

# Влияние внешнего подогрева катода на характеристики стационарных вакуумных дуг с диффузной катодной привязкой

И. М. Ярцев, В. П. Полищук и Р. А. Усманов

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

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

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2023 г.

**Аннотация.** Рассмотрены разряды на металлических (гадолиний, свинец, хром), полупроводниковых (оксид церия) и смесевых (оксид церия и хром) катодах, с принципиально разными механизмами переноса заряда на их поверхности. Обсуждаются значения безразмерных параметров, определяющих скорость испарения катода и величину энергии, вложенную в поток плазмы. <https://doi.org/10.33849/2023201>

## 1. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно, что в вакууме при достаточно большой температуре катода  $T_c$  можно реализовать дуговой разряд в парах катода с распределенной или диффузной катодной привязкой (ДКП) [1–4]. Низкая плотность тока в ДКП ( $1\text{--}10^2$ ) А/см<sup>2</sup> и устойчивый характер прикатодных процессов позволяют генерировать плазменные потоки катодного материала, не содержащие микрокапельной фракции. Благодаря этому разряд с ДКП обладает значительным преимуществом для различных плазменных технологий перед дугой на холодных катодах с контрагированными катодными пятнами (ККП), которая характеризуется значительным содержанием микрокапельной фракции в продуктах эрозии [4, 5].

В зависимости от материала катода разряд с ДКП может реализоваться при давлении насыщенного пара  $P_s$  свыше  $1\text{--}10^2$  Па. В известных экспериментах с ДКП требуемое значение давления  $P_s$  достигалось при температуре катода  $T_c$  свыше  $1.2\text{--}2$  кК [4]. Для обеспечения такой температуры нередко используют внешний, обычно электроннолучевой, подогрев катода мощностью  $N$  от  $\sim 0.1$  до  $\sim 100$  кВт [2–4, 6–9].

Внешний подогрев катода существенно расширяет экспериментальные и технологические возможности, например, упрощает инициацию разряда и позволяет зажать его на веществах, которые практически не проводят ток при комнатных температурах, таких как, В [9] или CeO<sub>2</sub> [10]. Существенно также, что подогрев катода позволяет управлять характеристиками разряда.

В качестве основного механизма влияния подогрева на характеристики дуги можно выделить увеличение температуры катода, которое приводит к экспоненциальному росту давления насыщенного пара катодного материала и плотности потока термоэлектронов и атомов с катода. Однако, в известных работах [3, 6–9] конкретные значения температуры  $T_c$ , как правило, не приводятся, что существенно снижает информативность полученных данных. В работах [3, 6–9] влияние внешнего нагрева представлено, главным образом, как фактор, влияющий на напряжение на дуге  $V_a$ .

Общий анализ литературных данных о разряде с ДКП дан в обзоре [4]. Основной задачей данной работы являлось отдельное рассмотрение характеристик этого разряда на подогреваемых катодах из различных кристаллических материалов. Особое внимание при этом уделялось анализу данных о температуре катода  $T_c$  и о параметрах, характеризующих процессы генера-

ции плазмообразующей среды. Кроме того, проведено сопоставление характеристик распределенного разряда на катодах из разных материалов с соответствующими характеристиками традиционных вакуумных дуг с ККП на интегрально холодных катодах.

Представленные результаты получены, в основном, после дополнительной обработки данных, полученных нами ранее [2, 4, 10–13]. При описании разрядов на катодах из Gd, CeO<sub>2</sub> и смеси CeO<sub>2</sub> + Sr были привлечены и новые данные.

В соответствии с работой [14], в качестве параметров, характеризующих условия и интенсивность генерации плазмы в вакуумных дугах, можно использовать коэффициенты электропереноса  $\alpha$  и энергопереноса  $\delta$ . Коэффициент  $\alpha$  представляет собой отношение потока электронов в плазме  $I/e$  к потоку атомов, покидающих катод  $G_a/M_a$ :

$$\alpha = IM_a/(eG_a) \text{ [эл/ат]}, \quad (1)$$

где  $I$  — ток дуги,  $G_a$  — массовая скорость эрозии катода,  $M_a$  — масса атома материала катода,  $e$  — заряд электрона. Его можно вычислить, используя величину удельной эрозии катода  $\beta = G_a/I$ :

$$\alpha = 1,04 \times 10^{-5} M_0/\beta \text{ [эл/ат]}, \quad (2)$$

где  $M_0$  — масса атома катода в атомных единицах.

Для коэффициента  $\delta$  в расчете на один поступивший с катода атом можно записать

$$\delta = \alpha e V_a (1 - V_c/V_a) \text{ [эВ/ат]}, \quad (3)$$

где  $V_c$  — вольтов эквивалент (ВЭ) теплового потока  $Q_c$  из прикатодной плазмы на катод:  $V_c = Q_c/I$ .

Отметим, что при записи уравнения (3) пренебрегли потоком тепла в анод. Отметим также, что в отличие от [14] в (3) с помощью ВЭ учитывались тепловые потери из дуги на катод, уменьшающие значения  $\delta$  до 50% и более.

В соответствии с работой [14] основные характеристики плазменных потоков, генерируемых в дугах с ККП, коррелируют с величинами  $\alpha$  и  $\delta$ . В то же время конкретные данные о диапазоне этих величин для дуг с ДКП, особенно при наличии подогрева катода, практически отсутствуют. Далее, в основном, приводятся данные о разряде с ДКП и каждый раз уточняется, когда приводятся данные для других дуговых разрядов.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ИССЛЕДОВАННЫЕ КАТОДЫ И ОСНОВНЫЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Установка и основные методики измерений подробно описаны в работах [2, 4]. Разряд зажигался в вакуумной камере, в которой давление остаточных газов не превышало  $10^{-4}$  Па. Материал катода помещался в цилиндрический молибденовый тигель, под которым находился электроннолучевой подогреватель (ЭЛП) мощностью до 1.5 кВт. Для всех катодов, кроме свинца, использовались тигли одного размера: с внешним и внутренним диаметром 24 и 19 мм соответственно, высотой — 14 мм, и диаметром выходного отверстия 14 мм. В опытах со свинцовым катодом высота тигля была увеличена до 26 мм, а диаметр выходного отверстия уменьшен до 6 мм. Интенсивность подогрева катода, или отношение мощности ЭЛП к мощности дуги  $N_n = N/(IV_a)$  изменялось от 0 до 4.

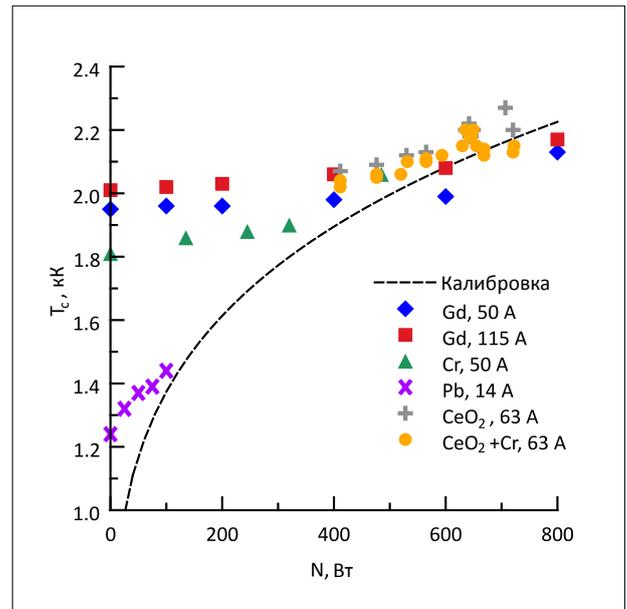
В качестве анодов использовались радиационно-охлаждаемые пластины из молибдена толщиной 0.5 мм, а также водоохлаждаемые диски из нержавеющей стали. Аноды имели центральное отверстие диаметром около 15 мм для выхода плазмы. Расстояние катод–анод составляло около 30 мм.

Источником энергии служил выпрямитель с выходным напряжением 360 В и током до 250 А. Значение тока в дуге устанавливалось реостатом с водяным охлаждением. Дуга зажигалась подачей напряжения от выпрямителя на разрядный промежуток. Перед подачей напряжения катод нагревался от ЭЛП до температуры, обеспечивающей давление насыщенного пара свыше 1 Па.

Специфику прикатодных процессов в вакуумных дугах на различных катодах поясняют при помощи атом–электронного отношения  $S_{ae}$ , представляющего собой отношение плотности потоков термически испаренных атомов  $J_a$  и электронов термоэмиссии  $J_e$ , то есть  $S_{ae} = J_a/J_e$  [4]. Для исследованных катодов диапазон изменения величины  $S_{ae}$  составлял восемь порядков. Минимальное значение  $S_{ae} \sim 0.1$  имеет катод термоэмиссионного типа из гадолиния (Gd), значение  $S_{ae}$  для катода из спеченного в вакууме порошка диоксида церия ( $\text{CeO}_2$ ) заключается в диапазоне от  $\sim 0.1$  до 1. Высокими значениями атом–электронного отношения характеризуются катоды из хрома ( $S_{ae} \sim 10^4$ ) и свинца ( $S_{ae} \sim 10^7$ ). Нами также исследовался катод из спеченной в вакууме механической смеси порошков Cr и  $\text{CeO}_2$ , обозначаемой далее как  $\text{CeO}_2 + \text{Cr}$ . Массовое отношение компонент  $\text{CeO}_2$  и Cr в смеси изменялось в диапазоне от 0.5 до 1. Этот катод по величине  $S_{ae}$  является эмиссионно неоднородным, характерный масштаб неоднородности  $\sim 0.1$  мм определялся размером спекавшихся зерен.

Устойчивое горения разряда с ДКП удавалось получить в определенном диапазоне токов, зависящем от материала катода. При токах меньше 10–30 А разряд мог становится неустойчивым, а при токах свыше 150–200 А могли проявляться ограничения, связанные с нагревом камеры, приводящим к увеличению давления газов в ней и, как следствие, нестабильной работе ЭЛП.

Используемые методики измерений некоторых базовых параметров в кратком виде представлены в таблице 1. В данной работе, в основном, рассматриваются режимы горения дуги, при которых не наблюдалась



**Рисунок 1.** Зависимость температуры катода от мощности ЭЛП для разных катодных материалов. Штриховая линия — усредненная калибровочная характеристика, т.е. зависимость  $T_c$  от  $N$  при токе  $I = 0$ .

контракция разряда на аноде, вызывающая рост напряжения  $V_a$ .

## 3. ДАННЫЕ О ТЕМПЕРАТУРЕ КАТОДА, НАПРЯЖЕНИИ НА ДУГЕ И О ДАВЛЕНИИ ПАРА КАТОДНОГО МАТЕРИАЛА У ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА

В соответствии с данными на рисунке 1 увеличение мощности ЭЛП при неизменном токе дуги может приводить к росту температуры катода на 10–15%. Этот рост сопровождается экспоненциальным увеличением давления насыщенных паров катодного материала, а также скорости испарения  $G_a$  и удельной эрозии катода  $\beta$ . В соответствии с (1) и (3) увеличение  $\beta$  снижает коэффициенты интенсивности генерации плазмы  $\alpha$  и  $\delta$  в дуге, что отражается на параметрах плазмы и на характеристиках дуги, например, на напряжении  $V_a$ .

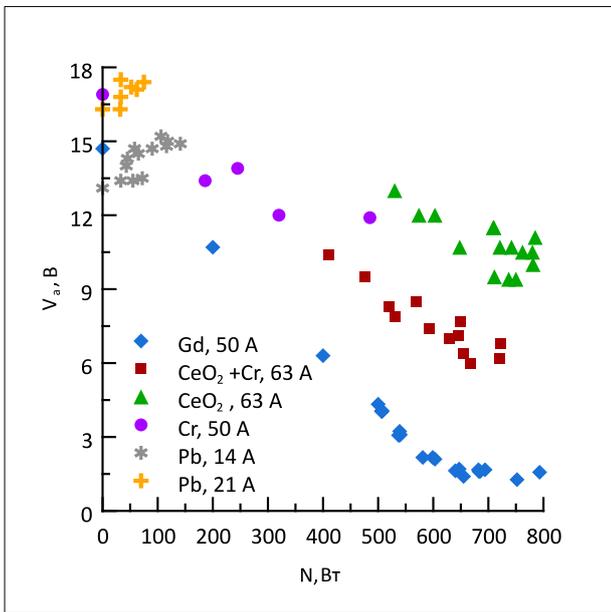
Отметим, что по данным [15] для дуги с ККП повышенная интегральная температура рабочей поверхности катода, вызванная нагревом катода дугой, также влияет на ее характеристики, например, на эрозию катода и зарядовый состав ионов плазмы. Но при этом стабильность разряда с ККП при росте интегральной температуры катода обычно существенно уменьшается.

Поскольку напряжение  $V_a$  при фиксированном токе существенно зависит от  $N$ , то, наряду с обычными вольтамперными характеристиками (ВАХ), важное значение для дуги с ДКП имеют зависимости  $V_a$  от  $N$  при фиксированном токе, которые можно назвать вольт-ваттными характеристиками (ВВХ).

Из данных рисунка 2 следует, что для дуги с ДКП на свинцовом катоде, имеющем наибольшие значения давления  $P_s$  и  $S_{ae}$ , наблюдаются возрастающие ВВХ, а для других исследованных катодов увеличение мощности  $N$  приводит к снижению напряжения  $V_a$ . Темп уменьшения  $V_a$  снижается с ростом  $N$ . Наибольшее

Таблица 1. Основные измеряемые параметры и методики.

Измеряемый параметр	Методика измерения
Мощность ЭЛП $N = 0-1000$ Вт	Ток и напряжение в высоковольтной части ЭЛП
Температура катода $T_c = 1.2-2.4$ кК	Оптический пирометр на длине волны 0.9 нм
Эрозия или скорость испарения катода $G_a = 10^{-4}-10^{-2}$ г/с	Взвешивание
Тепловой поток из дуги на катод $Q_c = 300-1000$ Вт	Калибровка температуры катода по тепловому потоку ЭЛП
Температура электронов $T_e = 0.4-10$ эВ	Одиночный зонд
Кинетическая (наиболее вероятная) энергия ионов в плазме $W_i = 5-50$ эВ	Многосеточный зонд
Средний заряд ионов в плазме $Z_i = 0.2-2e$	Конденсационный зонд, зарядовый состав плазмы

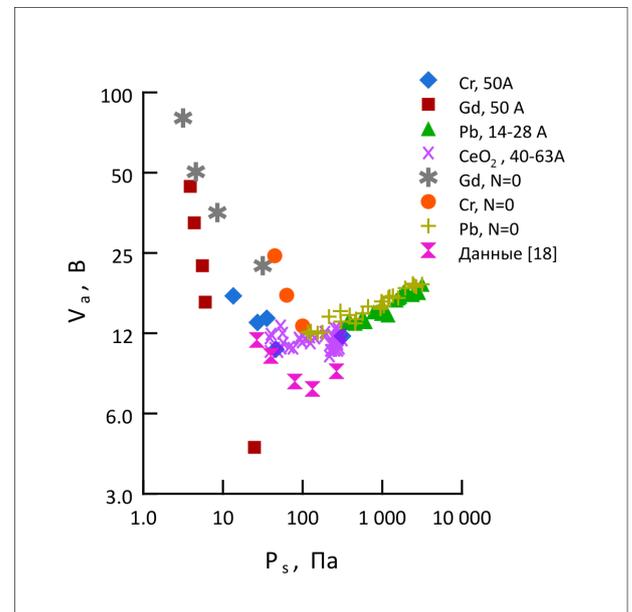


**Рисунок 2.** Зависимость напряжения дуги с ДКП от мощности ЭЛП для разных катодов. Для катода из Gd представлены величины  $V_a/3$ .

(на порядок) снижение напряжения наблюдается для термоэмиссионного катода из Gd, имеющего минимальные значения  $S_{ae}$  и  $P_s$ . Для других катодов напряжение  $V_a$  уменьшается в полтора–два раза.

На рисунке 3 представлен график напряжения на дуге в зависимости от давления насыщенного пара  $V_a(P_s)$ , построенный на основании измеренных значений  $T_c$  с использованием литературных данных о давлении пара (Cr, Pb — [16]; Gd — [11], CeO<sub>2</sub> — [17]). В соответствии с данными рисунка 3 зависимость  $V_a(P_s)$  имеет V-образный вид с минимальным значением порядка первого потенциала ионизации атомов катодного материала. Минимум напряжения реализуется при давлении  $P_s \sim 0,1$  кПа.

Зависимости на рисунке 3 подобны зависимостям напряжения пробоя газа  $V_b$  от давления газа при фиксированном размере межэлектродного промежутка (кривая Пашена) [19]. Аналогичный вид зависимостей от давле-



**Рисунок 3.** Зависимость напряжения дуги с ДКП от давления насыщенного пара катодного материала в режимах с подогревом и без подогрева катода. Зависимость суммы анодного и катодного падения потенциала в дуге на термоэмиссионном катоде от давления газа при  $I = 2$  А по данным [18].

ния газа напряжений  $V_b$  и  $V_a$  известен и для дуг на накаливаемых термоэмиссионных катодах при пониженном давлении газа [20–22]. Это подтверждает, например, представленная на рисунке 3 сумма анодного и катодного падения потенциала, которая была оценена в [18] в экспериментах с дуговым разрядом на накаливаемом оксидном катоде.

На левой ветви зависимости  $V_a(P_s)$ , то есть при относительно малых значениях давления, расположены данные о напряжении  $V_a$  для разряда на катодах из Gd и Cr, которые уменьшаются с ростом  $P_s$  тем сильнее, чем меньше  $P_s$ . На правой ветви зависимости  $V_a(P_s)$  расположены, в основном, данные о напряжении  $V_a$  для дуги на катоде из Pb, которые возрастают с ростом  $P_s$ .

В отсутствие подогрева катода ( $N = 0$ ) напряжение  $V_a$  при данном значении  $T_c$  (и  $P_s$ ) превышает напряжение на подогреваемом катоде. Это превышение  $V_a$  обеспечивает повышенный тепловой поток на катод  $Q = IV_c$ , необходимый для поддержания его заданной температуры при  $N = 0$ .

Отметим, что видом зависимости  $V_a(P_s)$  в исследованном диапазоне  $P_s$  можно объяснить вид обычных ВАХ при постоянных значениях мощности ЭЛП. Например, если при  $N = 0$ , то есть в самостоятельном разряде при малых токах и значениях  $T_c$ , реализуется давление  $P_s < 0.1$  кПа, то должна наблюдаться падающая часть ВАХ, а при  $P_s > 0.1$  кПа или при больших токах — возрастающая. Первый случай и падающие ВАХ реализуются на катодах из Gd и Cr, второй случай и возрастающая ВАХ — на свинцовом катоде.

В общем случае при большом диапазоне изменения тока дуги, приводящем к большому изменению  $T_c$  (и  $P_s$ ), можно реализовать немонотонные ВАХ с минимумом  $V_a$  при средних токах. Такие немонотонные ВАХ при постоянных  $N$  от 18 до 100 кВт с минимумом  $V_a$  от 7 до 10 В были получены в [6] на титановом катоде при токах дуги от 10 до 2000 А.

#### 4. ДАННЫЕ О КОЭФФИЦИЕНТАХ ЭЛЕКТРО- И ЭНЕРГОПЕРЕНОСА И О ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ДУГАХ С ДКП

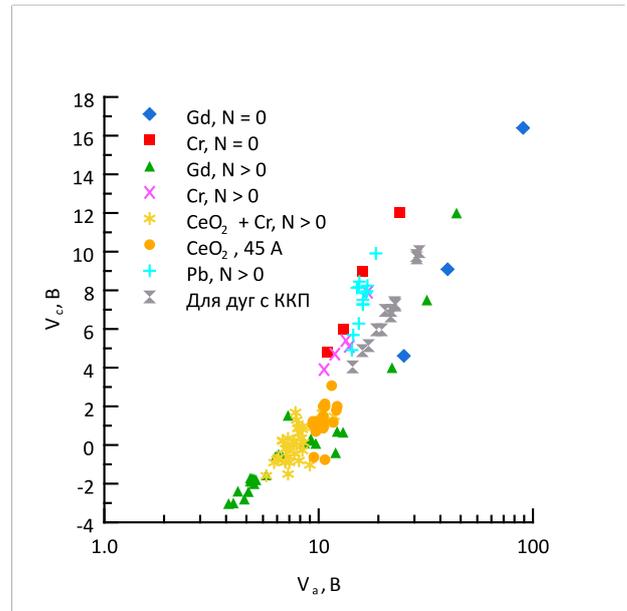
В соответствии с (1) и (3) для определения коэффициента электропереноса  $\alpha$  необходимы данные об удельной эрозии катода  $\beta$ , а для расчета коэффициента энергопереноса  $\delta$  нужны данные о напряжении на дуге и ВЭ теплового потока  $Q_c$  из плазмы в катод  $V_c$ . В наших экспериментах тепловой поток  $Q_c$  измерялся при помощи калибровки катода, то есть получения зависимости температуры катода от мощности  $N$  в отсутствие дуги  $T_c(N, I = 0)$ . Из сравнения калибровочной зависимости с аналогичной зависимостью, измеренной при наличии дуги  $T_c(N, I)$  находится тепловой поток на катод  $Q_c$  при температуре  $T_c$ :

$$Q_c(T_c) = N(I = 0) - N(I), \quad (4)$$

где  $N(I = 0)$  и  $N(I)$  — мощность подогрева катода от ЭЛП до одинаковой температуры  $T_c$  без дуги и в дуге с током  $I$  соответственно.

Соотношение (4) справедливо, если потери энергии с катода определяются, в основном, тепловым излучением и теплопроводностью через элементы конструкции катодного тигля, а потерями тепла на испарение катодного материала можно пренебречь. Этим условиям удовлетворял разряд на катоде из гадолиния ( $S_{ae} \sim 0.1$ ). Для разряда на хромовом катоде ( $S_{ae} \sim 10^4$ ) при определении потока  $Q_c$  нужно было вносить сравнительно небольшую поправку на потери энергии с катода на испарение хрома. Эта поправка определялась с помощью измерения скорости испарения катода в дуге  $G_a$ . Для свинцового катода ( $S_{ae} > 10^7$ ) игнорирование потерь энергии на испарение могло привести к качественно неверным результатам [4].

Для пояснения методики определения  $V_c$  заметим, что всем дуговым точкам на рисунке 1, которые лежат слева от калибровочной кривой, снятой при  $I = 0$ , соответствуют значения  $V_c > 0$ , а для точек справа от этой



**Рисунок 4.** Зависимость от напряжения на дуге ВЭ теплового потока на катод для вакуумных дуг в режимах без подогрева катода ( $N = 0$ ) и с подогревом катода. Для дуг с ДКП оценки  $V_c$  сделаны по методу [23] при использовании данных о  $V_a$  из [24].

кривой (для Gd и  $\text{CeO}_2 + \text{Cr}$ ) — значения  $V_c < 0$ . Отрицательные величины ВЭ означают, что потери тепла на эмиссию электронов с катода превышают тепловой поток из плазмы на катод.

На рисунке 4 приведены значения ВЭ  $V_c$  в зависимости от напряжения на разряде. Из данных на этом рисунке следует, что величины  $V_c$  для всех исследованных катодов неплохо коррелируют с напряжением на дуге, а именно, с ростом  $V_a$  значения  $V_c$  увеличиваются.

При данном  $V_a$  значения  $V_c$  для вакуумной дуги с ДКП на катодах из Cr и Pb с большими значениями  $S_{ae}$  (свыше  $10^4$ ) близки между собой. Для таких катодов отношение  $V_c/V_a$  или доля мощности, идущей на катод от всей мощности дуги возрастает с ростом  $V_a$  от 30% при  $V_a = 10$  В до 50% при  $V_a = 20$  В.

Для дуг на катодах термоэмиссионного типа из Gd,  $\text{CeO}_2$  и  $\text{CeO}_2 + \text{Cr}$  с малыми величинами атом-электронного отношения  $S_{ae} (\sim 0.1)$  значения  $V_c$  при данном  $V_a$  значительно ниже, что объясняется дефицитом ионного потока на катод, являющегося обычно основным источником нагрева катода [4]. При малых напряжениях  $V_a < (7-9)$  В и большой интенсивности подогрева катода  $N_n = N/(IV_a) > 1.5$  на таких катодах реализуются отрицательные значения ВЭ теплового потока. Это указывает на значительное термоэмиссионное охлаждение катода, связанное с большой долей термоэмиссионного тока с катода (свыше 0.9). Подобное охлаждение термоэмиссионных катодов наблюдается и в газовых дугах пониженного давления [22, 25].

Модуль значений ВЭ теплового потока  $V_c$  для порошковых катодов из  $\text{CeO}_2$  и  $\text{CeO}_2 + \text{Cr}$  в среднем не превышает 2 В, что приводит к большой погрешности и разбросу данных о  $V_c$ . Кроме того, при использованных токах менее 150 А, малые значения  $V_c$  не позволяли реализовывать дугу подогрева катода.

Значения  $V_c$  сравнивались с простыми оценками  $V_c = 0.4(V_a - \Phi_e/e)$ , предложенными в [23] для дуги с ККП при характерных токах от 100 до 300 А ( $\Phi_e$  — работа выхода электронов с катода). Для оценки  $V_c$  использовались значения  $\Phi_e$  из справочника [26], а напряжения  $V_a$  — из работы [24]. Разряды с ККП рассматривались на разных металлических катодах: от легкоплавких с  $V_a = 14$  В (катод из Вi) до тугоплавких с  $V_a = 28 - 29$  В (катоде из W, Та и Мо).

Сравнение данных на рисунке 4 показывает, что при одинаковых напряжениях  $V_a$  значения  $V_c$  для разряда с ККП лежат в промежутке между найденными минимальными значениями для разрядов с ДКП на катоде из Gd и более высокими значениями на катодах из Cr и Pb. Отношение  $V_c/V_a$  для разрядов с ККП несколько увеличивается с ростом  $V_a$ , а среднее значение  $V_c/V_a = 0.3$ .

Таким образом, численно для обоих типов вакуумных дуг значения  $V_c$  во многом определяются значением  $V_a$ . При этом в разряде с ДКП на катодах термоэмиссионного типа могут быть реализованы и отрицательные значения  $V_c$ .

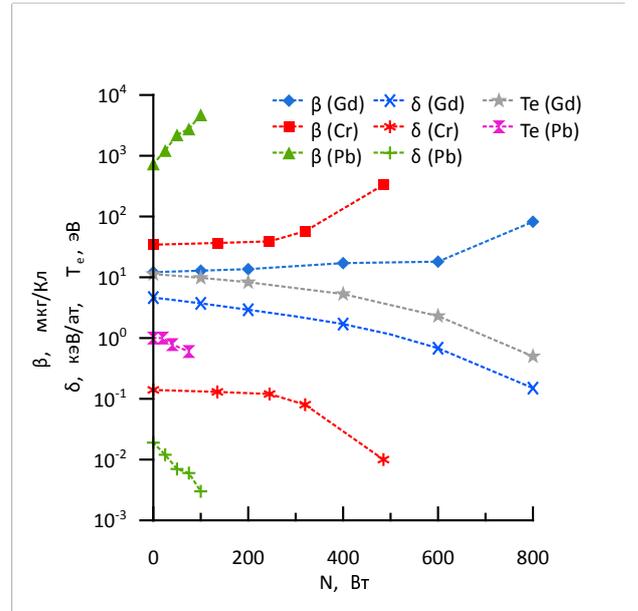
При определении удельной эрозии  $\beta = G_a/I$  металлических катодов для дуги с ДКП использовались в основном ранее полученные [11–13] экспериментальные данные о скорости эрозии катодного материала при наличии дуги. Как установлено в [4, 11], основным механизмом эрозии катода в разряде с ДКП является термическое испарение. В этом случае величина  $G_a$  пропорциональна скорости испарения в вакуум с открытой поверхности, что в соответствии с [11, 16] позволяет записать

$$G_a = gP_s \sqrt{\frac{M_a}{2\pi k_B T_c}}, \quad (5)$$

где  $k_B$  — константа Больцмана,  $g$  — эффективный коэффициент испарения катода в дуге, который по данным работы [11] при данном токе зависит от геометрии полости катодного тигля, в частности, от отношения площади выходного сечения тигля  $S_0$  к площади поверхности катода. Для удобства использования полученные в [11–13] данные о  $G_a$  аппроксимировались линейными зависимостями вида (5).

По данным на рисунке 5 минимальная удельная эрозия катодов  $\beta$  составляла от  $10^{-4}$  г/Кл для Gd до  $10^{-2}$  г/Кл для Pb. Максимальный коэффициент энергопереноса  $\delta$  составлял от 20 эВ/ат для Pb до  $4 \times 10^3$  эВ/ат для Gd. Он реализовывался в отсутствие внешнего подогрева катода. С ростом мощности значения  $\beta$  возрастают практически на порядок, а значения  $\delta$  соответственно уменьшаются. Сильное уменьшение  $\delta$  должно приводить к существенному снижению параметров плазмы. Так, представленная на рисунке 5 усредненная измеренная температура электронов в плазме  $T_e$  на катоде из Gd уменьшается от 10 до 0.5 эВ, а измеренный в [27] средний заряд ионов в этой плазме при более ограниченном снижении  $N$  уменьшается с  $2.4e$  до  $1e$ . На свинцовом катоде уменьшение  $T_e$  при изменении мощности  $N$ , представленное на рисунке 5, менее значительно: от 1 до 0.5 эВ.

Полученные значения  $\alpha$  и  $\delta$  сравнивались с аналогичными величинами для разряда с ККП, которые были



**Рисунок 5.** Зависимости от мощности подогрева катода удельной эрозии  $\beta$ , удельного энерговклада  $\delta$ , а также температуры электронов в плазме.

оценены по (1) и (3) с использованием удельной ионной эрозии катодов  $\beta_i$  [28],  $V_c$  из [23] и  $V_a$  из [24]. Величина  $\beta_i$  в [28] определялась по измеренным значениям полного ионного тока из разряда и среднего заряда ионов. Поскольку  $\beta_i$  меньше суммарной эрозии катода в паровой фазе [28], то полученные значения  $\alpha$  и  $\delta$  для разряда с ККП являются оценкой сверху. Погрешность оценки может достигать 20–30%.

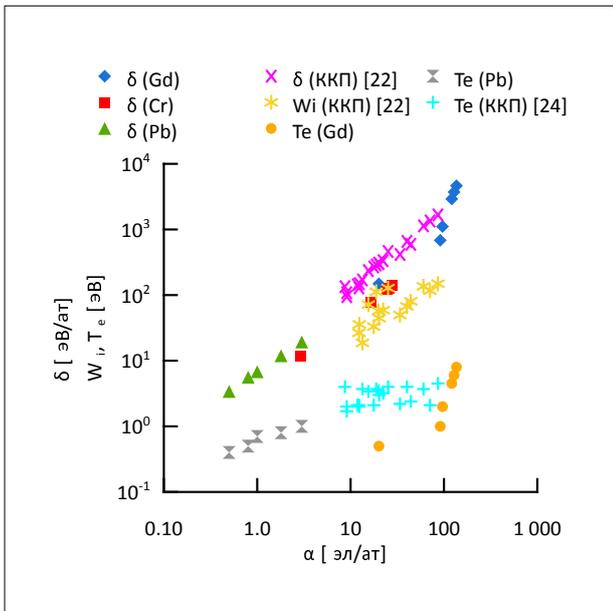
Сравнения величин  $\alpha$  и  $\delta$  для обоих типов катодной привязки вакуумной дуги приведено на рисунке 6. Каждая точка на этом рисунке для разряда с ККП соответствует своему катодному материалу. Разные точки для разряда с ДКП на выбранном катоде соответствуют разной мощности его подогрева (рост  $N$  при фиксированном токе  $I$  уменьшает значения  $\alpha$  и  $\delta$ ).

По данным рисунка 6 значения  $\alpha$  для разряда с ДКП на Gd и Cr лежат в диапазоне изменения этих величин для разрядов с ККП на различных металлических катодах, что объясняется одинаковым уровнем удельной эрозии  $\beta$ .

Если использовать данные [24], для разряда с ККП рост  $\delta$  от 10 до  $10^2$  эВ/ат для изученных катодных материалов приводит к увеличению кинетической энергии ионов  $W_i$  в плазме от 20–30 до 150 эВ, средней кратности заряда ионов  $Z_i$  от 1 до 3 и характерной температуры электронов  $T_e$  от 1.7 до 4.5 эВ.

Для разряда с ДКП на Gd по представленным в работах [4, 27] данным увеличение  $\alpha$  приводит к росту температуры  $T_e$  от 0.5 до 10 эВ, а среднего заряда ионов — от  $1e$  до  $2.4e$  и более. Таким образом, изменение тока и мощности подогрева катода на одном катоде из Gd приводит к получению плазмы с такими регулируемы значениями  $T_e$  и  $Z_i$ , которые реализуются в разряде с ККП на большом наборе катодных материалов.

Повышенные значения  $\beta$  для разряда с ДКП на свинце существенно (на порядок величины и более) уменьшают значения  $\alpha$  и  $\delta$  по сравнению с данными для



**Рисунок 6.** Зависимости от коэффициента электропереноса  $\alpha$  коэффициента энергопереноса  $\delta$  для дуг с ДКП и с ККП на разных металлических катодах, кинетической энергии ионов  $W_i$  в плазме дуги с ККП, а также температуры электронов  $T_e$  для дуг с ДКП и с ККП.

других катодов. Для такого разряда температура электронов на рисунке 6 с ростом  $\alpha$  от 0.5 до 3 увеличивается с 0.5 до 1 эВ. Для разряда с ККП на свинце характерны более высокие значения  $\alpha = 12.5$  эВ/ат и  $T_e = 2$  эВ.

Для пояснения физической причины немонотонной зависимости  $V_a$  от  $P_s$  на рисунке 3 для разряда с ДКП отметим, что в соответствии с (2) и (5) значения  $\alpha$  обратно пропорциональны давлению пара  $P_s$ . Исходя из этого, можно показать, что для исследованных катодов область давлений пара в минимуме  $V_a$  (от 100 до 200 Па) приблизительно соответствует значениям  $\alpha$  в области от 3 до 10 эВ/ат. Убывающая левая часть зависимости  $V_a$  от  $P_s$  реализуется при  $\alpha > 10$  эВ/ат, а правая возрастающая часть — при  $\alpha < 3$  эВ/ат. Граничным значениям  $\alpha_1 = 10$  эВ/ат и  $\alpha_2 = 3$  эВ/ат соответствуют граничные значения  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , которые можно определить из соотношения (3) и которые в среднем составляют 50 и 15 эВ/ат.

Таким образом, растущая зависимость  $V_a$  от  $P_s$  для вакуумной дуги с ДКП является следствием относительно низких значений коэффициентов  $\alpha < 3$  эВ/ат и  $\delta < 15$  эВ/ат.

Практически важно, что существенно разные значения  $\alpha$  и  $\delta$  в разных частях зависимости  $V_a(P_s)$  на рисунке 3 должны приводить к разным параметрам генерируемой плазмы, что подтверждается опытными данными [4, 27]. Так, на катоде из Gd (левая ветвь зависимости  $V_a(P_s)$ ) температура электронов может достигать 10 эВ [4], а средний заряд ионов в плазме может превышать значения  $2.4e$ . В то же время на свинцовом катоде (правая ветвь зависимости  $V_a(P_s)$ ) характерные значения  $T_e < 1.2$  эВ и  $Z_i < 0.3e$ , то есть почти на порядок меньше.

Интересно, что все данные для разрядов с ККП на рисунке 6 расположены в области  $\alpha > 10$  эВ/ат. В то же время дуга с ДКП на свинце при наличии подогрева ка-

тода может быть реализована при значительно меньших значениях  $\alpha < 1$  эВ/ат.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ представленных экспериментальных данных о влиянии мощности внешнего подогрева на характеристики вакуумной дуги с диффузной катодной привязкой (ДКП) позволяет сделать следующие выводы.

В качестве параметров, определяющих интенсивность генерации и параметры плазмы в дугах с ДКП, целесообразно использовать коэффициенты электропереноса  $\alpha$  и энергопереноса  $\delta$ . Для исследованных катодов коэффициент  $\alpha$  изменялся от 0.5 до 150 эВ/ат, а коэффициент  $\delta$  — от 3 до  $4 \times 10^3$  эВ/ат. Для обсуждаемого разряда указанные коэффициенты обратно пропорциональны давлению насыщенного пара катодного материала  $P_s$  при рабочей температуре катода, что обусловлено преобладающим влиянием термического испарения на величину эрозии катода.

Подогрев катода при неизменном токе приводит к росту его температуры, что сопровождается экспоненциальным ростом давления пара и соответствующим снижением коэффициентов электропереноса  $\alpha$  и энергопереноса  $\delta$ . Это снижение обуславливает уменьшение параметров плазмы, в том числе температуры электронов  $T_e$ , а также кинетической энергии  $W_i$  и среднего заряда ионов в плазменном потоке  $Z_i$ . Так, в разряде на катоде из Gd изменение мощности подогрева катода приводит к почти десятикратному изменению величин  $T_e$  и  $W_i$  и к трехкратному изменению  $Z_i$ . Мощность подогрева катода также существенно влияет на напряжение горения дуги.

При фиксированных токах получены зависимости напряжения  $V_a$  от мощности подогрева катода. На свинцовом катоде напряжение увеличивается с ростом мощности, а на остальных исследованных катодах — уменьшается.

Зависимость напряжения на дуге от давления пара  $P_s$  имеет немонотонный, V-образный вид с минимальными значениями от 6 до 12 В при давлении катодного пара порядка 0.1 кПа, что соответствует коэффициенту  $\alpha$  на уровне 3–10 эВ/ат, а коэффициенту  $\delta$  — на уровне 15–50 эВ/ат. Немонотонность зависимости  $V_a(P_s)$  позволяет объяснить разный вид вольт-амперных характеристик дуги на различных катодах при постоянной мощности подогрева и зависимость напряжения от мощности при постоянном токе.

Существует корреляция между значениями вольтова эквивалента теплового потока из плазмы на катод и напряжением на дуге. Максимальные значения вольтова эквивалента могут достигать половины значения падения напряжения на дуге.

Сопоставлены коэффициенты  $\alpha$  и  $\delta$  в вакуумных дугах с ДКП и с контрагированными катодными микрочипами. С учетом отличия коэффициентов  $\alpha$  и  $\delta$  можно говорить о наличии определенного соответствия параметров плазмы в дугах обоих типов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

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

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Васин А И, Дороднов А М и Петросов В А 1979 *Письма в ЖТФ* **5** 1499–1504
2. Полищук В П, Сычев П Е, Шабашов В И и Ярцев И М 1986 *Журнал технической физики* **56** 2233–2235
3. Puchkarev V F and Chesnokov S M 1992 *Journal of Physics D: Applied Physics* **25** 1760–1766
4. Polishchuk V P *et al* 2020 *High Temperature* **58** 476–494
5. Кобайн Дж, Эккер Г, Фаррелл Дж, Гринвуд А и Харрис Л 1982 *Вакуумные дуги* (М.: Мир)
6. Kajioka H 1997 *Journal of Vacuum Science & Technology, A* **15** 2728
7. Goedicke K, Scheffel B and Schiller S 1994 *Surface and Coatings Technology* **68-69** 799–803
8. Metzner C, Scheffel B and Goedicke K 1996 *Surface and Coatings Technology* **86-87** 769–775
9. Richter P, Peter S, Filippov V, Flemming G and Kuhn M 1999 *IEEE Transactions on Plasma Science* **27** 1079–1083
10. Usmanov R A, Amirov R K, Gavrikov A V, Liziakin G D, Polistchook V P, Samoylov I S, Smirnov V P, Vorona N A and Yartsev I M 2018 *Physics of Plasmas* **25** 063524
11. Бронин С Я, Полищук В П, Сычев П Е, Шабашов В И и Ярцев И М 1993 *Теплофизика высоких температур* **31** 29–35
12. Батенин В М, Климовский И И, Полищук В П и Синельников В А 2003 *Теплофизика высоких температур* **41** 670–678
13. Amirov R K, Antonov N, Vorona N A, Gavrikov A V, Liziakin G D, Polistchook V P, Samoylov I S, Smirnov V P, Usmanov R A and Yartsev I M 2015 *Journal of Physics: Conference Series* **653** 012164
14. Дороднов А М, Мубояджян С А, Помелов Я А и Струков Ю А 1981 *Журнал прикладной механики и технической физики* 35–41
15. Аксенов И И, Брень В Г, Коновалов И И, Кудрявцева Е Е, Падалка В Г, Сысоев Ю А и Хороших В М 1983 *Теплофизика высоких температур* **21** 646–651
16. Несмеянов А Н 1961 *Давление пара химических элементов* (АН СССР)
17. Казенас Е К и Цветков Ю В 1997 *Испарение оксидов* (Наука М.)
18. Василяк Л М, Васильев А И, Костюченко С В, Соколов Д В, Старцев А Ю и Кудрявцев Н Н 2010 *Прикладная физика* **3** 18–23
19. Райзер Ю П 2009 *Физика газового разряда* (Долгопрудный, Интеллект)
20. Моргулис Н Д 1933 *Успехи физических наук* **13** 58–83
21. Рохлин Г Н 1991 *Разрядные источники света* (Москва)
22. Уэймаус Дж 1977 *Газоразрядные лампы* (Энергия)
23. Daalder J 1981 *Physica B+C* **104** 91–106
24. Anders A and Yushkov G Y 2002 *Journal of Applied Physics* **91** 4824–4832
25. Дороднов А М, Козлов Н П и Помелов Я А 1973 *Теплофизика высоких температур* **11** 724–727
26. Фоменко В С 1981 *Эмиссионные свойства материалов. Справочник*. (Наукова думка. Киев.)
27. Melnikov A D, Usmanov R A, Amirov R K, Antonov N N, Gavrikov A V, Liziakin G D, Polistchook V P and Smirnov V P 2020 *Plasma Physics Reports* **46** 611–616
28. Андерс А, Окс Е М, Юшков Г Ю, Савкин К П, Браун Я и Николаев А Г 2006 *Журнал технической физики* **76** 57–61