЛП постепенно увеличивали температуру катода, что приводило к повышению давления насыщенных паров гадолиния. В результате сначала зажигался слаботочный разряд, ток которого по мере разогрева катода увеличивался до ограниченного балластным резистором максимального значения 51 А, достигаемого при температуре катода около 2.08 кК. В процессе нагрева напряжение на разрядном промежутке монотонно спадало от 340 до ~ 10 В. Таким образом наблюдался переход разряда из слаботочной высоковольтной фазы (тлеющий разряд) в сильноточную низковольтную (дуговой разряд). При этом значительно изменялся внешний вид разряда. Кадры видеосъемки разряда в зависимости от температуры представлены на рисунке 4.

Внешний вид разряда сильно зависит от температуры катода. При низкой температуре и низком токе наблюдается слабое свечение вблизи катода. С увеличением температуры увеличивается ток, свечение плазмы у катода становится более интенсивным и возникает свечение у анода. С ростом температуры катода и тока разряда примерно до 50 А свечение у анода становится

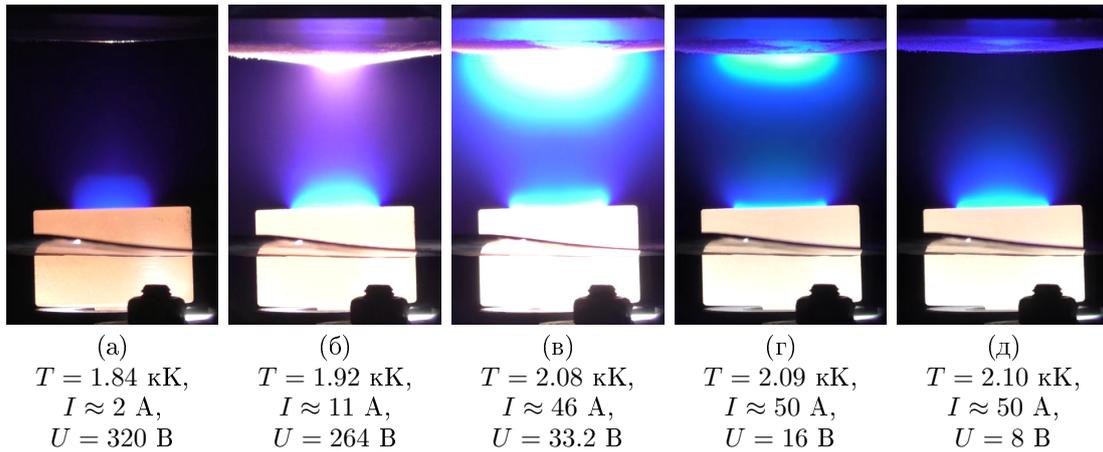


Рисунок 4. Внешний вид разряда при разной температуре катода.

ярче. При дальнейшем повышении температуры и сопровождающем его увеличении тока свечение у анода ослабевает и при температуре 2.1 кК перестает регистрироваться.

Яркое свечение у анода может быть объяснено следующим образом. При малой температуре катода плотность паров гадолиния недостаточна для обеспечения дугового режима и в промежутке реализуется слаботочный разряд. Анодное падение потенциала сравнимо по величине с напряжением разряда. С ростом температуры и тока напряжение на разряде снижается, но мощность, выделяемая у анода  $W = IU_a$ , где  $I$  — ток разряда,  $U_a$  — напряжение разряда, может достигать 2 кВт (рисунок 4(б)). Это приводит к существенному нагреву и испарению материала, осевшего на анод, вблизи которого усиливаются процессы ионизации. В результате наблюдается интенсивное свечение плазмы в прианодной области (рисунки 4(б)–(д)).

На рисунке 5 представлены графики зависимостей динамики температуры катода и напряжения разряда. В данном эксперименте разряд в промежутке зажигался при температуре 1.82 кК, с ростом температуры катода наиболее резкое падение напряжения наблюдалось в интервале температур 1.9–2.0 кК. Давление насыщенных паров гадолиния [4] в этом температурном интервале составляет 1–10 Па, а концентрация атомов —  $10^{13}$  —  $10^{14}$  см $^{-3}$ . По оценкам, при такой концентрации пара длина свободного пробега электрона составляет  $\sim 1$  см [5], что сравнимо с длиной разрядного промежутка. Таким образом, реализуются условия для ионизации пара катода.

Во второй серии экспериментов исследовались инициация и эволюция дуги при включении напряжения после нагрева катода до более высокой начальной температуры, достаточной для зажигания сильноточного дугового разряда. Использовался анод с водяным охлаждением и центральным отверстием диаметром 15 мм. Расстояние между катодом и анодом варьировалось.

Регистрировались осциллограммы напряжения дуги и интенсивности излучения плазмы в первые миллисекунды после включения напряжения. Типичные осциллограммы напряжения и излучения представлены на рисунке 6.

Переходный процесс при включении источника питания в условиях прогретого катода до температуры,

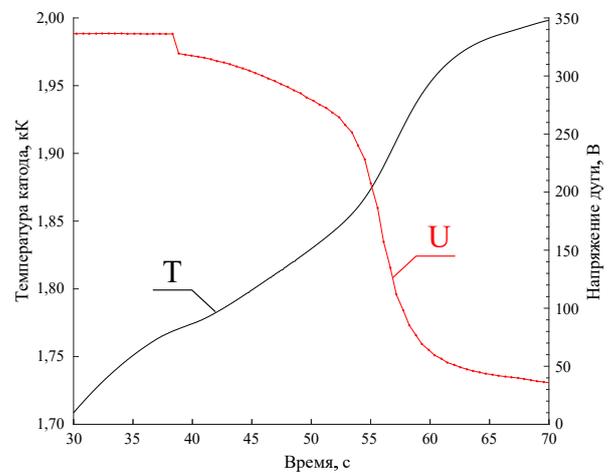


Рисунок 5. Поведение температуры катода (Т) и напряжения дуги (U).

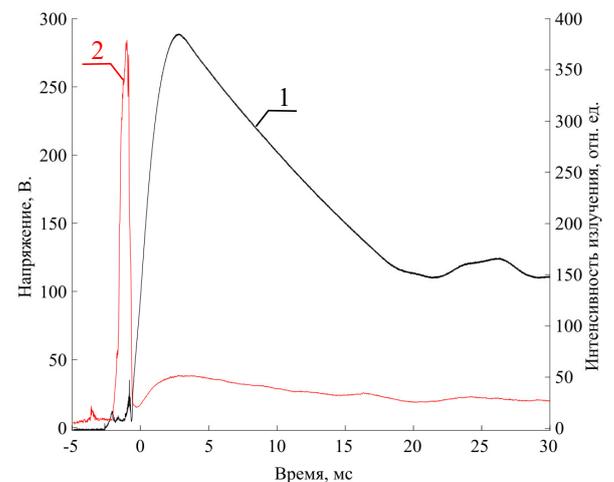


Рисунок 6. Напряжение и излучение разряда в переходном процессе при зажигании дугового разряда с горячим катодом. 1 — напряжение разряда, 2 — сигнал ФЭУ (вспышка).

**Таблица 1.** Параметры переходного процесса при зажигании дугового разряда с нагретым катодом.

Длина промежутка, мм	$T_{нач}$ , кК	$U_{проб}$ , В	$T_{кон}$ , кК	$U_{уст}$ , В
45	1.91	305	1.99	20.1
45	1.92	295	1.99	19.7
45	1.94	242	1.99	16
45	1.98	148	2.00	12.3
45	2.01	90	2.00	8.9
25	1.88	330	1.97	22.5
25	1.92	328	1.99	19.5
25	1.92	323	1.99	19.5
25	1.92	283	1.98	19.2
25	1.96	194	1.99	15.2
25	1.98	119	1.99	12.3
25	2.02	94	2.03	7.4
25	2.03	74	2.03	7

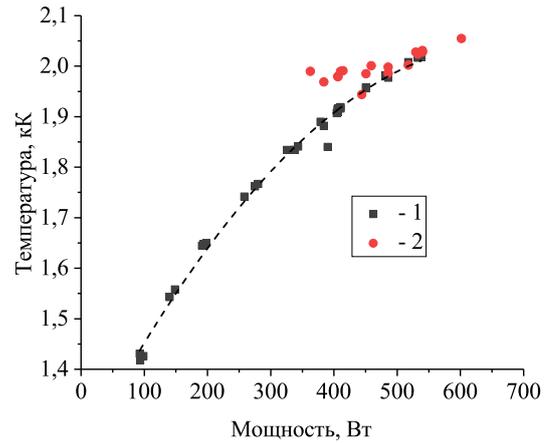
достаточной для зажигания дугового разряда, выглядел следующим образом. При подаче напряжения от источника питания оно в течение 4 мс возрастает до 280 В и затем в течение нескольких десятков миллисекунд спадает до установившегося значения (не более 20 В), соответствующего стационарному дуговому режиму. Величину скачкообразно достигнутого максимального напряжения обозначим как напряжение пробоя  $U_{проб}$ , приводящего к переходу дугового разряда в сильноточный режим. Последующее за скачком снижение напряжения горения в переходном процессе после зажигания дуги связано с увеличением температуры катода вследствие его нагрева дугой.

В переходном процессе наблюдается вспышка излучения плазмы длительностью не более 1.5 мс (рисунок 6). В нашем эксперименте зарегистрированная вспышка не привязана к определенной координате промежутка, излучение собирается в целом по всей его длине. Заметим, что вспышка возникает еще до скачка напряжения, то есть, в первые 1.5 мс. После вспышки свечение плазмы устанавливалось на практически неизменном уровне, на порядок менее интенсивном, чем в пике вспышки.

Зависимость начального скачка напряжения ( $U_{проб}$ ) от температуры катодного тигля при зажигании дугового разряда с горячим катодом исследовалась при двух длинах разрядного промежутка — 25 мм и 45 мм.

Эксперименты проводились по следующей схеме. Тигель нагревался до выбранной температуры (около 1.8 кК), а затем на промежуток накладывалось напряжение. Возникал разряд, и регистрировалась амплитуда скачка напряжения. Далее катод разогревался разрядом, что приводило к уменьшению напряжения разряда. В результате ток разряда, ограниченный балластным резистором, устанавливался на уровне 48–51 А. Регистрировались начальная ( $T_{нач}$ ) и конечная ( $T_{кон}$ ) температура катода, амплитуда скачка напряжения ( $U_{проб}$ ) и величина установившегося напряжения горения дуги ( $U_{уст}$ ). Результаты представлены в таблице 1.

Данные таблицы показывают, что диапазон изменения температуры катода после выхода дуги на уста-



**Рисунок 7.** Зависимость температуры тигля от мощности ЭЛП без дуги (1) и с дугой (2).

новившейся режим (1.97–2.03 кК) примерно вдвое меньше, чем диапазон изменения его начальной температуры (1.88–2.03 кК).

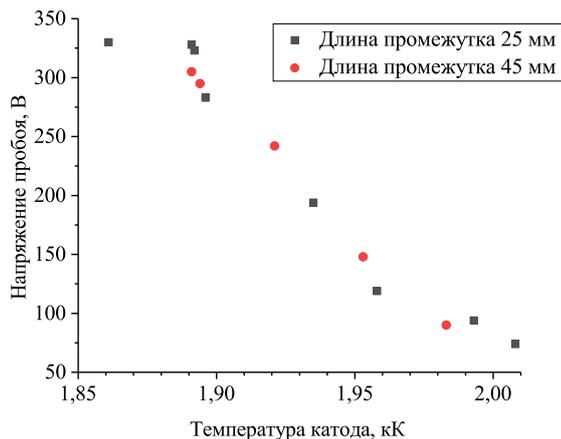
На рисунке 7 приведена зависимость температуры тигля от мощности ЭЛП без дуги  $T_c(N)$ . На этом рисунке для данных таблицы также приведены значения установившейся температуры  $T_{кон}(N, I)$ . Пунктиром показана усредненная калибровочная зависимость  $T_c(N)$ . Данные на рисунке, в соответствии с методикой, описанной в работе [3], позволяют определить тепловой поток  $Q_c$ , поступающий из плазмы на катод. Вместо величины  $Q_c$ , используют величину вольтова эквивалента (ВЭ)  $V_c = Q_c/I$ . Для режимов, лежащих слева от калибровочной кривой на рисунке 7, дуга нагревает катод, для режимов справа — наоборот, дуга охлаждает катод ( $V_c < 0$ ). Это означает, что потери тепла с катода на эмиссию электронов превышают поток тепла из плазмы на катод [3]. Максимальная величина ВЭ составляла около 4 В при напряжении на дуге 19.5 А.

Зарегистрировано, что напряжение пробоя дуги ( $U_{проб}$ ) монотонно снижается с ростом начальной температуры катода (рисунок 8).

Оценим, на сколько меняется концентрация насыщенных паров гадолиния и плотность тока термоэмиссии в пределах измеренных напряжений пробоя дуги  $U_{проб}$ . Плотность тока термоэмиссии, рассчитаем по формуле Ричардсона–Дэшмана [5], работа выхода электронов гадолиния равняется 3 эВ [4]. В области значений начальной температуры катода из таблицы (1.88–2.03 кК), концентрация насыщенного пара гадолиния изменяется в диапазоне от  $0,7 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  до  $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , а плотность тока термоэмиссии — от 2 до 8 А/см<sup>2</sup>.

При площади поверхности катода  $\sim 5 \text{ см}^2$  электронный термоэмиссионный ток после подачи напряжения и догрева катода дугой до температур более 2.0 кК позволял достичь полного тока разряда, обеспеченного, в основном, термоэлектронной эмиссией. По данным [3], на катоде из гадолиния доля тока термоэмиссии составляет около 90% от тока дуги.

До появления плазмы в разрядном промежутке плотность тока электронной эмиссии с катода ограниче-



**Рисунок 8.** Зависимость напряжения пробоя дуги ( $U_{\text{проб}}$ ) от температуры катода. 1 — длина промежутка 25 мм, 2 — длина промежутка 45 мм.

на слое отрицательного объемного заряда у его поверхности. Для оценки фактической плотности тока электронов с катода можно воспользоваться законом “трех вторых” [5]. При расстоянии между электродами 45 мм и напряжении на промежутке 300 В из закона “трех вторых” следует, что плотность тока эмиссии с катода составляет  $\sim 0.6 \text{ мА/см}^2$ , то есть на четыре порядка меньше характерного значения плотности тока термоэмиссии. При расстоянии между электродами 25 мм и том же напряжении на промежутке, плотность тока эмиссии составляет  $\sim 2 \text{ мА/см}^2$ . В эксперименте не обнаружено зависимости скачка напряжения пробоя  $U_{\text{проб}}$  от размера межэлектродного промежутка при его изменении в пределах 25–45 мм, при том что ток эмиссии с катода увеличивается в  $\sim 4$  раза при уменьшении зазора. Этот факт свидетельствует о том, что в рассматриваемых условиях электронная эмиссия с катода в развитии пробоя не является определяющим фактором.

Для компенсации отрицательного слоя объемного заряда вблизи катода минимальная доля ионного тока на катоде  $S_i$  должна быть порядка  $(m_e/m_i)^{1/2}$ , где  $m_e$  и  $m_i$  — масса электронов и ионов [5]. Для плазмы гадолиния эта минимальная доля ионного тока составляет  $\sim 0.2\%$ . Заметим, что по оценкам [3] в самостоятельном дуговом разряде на гадолиниевом катоде доля ионного тока примерно в 30 раз больше.

Возможно, триггером в развитии пробоя после подачи напряжения является термическая ионизация паров гадолиния. По оценкам из уравнения Саха [5] в диапазоне значений температуры катода 1.88–2.03 кК концентрация заряженных частиц в паре вблизи него изменяется в пределах от  $9 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$  до  $8 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$  (потенциал ионизации атома гадолиния — 6.15 эВ [4]).

После подачи напряжения на электроды происходит лавинное нарастание концентрации заряженных частиц в промежутке вследствие ионизации пара. Чтобы подтвердить этот механизм развития пробоя, необходимо выполнить оценки времени, необходимого для ионизации пара.

#### 4. ВЫВОДЫ

Исследованы параметры пробоя разрядного промежутка вакуумной дуги с горячим термоэмиссионным катодом из гадолиния.

Проведены измерения устанавливающегося напряжения разряда в зависимости от температуры катода в ходе перехода от слаботочного ( $I \sim 1 \text{ А}$ ) горения к сильноточному ( $I > 10 \text{ А}$ ).

Показано, что при недостаточной температуре катода у поверхности не охлаждаемого анода возникает яркое свечение, вероятно, связанное с активизацией процессов ионизации испаряющегося с его поверхности вещества.

Исследована зависимость напряжения пробоя разрядного промежутка от температуры катода и расстояния между катодом и анодом.

Обнаружено, что непосредственно перед всплеском напряжения на разрядном промежутке появляется интенсивное свечение плазмы, время существования которой составляет порядка 1.5 мс.

Показано, что напряжение пробоя уменьшается с ростом температуры катода и не зависит от длины промежутка в пределах 25–45 мм.

Продемонстрировано, что после инициации разряда при начальной температуре катода ниже 1700 °С происходит его догрев под действием дугового разряда до такой температуры, при которой поток электронов термоэмиссии оказывается сравним с полным током дуги.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-01129-23-00 от 29.12.2022 г.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полищук В П и др. 2020 *Теплофизика высоких температур* **58** 515–535
2. Габович М Д 1972 *Физика и техника плазменных источников ионов* (Атомиздат)
3. Паранин С Н, Полищук В П, Сычев П Е, Шабашов В И и Ярцев И М 1986 *Теплофизика высоких температур* **24** 422–429
4. Бабичев А П, Бабушкина Н А и Братковский А М 1991 *Физические величины: Справочник под ред. Григорьева*
5. Райзер Ю П 1987 *Физика газового разряда* (Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.)