

04;11;12

## Две формы привязки атмосферной дуги постоянного тока в аргоне к термоэмиссионному катоду

© Н.К. Митрофанов, С.М. Школьник

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: shkolnik@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 6 октября 2006 г.)

Проведено сравнительное исследование двух форм привязки атмосферной дуги постоянного тока ( $20 < I < 200$  А) в аргоне к термоэмиссионному катоду из чистого вольфрама. Были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) дуги, осевое распределение температуры поверхности катодного стержня (исключая зону привязки дуги), осевое распределение температуры плазмы в прикатодной области и оценена плотность тока на поверхности катода. Измерения ВАХ показали, что напряжения горения дуги при различных формах катодной привязки отчетливо, хотя и не сильно, различаются, ВАХ мод пересекаются. Это подтверждает результат теоретического анализа, выполненного ранее М.С. Бениловым, который показал, что существование различных форм привязки связано с наличием точек ветвления в решении задачи о тепловом балансе дугового катода. Точку пересечения следует рассматривать как одну из таких точек ветвления. Результаты оптических измерений показали, что температура и ее распределение вдоль поверхности катодного стержня в двух формах привязки сильно различаются. Температура плазмы в прикатодной области контрагированной привязки значительно превышает температуру в диффузной привязке и в непосредственной близости от поверхности катода превосходит 3 эВ. Максимальная температура плазмы в контрагированной привязке не зависит от тока. Анализ эрозионных отпечатков показал, что для обеих форм катодной привязки плотность тока на катоде не зависит от тока. В контрагированной привязке плотность тока примерно в четыре раза выше, чем в диффузной, и составляет  $\sim 10^4$  А/см<sup>2</sup>. Сопоставление настоящих результатов с современными теоретическими расчетами параметров прикатодной плазмы и температурных режимов катода показало удовлетворительное согласие эксперимента с расчетом.

PACS: 52.80.Mg

### Введение

Исследования катодных процессов в дугах атмосферного и повышенного давления с термоэмиссионным катодом имеют долгую историю. Их результаты обобщены в целом ряде обзоров и монографий [1–5]. Однако многие проблемы остаются недостаточно изученными. Одна из таких проблем — спонтанный переход дуги постоянного тока с термоэмиссионным катодом между двумя (а, возможно, и более) модами, характеризующимися различными формами катодной привязки.

Это явление было вначале обнаружено в слаботоковой ( $I \leq 10$  А) дуге при повышенном давлении, используемой в светотехнике [6], а затем и в сильтоковой ( $I \approx 200$  А) аргоновой дуге атмосферного давления [7]. В работе [7] приведены результаты, показывающие, что при фиксированных условиях эксперимента размер дуговой привязки к стержневому вольфрамовому катоду, оцениваемый по поперечному размеру плазменного канала, может спонтанно изменяться в 1.5–2 раза. Уменьшение размера (контракция) привязки сопровождается заметным ослаблением свечения катодного стержня, т. е. снижением его интегральной температуры.

В последующих работах существование двух форм привязки дуги к термоэмиссионному катоду было неоднократно подтверждено [3]. Однако в результате анализа этих исследований не удается получить четкого

ответа на вопросы, как различаются состояния катода и прикатодной плазмы в привязках различной формы, чем обусловлен переход из одной формы привязки в другую и т.д. Это связано не только с недостаточной исследованностью явления, но также зачастую и с отсутствием ясного указания, какая именно форма привязки изучалась, а то и просто с терминологической путаницей.

Катодную привязку с меньшей плотностью тока (большого размера) обычно называют диффузной, а с более высокой — контрагированной. Термоэмиссионная привязка как в контрагированной, так и в диффузной форме далеко не всегда охватывает всю обращенную к аноду часть катодной поверхности. Поэтому часто и диффузную, и контрагированную привязки называют „катодным пятном“ или просто „пятном“ (особенно часто говорят о пятне, когда имеет место привязка в контрагированной форме). Между тем термин „катодное пятно“ является общепринятым для обозначения нестационарной привязки дуги к холодному катоду, как в вакууме, так и в газовой среде. Привязка к холодному катоду отличается от привязки к термоэмиссионному катоду значительно более высокими значениями плотности тока и скорости эрозии, а также состоянием прикатодной плазмы. В катодном пятне плазма даже в дугах повышенного давления формируется из эрозионных паров катодного материала, а в дугах с термоэмиссионным катодом — из газа, в атмосфере которого горит дуга.

Это отличие очень существенно, так как максимальная плотность ионного тока на катод ограничена давлением плазмообразующего вещества. Если таковым является газ, то максимальная плотность ионного тока определяется заданным извне давлением газа. Если же плазмообразующее вещество генерируется за счет эрозии катода, то плотность ионного тока лимитируется не давлением газа, а давлением эрозионных металлических паров. Давление эрозионных паров определяется внутренними самосогласованными процессами в катодном пятне, и если и зависит от давления газа, то весьма слабо, пока речь не идет о сверхвысоких давлениях. (В настоящее время достаточно подробно исследованы явления в катодном пятне вакуумной дуги (см., например, [8,9]). Данные о катодных пятнах в дугах высокого давления пока ограничены, но есть основания полагать, что при давлениях порядка атмосферного основные характеристики катодного пятна мало зависят от давления газовой среды.)

Использование одного и того же термина для обозначения различных по физической природе объектов приводит к неясностям, а зачастую и является источником серьезных ошибок, если при анализе результатов исследований не учитывается, что они относятся к привязкам различного типа. Поэтому представляется целесообразным использовать термин „катодное пятно“ только для обозначения привязки к холодному катоду.

В последние годы интерес к исследованию катодных процессов в целом (см. [10] и литературу в ней) и обсуждаемых вопросов в частности (см. [11,12] и литературу в них) значительно возрос. Предложенное в [13] объяснение спонтанного перехода из одной формы привязки в другую как результата существования точек ветвления в решении задачи о тепловом балансе дугового катода представляется интересным и, как показало развитие исследований [11,12], весьма продуктивным.

Однако экспериментальные исследования различных форм привязки дуги к термоэмиссионному катоду ведутся в настоящее время лишь в слаботочных дугах ( $I \leq 10$  А), в условиях, характерных для высокоинтенсивных разрядных ламп (HID lamp) (см. [14] и литературу в ней). Исследования же в дугах с токами  $I \sim 10^2$  А и более, представляющие интерес для разработчиков электродуговых нагревателей плазмы (плазмотронов), которые используются в разнообразных технологических процессах, остаются немногочисленными [15–17].

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию состояния катода и прикатодной плазмы в свободногорящей аргонной дуге постоянного тока при атмосферном давлении со стержневым катодом из чистого вольфрама при токах  $I \sim 10^2$  А. Исследовались две формы катодной привязки дуги: диффузная и контрагированная.

Выбор такого объекта для исследований (свободногорящая дуга с катодом из чистого вольфрама), как будет видно ниже, сделал эксперимент чрезвычайно трудоемким. Свободногорящая дуга, особенно при относительно

небольших токах, горит неустойчиво, катодная привязка перемещается по поверхности катода, что приводит к изменению формы дугового канала и анодной привязки. Температура катода из чистого вольфрама выше, чем катода, например, из торированного вольфрама. Это существенно интенсифицирует процессы массопереноса. Форма катода претерпевает значительные изменения, и потому время эксплуатации катода относительно невелико. Однако для понимания физики явления именно такой объект как наиболее простой для теоретического исследования подходит более всего.

## 1. Экспериментальная установка и методы исследования

### 1.1.

Свободногорящая аргонная дуга постоянного тока при атмосферном давлении горела в водоохлаждаемой камере из нержавеющей стали внутренним диаметром 180 и высотой 200 мм. Электроды были расположены вертикально (катод внизу) и вводились через фланцы с помощью сильфонных соединений, которые обеспечивали возможность перемещения каждого из электродов. Перемещение осуществлялось микрометрическим винтом с точностью не хуже  $20 \mu\text{m}$ .

В камере имелось кварцевое окно для вывода излучения и окна для визуального наблюдения и пирометрирования электродов. Камера откачивалась до давления  $p \sim 10^{-3}$  мм Hg и прогревалась под откачкой. После завершения цикла откачки камера промывалась аргонном и затем заполнялась до рабочего давления, превышающего атмосферное на несколько процентов. Использовался аргон марки ОЧ.

Катодный стержень был изготовлен из вольфрамового прутка диаметром  $D = 2$  мм (использовался вольфрам марки ОЧВ: 99.976%, согласно сертификату Испытательного аналитико-сертификационного центра „Гиредмета“). Отрезок прутка длиной 14–15 мм запрессовывался в медный водоохлаждаемый держатель на глубину 5 мм. Таким образом, длина выступающей части катодного стержня  $L$  составляла 9–10 мм. Рабочий конец стержня не затачивался и имел по краю закругление радиусом  $\approx 0.25$  мм.

Использовался медный водоохлаждаемый плоский анод большого диаметра (60 мм), что обеспечивало естественную форму привязки дуги на аноде. Межэлектродный промежуток — расстояние от кончика катодного стержня до плоскости анода — и положение электродов относительно оптической оси регулировалось с помощью сильфонных соединений. Измерения выполнены в дуге длиной 10 мм.

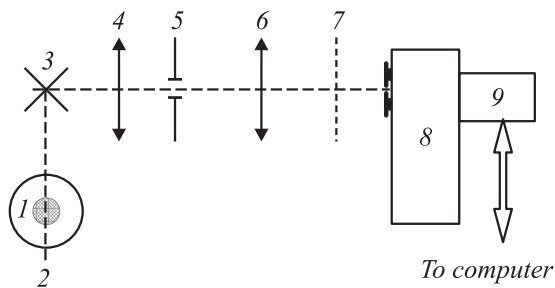
Для питания дуги использовался трехфазный двухполупериодный выпрямитель с емкостным фильтром. Выходное напряжение  $\approx 80$  В. Пульсации тока не превышали 2%. Ток дуги варьировался ступенчато в пределах 20–200 А переключением балластного сопротивления.

Поджиг разряда осуществлялся обрывом тока ( $\approx 30$  А) во вспомогательной цепи. Поджиговый электрод (вольфрамовый стержень) отрывался от боковой поверхности катода вблизи его кончика и удерживался на расстоянии  $\sim 10$  мм с помощью электромагнита. Это расстояние было достаточным, чтобы обеспечить отсутствие контакта поджигового электрода с дуговой плазмой.

В эксперименте измерялись ток и напряжение горения дуги, а также осевые распределения температуры поверхности катодного стержня и прикатодной плазмы. Визуальные наблюдения за состоянием дуги проводились по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Для этого на двух экранах создавались увеличенные изображения разрядного промежутка. После завершения измерений в выбранном режиме поверхность катода анализировалась с помощью оптического микроскопа.

Измерения распределения температуры вдоль боковой поверхности катодного стержня  $T_c(z)$  проводились с помощью яркостного пирометра (здесь  $z$  — ось симметрии электродов, направленная от катода к аноду;  $z = 0$  соответствует положению кончика катодного стержня). Температура катода измерялась вне зоны привязки дуги при  $z \leq -1$  мм, т. е. там, где вкладом излучения плазмы можно было пренебречь.

Для определения температуры прикатодной плазмы проводились спектроскопические измерения. Блок-схема установки для этих измерений показана на рис. 1. Горизонтально ориентированное уменьшенное (0.65) изображение разрядного промежутка создавалось в плоскости входной щели ( $25 \mu\text{m}$ ) монохроматора при помощи системы скрещенных зеркал и двухлинзового кварцевого конденсора. Апертура установки составляла 1:120. Сканирование изображения поперек щели осуществлялось перемещением электродов с помощью микрометрического винта. Использовался монохроматор с обратной дисперсией  $13 \text{ nm/mm}$ . Для снижения уровня рассеянного света был применен светофильтр УФС1. Излучение регистрировалось оптическим анализатором спектра с линейным ПЗС-фотоприемником, это позволяло в однократном измерении регистрировать участок спектра длиной  $22 \text{ nm}$ . Для измерения спектральной фоточувствительности использовалась эталонная ленточная лампа СИ8-200У.



**Рис. 1.** Блок-схема установки для спектроскопических измерений. 1 — плазменный объект, 2 — разрядная камера, 3 — система скрещенных зеркал, 4, 6 — двухлинзовый конденсор, 5 — диафрагма, 7 — УФ-фильтр, 8 — монохроматор, 9 — многоканальный оптический анализатор.

Пространственное разрешение в направлении оси  $z$ , достигнутое в настоящих экспериментах при исследовании дугового канала радиусом  $\sim 1$  мм и менее, на длине волны  $\lambda \approx 0.33 \mu\text{m}$ , по нашим оценкам, составляло  $\approx 0.05$  мм.

Достичь значительно более высокого разрешения в исследованиях объемных источников даже относительно небольшой глубины при использовании излучения оптического диапазона принципиально невозможно. Тем не менее во многих публикациях (например, [14,15,18–20]), посвященных исследованию приэлектродных областей дуговых разрядов, можно встретить утверждение, что пространственное разрешение составляло  $20\text{--}25 \mu\text{m}$ , хотя использовалось излучение с значительно большей, чем в настоящей работе, длиной волны ( $\lambda \approx 0.7 \mu\text{m}$ ). Более того, в работе [18] было высказано пожелание довести пространственное разрешение при оптических исследованиях прикатодной области дуги до  $1 \mu\text{m}$  (т. е. до величины порядка длины волны используемого излучения), чтобы подтвердить некоторые гипотезы авторов работы о структуре прикатодного слоя.

Возможность получения высокого пространственного разрешения в работах [14,15,18–20] аргументируется тем, что в них были использованы высококачественные оптические приборы и системы регистрации излучения (низкий уровень отношения сигнал/шум), а также прецизионные электромеханические системы сканирования, управляемые компьютерами с помощью специально разработанных программ. В работе [15], например, указано, что перемещение стола, на котором было закреплено разрядное устройство, могло контролироваться с точностью не хуже  $5 \mu\text{m}$ . При этом ни в одной из перечисленных выше работ не обсуждался вопрос, на каком уровне ограничивают пространственное разрешение при исследовании объемных источников света законы геометрической оптики и дифракция.

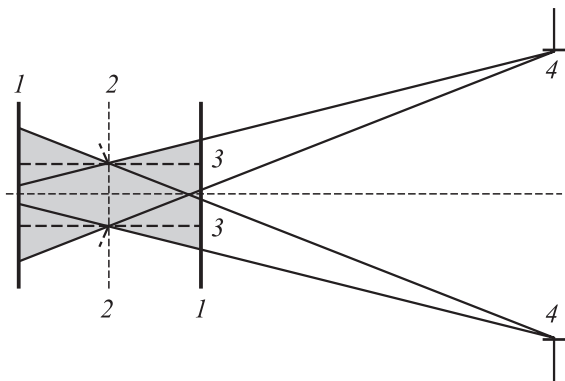
Это заставляет нас остановиться подробнее на вопросе о пространственном разрешении при измерениях в объемном источнике.

## 1.2.

Стремление добиться максимально высокого пространственного разрешения при исследовании приэлектродных процессов в сильноточных дугах высокого давления вызвано малой протяженностью приэлектродных слоев в таких разрядах [21,22].

Предел пространственного разрешения при исследовании плоских источников, следующий из законов волновой оптики, составляет примерно  $\lambda/2$ , где  $\lambda$  — длина волны регистрируемого излучения. Для реализации этого предела нужно собирать свет из большого телесного угла (см., например, [23]).

Однако при исследовании объемных источников света для получения высокого пространственного разрешения необходимо, напротив, собирать свет из малого угла. Сказанное иллюстрирует рис. 2, на котором схематически показано сечение дугового канала вдоль его оси



**Рис. 2.** Иллюстрация к вопросу о пространственном разрешении при измерениях в объемных источниках излучения. 1 — объемный источник (область собирания излучения выделена), 2 — отображение входной щели в плоскости фокусировки, 3 — вырезаемый входной слой объемного источника, 4 — апертурная диафрагма.

перпендикулярно входной щели спектрального прибора. На этом же рисунке показано отображение входной щели в плоскости фокусировки с учетом увеличения. Видно, что в прибор поступает свет не только из слоя, ограниченного пунктирными линиями, ширина которого определяется входной щелью, но и из всей заштрихованной области, размеры которой определяются диаметром канала и апертурой установки. (Более подробно вопрос о том, из каких областей приходит на входную щель свет из объемного источника, рассмотрен в [24].) Отметим, что изображение объемного источника всегда несколько расфокусировано, что дополнительно ухудшает пространственное разрешение.

Угол, в котором следует собирать свет из объемного источника, должен быть выбран как компромисс между желанием получить информацию из тонкого, практически плоского слоя плазмы и ограничением, накладываемым дифракцией пучка на действующей диафрагме. (Очевидно, что при выборе параметров оптической схемы, таких как апертура, ширина щели и увеличение, следует также учитывать ограничения, накладываемые шумами в объекте и регистрирующей аппаратуре. Нельзя допустить снижения отношения сигнал/шум ниже приемлемого уровня.)

К сожалению, о необходимости поиска такого компромисса часто забывают. При выборе параметров установки и определении соответствующего им пространственного разрешения не учитывают дифракцию либо глубину источника вдоль луча зрения. Например, в работах [18–20] использовалась установка, с увеличением 1 и апертурой 1:200 [18] и 1:140 [19,20], т.е. излучение дуги собиралось из узких телесных углов. Это, по мнению авторов, позволяло считать, что пространственное разрешение определяется практически только шириной входной щели, которая была выбрана равной  $25\ \mu\text{m}$ . Однако легко видеть, что при таких значениях апертуры пространственное разрешение, на самом деле, низкое, и использование тонких щелей не

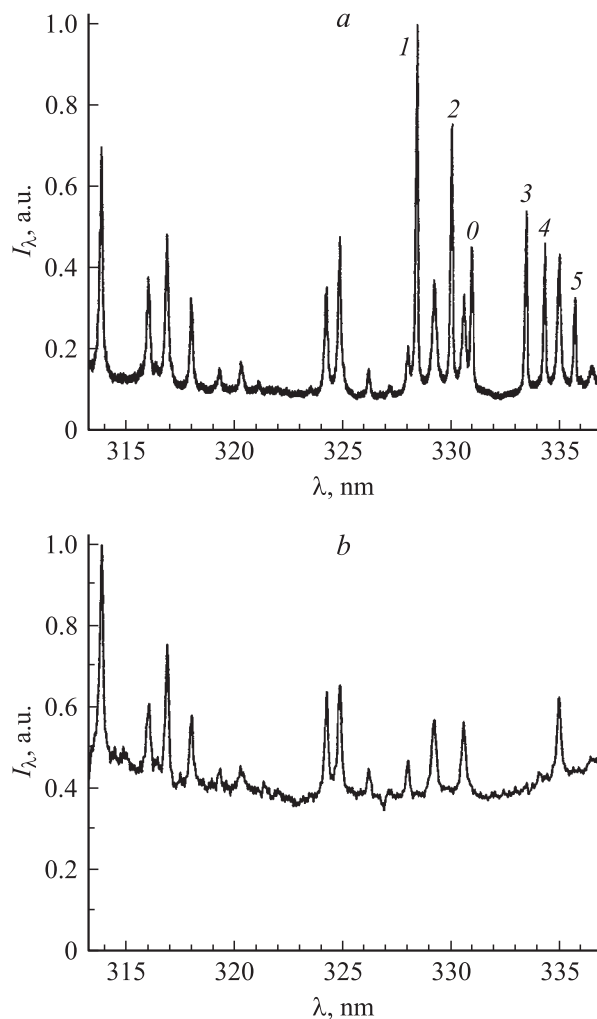
имеет смысла. Действительно, при измерениях на длине волны  $\lambda \approx 0.7\ \mu\text{m}$  (в [18] использовалась линия излучения ArI  $\lambda = 695.5\ \text{nm}$ ) и апертуре 1:200 дифракция ограничивает разрешение на уровне  $\approx 140\ \mu\text{m}$ . При измерениях на длине волны  $\lambda \approx 0.5\ \mu\text{m}$  (линия излучения ArII  $\lambda = 480.6\ \text{nm}$ ) и апертуре 1:140 [19,20] разрешение выше ( $\approx 70\ \mu\text{m}$ ), но все еще заметно хуже, чем полагают авторы.

Если не учитывается другая причина ограничения пространственного разрешения, связанная с тем, что источник имеет глубину вдоль луча зрения, то это тоже приводит к ошибкам. Например, в работе [15] состояние плазмы диагностировалось по излучению спектральной линии ArI  $\lambda = 696.5\ \text{nm}$ . Вблизи катода в приосевой области плазма была сильно ионизована, и потому излучение атомарного аргона (ArI) приходило с периферии разряда. Максимальное значение коэффициента излучения плазмы достигалось на расстоянии  $\approx 1.3\ \text{mm}$  от оси дуги ([15], рис. 2). Размер исследуемого объекта вдоль луча зрения (ширина на половине высоты) можно оценить как  $\approx 3.5\ \text{mm}$ . Пространственное разрешение, по мнению авторов, обеспечивалось надлежащим выбором скрещенных входных щелей и прецизионностью сканирования и составляло  $20 \times 25\ \mu\text{m}$ . Значение апертуры не указано. Допустим, что апертура была выбрана так, чтобы дифракция ограничивала пространственное разрешение на уровне, не худшем, чем указано авторами. Оценка показывает, что для этого необходимо использовать оптическую систему с апертурой не меньше 1:30. Но при апертуре 1:30, как следует из рис. 2, пространственное разрешение при исследовании дугового канала диаметром  $\approx 3.5\ \text{mm}$  не может быть выше  $\approx 60\ \mu\text{m}$ .

Очевидно, что при исследовании сильно контрагированных привязок дуги к электроду можно достичь лучшего пространственного разрешения в силу малости диаметра таких привязок (малой глубины объекта). Однако и в таких объектах добиться разрешения, существенно более высокого, чем  $50\ \mu\text{m}$ , не удастся. В работе [14] исследовалась контрагированная катодная привязка аргоновой дуги радиусом  $\sim 0.6\ \text{mm}$ . Регистрировалось излучение ArI  $\lambda = 696.5\ \text{nm}$ . Исходя из соотношения сигнал/шум ширина входной щели была выбрана  $25\ \mu\text{m}$ . По нашим оценкам, пространственное разрешение в таких условиях не могло быть лучше  $\approx 40\ \mu\text{m}$ , в то время как из приведенных в этой работе результатов следует, что авторы оценивают его в  $25\ \mu\text{m}$ .

### 1.3.

Перейдем к описанию использованной нами методики спектроскопических измерений, но прежде уточним задачу настоящего исследования. Анализ литературы показал, что температура плазмы в диффузной привязке дуги к катоду была измерена во многих работах, и результаты этих изменений находятся в хорошем согласии друг с другом [3]. Температура в контрагированной привязке остается неизвестной. Результаты, полученные



**Рис. 3.** Спектры излучения для двух форм привязки дуги на катоде. а) контрагированная форма (пронумерованы только линии ArIII, 0 — неиспользованная линия); б) диффузная форма.

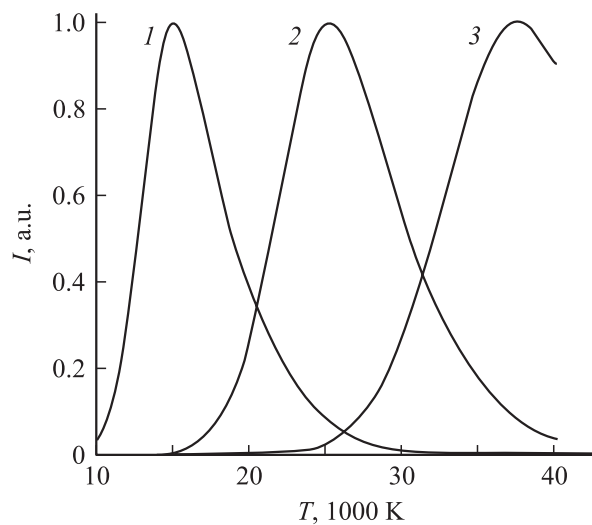
в [15] для контрагированной привязки, представляются сомнительными по причинам, которые станут ясны из нижеизложенного. Поэтому в данной работе основной целью являлось измерение температуры плазмы в контрагированной привязке.

Предварительные исследования [25] показали, что спектр излучения прикатодной области дуги с контрагированной привязкой содержит достаточно интенсивные линии двукратно ионизованного аргона (ArIII). Это с очевидностью указывает на высокий уровень температуры плазмы в такой привязке. Структура спектра ArIII, как это уже было отмечено ранее [26], очень удобна для измерения температуры методом относительных интенсивностей линий. Действительно, на коротком участке спектра 328–336 nm, который в наших экспериментах мог быть зарегистрирован в однократном измерении, расположено шесть интенсивных линий ArIII, достаточно сильно отличающихся по потенциалу возбуждения. Поэтому в настоящих измерениях был использован участок спектра, содержащий эти линии.

На рис. 3, а приведен пример записи спектра контрагированной привязки дуги с током 40 А вблизи кончика катодного стержня ( $z = 0.05$  mm), где на фоне континуума наблюдаются линии ArII и две группы из трех линий ArIII каждая, соответствующие переходам  $4s^3D^{\circ} - 4p^3F$  и  $4s^5S^{\circ} - 4p^5P$  с потенциалами возбуждения верхних уровней  $\approx 28.1$  и  $\approx 25.4$  В соответственно. На рис. 3, а отмечены лишь ArIII, остальные линии относятся к ArII.

Для диагностики использовались линии ArIII с длинами волн  $\lambda = 328.61, 330.22$  nm ( $\approx 28.1$  В) и линии 333.61, 334.47 и 335.85 nm ( $\approx 25.4$  В). Линия ArIII 331.16 nm, „подставленная“ крылом достаточно интенсивной линии ArII 330.72 nm, использована не была. Интенсивность линий определялась численным интегрированием контуров линий относительно уровня континуума. Вероятности радиационных переходов были взяты из [27]. Результаты предварительных измерений показали, что температура не превышает 37000 К, т.е. несколько меньше нормальных температур для выбранных линий ArIII, которые определялись расчетным путем. Пример результатов расчета для линии  $\lambda = 333.61$  nm приведен на рис. 4. Это обстоятельство наряду с малым поперечным размером излучающей области позволяет считать, что температуру приосевой области плазмы можно определить с удовлетворительной точностью без измерения радиальных распределений интенсивности линий и последующей абелевской инверсии [28]. Были выполнены лишь контрольные измерения радиальных распределений, позволившие убедиться в том, что температура действительно ниже нормальной для линий ArIII.

На рис. 3, б приведен спектр дуги с тем же током, но при диффузной форме катодной привязки. Линии излучения ArIII в спектре не наблюдаются.



**Рис. 4.** Зависимости рассчитанных коэффициентов излучения линий от температуры при термическом равновесии для трех состояний ионизации аргона: 1 — ArI,  $\lambda = 696.5$ ; 2 — ArII, 480.6; 3 — ArIII, 333.6 nm.



Отметим, что в условиях, когда плазма излучает линии ArIII, диагностировать ее, анализируя излучение ArI, не только нерационально, но и ошибочно. Действительно, как следует из результатов, представленных на рис. 4, температура плазмы, излучающей линии ArIII, существенно превосходит нормальную температуру для линий ArI. Определение коэффициента излучения линии ArI в приосевой области в этом случае требует проведения процедуры абелевской инверсии, которая может быть реализована в таких условиях лишь с большой неопределенностью [29]. Тщательность измерений и хорошая воспроизводимость результатов, на которые ссылаются авторы работ [15,18], не исчерпывают проблему. В реальном плазменном объекте и в регистрирующей аппаратуре всегда присутствуют шумы. Спектры этих шумов и способ их усреднения при регистрации и обработке результатов остаются неизвестными.

Все вышеизложенное ставит под сомнение результаты определения температуры плазмы в контрагированной привязке, полученные в работе [15], так как в этой работе для определения температуры использовалось излучение линии ArI  $\lambda = 696.5$  nm.

## 2. Результаты экспериментов

### 2.1.

Визуальные наблюдения показали, что диффузная и контрагированная катодные привязки отчетливо различаются по форме и цвету свечения прикатодной плазмы, а также по интенсивности свечения катодного стержня.

При диффузной форме привязки плазменный канал вблизи катода был близок по форме к усеченному конусу, прилегающее к катоду меньшее основание которого имело максимальную яркость. Цвет свечения — белый. Большая часть выступающего из держателя катодного стержня была прогрета и ярко светилась.

При контрагированной форме привязки в непосредственной близости от катода наблюдалось резкое сужение плазменного канала с ярко сияющим голубым ядром. Катодный стержень был прогрет слабее. Светилась заметно меньшая часть стержня вблизи его кончика.

Диаметры ( $d$ ) контактирующих с плазмой участков поверхности катодного стержня при разных формах привязки отчетливо различались. В обеих формах привязки при малых токах  $d \ll D$ . При возрастании тока диаметры обеих привязок увеличивались. Это сопровождалось увеличением длины светящейся части катодного стержня.

При токах  $I \leq 100$  А после поджига в дуге могла реализоваться как контрагированная, так и диффузная форма катодной привязки. Дуга могла достаточно долго гореть в одной из этих форм. Наблюдались спонтанные переходы из одной формы в другую. При токе  $I \approx 120$  А неоднократно наблюдалось состояние дуги, в котором самопроизвольные переходы между различными формами привязки происходили периодически с частотой

$\sim 0.5$  Hz. Переходы сопровождались пульсациями свечения катодного стержня. При токах  $I > 120$  А дуга, как правило, горела с диффузной привязкой к катоду. Для стимуляции перехода катодной привязки в контрагированную форму приходилось прежде увеличить ток, а затем переключением балластного сопротивления уменьшить его до необходимого значения. При токах  $I > 120$  А контрагированная форма катодной привязки существовала относительно короткое время (от десятков секунд до нескольких минут), после чего либо резко, либо постепенно (в течение нескольких десятков секунд) переходила в диффузную форму.

Указанная выше (см. 1.1) длина выступающей из водоохлаждаемого держателя части катодного стержня  $L = 9-10$  mm была подобрана нами экспериментально так, чтобы обеспечить сопоставимые вероятности реализации диффузной и контрагированной форм катодной привязки. При удлинении выступающей части (ухудшении условий теплообмена между кончиком стержня и держателем) вероятность реализации контрагированной формы уменьшалась, а при укорачивании, наоборот, увеличивалась.

Если при поджиге дуги на свежем катоде реализовалась диффузная привязка, то при  $I > 60$  А форма кончика катодного стержня менялась: кончик постепенно приобретал форму, близкую к полусфере. При  $I = 60$  А такое изменение происходило за десятки минут. С увеличением тока это занимало все более короткое время, а при  $I = 140-150$  А кончик катода оплавлялся практически мгновенно. При таких и более высоких токах была заметна деформация кончика стержня: полусферическая поверхность несколько вытягивалась.

Длительное горение дуги в моде с диффузной формой привязки приводило к образованию на боковой поверхности, вблизи кончика стержня, перетяжки. Это явление было описано ранее, оно объясняется более высокой скоростью эрозионных процессов на прогретой части поверхности катодного стержня, не контактирующей с плазмой. Эрозия поверхности, контактирующей с плазмой, замедляется в результате возврата части испаренного металла на поверхность катода в виде ионов — это так называемое явление рециклинга [3].

Более или менее длительное горение дуги с контрагированной привязкой (порядка десяти минут и более) также приводило к заметному изменению формы поверхности стержня. Непосредственно под привязкой образовывался нарост с плоской вершиной, высота которого увеличивалась со временем и могла достигать нескольких десятых долей миллиметра. В ряде случаев наблюдалось превращение нароста в шарообразный выступ. Такой переход сопровождался изменением свечения прикатодной плазмы. Интенсивность свечения синего ядра, характерного для контрагированной привязки, значительно ослабевала. Плазма охватывала образовавшийся шаровой выступ, который светился настолько ярко, что был отчетливо виден на фоне свечения плазмы.

При токах  $I \sim 100$  А и более диффузная привязка устойчиво локализовалась на вершине полусферы. При меньших токах можно было наблюдать „плавание“ привязки по поверхности полусферы: смещение оси привязки относительно оси симметрии электродов.

Если при поджиге дуги на свежем катоде привязка реализовалась в контрагированной форме, то она локализовалась на кромке торцевой поверхности. Локализация контрагированной привязки вблизи оси дуги была редким событием, а устойчивость такого положения привязки — низкой. Привязка либо перемещалась на кромку, либо переходила в диффузную форму. Контрагированная привязка на катоде с полусферическим кончиком (т.е. на катоде, где ранее горела дуга с диффузной привязкой) обычно локализовалась вблизи его вершины.

Смещение катодной привязки с оси симметрии электродов изменяло геометрию всей дуги. Образующаяся в катодном сужении дугового канала, вследствие эффекта Меккера, плазменная струя была направлена под углом к оси симметрии. Это приводило к изменению формы анодной привязки дуги и зачастую к образованию различных экзотических плазменных конфигураций, подобных описанным в [30]. Наиболее выраженными эти явления были в дугах с контрагированной катодной привязкой.

## 2.2.

Напряжение горения дуги с фиксированным током при поджиге дуги на свежем катоде устанавливалось в течение  $\sim 10$  min. По данным [3], это связано с процессом рекристаллизации в теле катодного стержня и соответствующим изменением работы выхода.

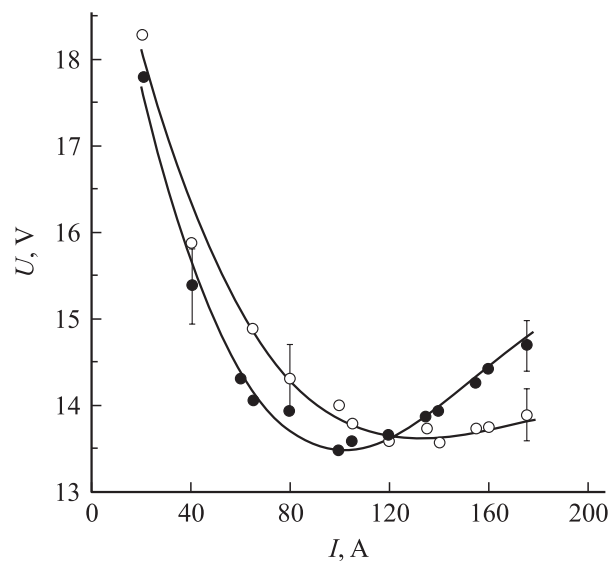
После завершения процесса установления (или при поджиге дуги на катоде, бывшем ранее в работе) при неизменных прочих условиях напряжение оставалось постоянным в течение от нескольких минут до нескольких десятков минут. Длительность периода, в течение которого установившееся напряжение  $U$  с точностью до погрешностей измерений (0.1 В) оставалось постоянным, коррелировала с длительностью процессов изменения формы катодной поверхности, описанных выше. Поэтому можно предположить, что изменение установившегося напряжения  $U$  связано с изменением формы поверхности катодного стержня, вызываемым процессами массопереноса. Изменение формы катодной поверхности изменяет условия теплообмена между контактирующей с плазмой частью поверхности и телом катода, а потому может изменять и прикатодное падение потенциала.

Величина установившегося напряжения  $U$  при некотором фиксированном токе  $I$  зависела от формы катодной привязки и ее локализации относительно оси симметрии электродов. При фиксированном токе установившееся напряжение  $U$  на дуге с контрагированной катодной привязкой могло отличаться от опыта к опыту в пределах  $\Delta U = 1-2$  В. Подчеркнем, что речь идет об опытах,

в которых форма поверхности катода контролировалась и, в случае необходимости, производилась замена катодных стержней. Поэтому различие в напряжениях связывалось нами с различием в локализации катодной привязки. Изменение положения привязки относительно оси симметрии электродов вызывало изменение формы дугового канала и структуры анодной привязки (см. 2.1), что приводило к изменению падения напряжения на плазменном канале и в прианодной области [31,32]. В дугах с диффузной привязкой этот эффект был выражен слабее, поскольку значительного смещения диффузной привязки с оси симметрии не наблюдалось.

С учетом вышесказанного для выявления влияния формы катодной привязки на напряжение горения дуги были проведены измерения установившегося напряжения  $U$  при различных токах — вольт-амперных характеристик дуги (ВАХ), — из которых были отобраны результаты, полученные в дугах с катодной привязкой, локализованной вблизи оси симметрии электродов. Полученные результаты приведены на рис. 5. Каждая точка на этом рисунке есть результат усреднения результатов не менее чем трех измерений. Вертикальными линиями отмечен диапазон разброса результатов отдельных опытов. Причиной разброса является некоторое различие в локализации привязки и различие в длинах межэлектродного промежутка  $L$  от опыта к опыту, которое могло достигать 0.25 мм.

Видно, что напряжение на дуге, исключая область токов вблизи  $I = 120$  А, зависит от формы катодной привязки. Отметим, что это как раз та область токов, в которой наблюдались периодические переходы между двумя формами катодной привязки. Слева от этой области (при меньших токах) напряжение дуги с контрагированной привязкой ниже, чем с диффузной, а справа — выше. В исследованном нами диапазоне токов различие не превышало 1 В.



**Рис. 5.** ВАХ дуги, ○ — мода с катодной привязкой в диффузной форме, ● — мода с катодной привязкой в контрагированной форме.

2.3.

Ниже приведены основные результаты оптических измерений. Как и при измерении ВАХ, из результатов оптических измерений отбирались те, которые были получены при локализации катодной привязки вблизи оси симметрии электродов.

Пирометрические измерения показали, что температура поверхности катодного стержня и ее распределение вдоль оси при различных формах привязки дуги к катоду существенно различаются. В диффузной привязке температура катода вблизи его кончика ( $z = -1$  mm) растет при увеличении тока, а в контрагированной — остается практически неизменной (рис. 6).

Приведенный на рис. 3 пример результата спектроскопических измерений с очевидностью показывает, что температура прикатодной плазмы в контрагированной привязке значительно выше, чем в диффузной. Из вида спектра, представленного на рис. 3, *b*, следует, что температура в диффузной привязке не превышает  $25 \cdot 10^3$  K (рис. 4), что согласуется с данными других авторов.

Максимальная температура плазмы в контрагированной привязке в непосредственной близости от катода превышает 3 eV. Осевое распределение температуры в контрагированной привязке при токах  $I = 60$  и 115 A приведено на рис. 7. Видно, что с ростом тока протяженность области, в которой температура достигает значения  $\approx 3$  eV, увеличивается, но максимальное значение температуры остается практически неизменным.

На рис. 8 приведены значения температуры в контрагированной привязке в непосредственной близости от поверхности катода (максимальной температуры) в диапазоне токов от 40 до 150 A. Видно, что в исследованном диапазоне токов максимальная температура действительно не зависит от тока.

Приведенные на рис. 7 и 8 значения температуры являются результатом усреднения от трех до пяти (в тех

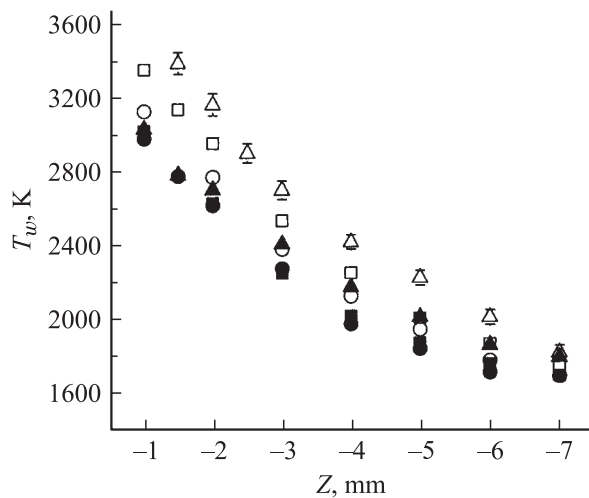


Рис. 6. Осевое распределение температуры поверхности катодного стержня. Темные точки — контрагированная, светлые — диффузная форма катодной привязки. ○ ● — 60, □ ■ — 100, △ ▲ — 155 A.

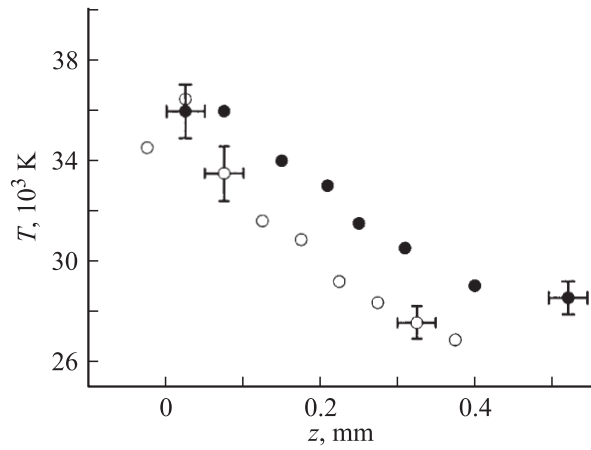


Рис. 7. Осевое распределение температуры плазмы в контрагированной катодной привязке.  $I = 60$  (○),  $I = 115$  A (●).

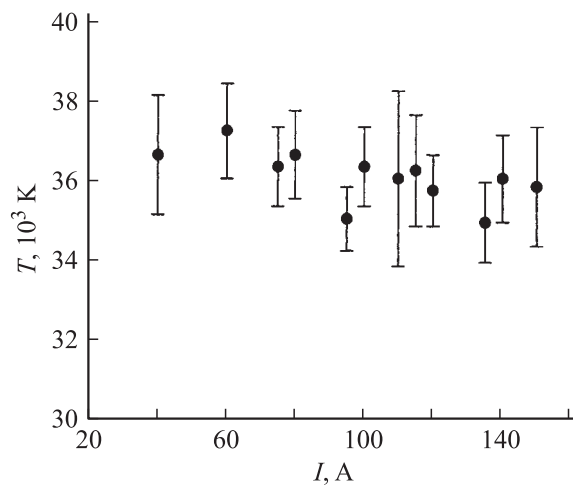


Рис. 8. Зависимость максимальной температуры плазмы в контрагированной привязке от тока.

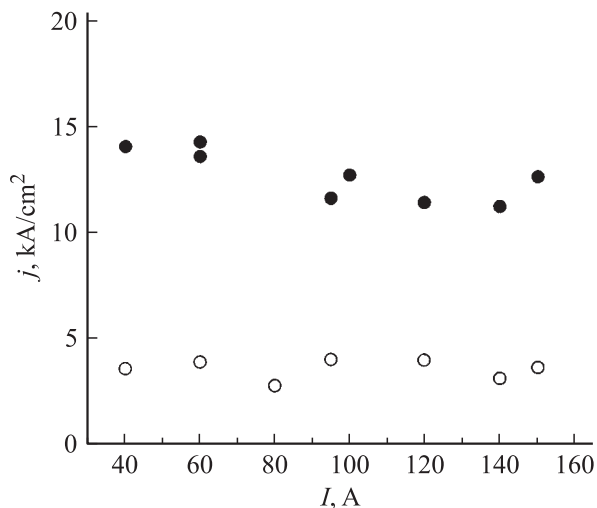
случаях, когда разброс превосходил  $2 \cdot 10^3$  K) измерений. Вертикальные линии отмечают разброс результатов отдельных измерений. По нашему мнению, разброс определяется главным образом смещением катодной привязки.

2.4.

Анализ эрозионных отпечатков позволил оценить среднюю плотность тока на поверхности катода.

Внешний вид эрозионных отпечатков в контрагированной и диффузной модах был существенно различен. В диффузной моде отпечаток представлял собой зеркальный расплав с достаточно четко выраженной границей. В контрагированной моде зеркальный расплав имел форму кольца, а внутри кольца поверхность катода была шероховатой. Оценить характерный размер шероховатости с помощью оптического микроскопа не представлялось возможным. Можно лишь сказать, что он был менее  $5 \mu\text{m}$ .





**Рис. 9.** Плотность тока на поверхности катода в диффузной (○) и контрагированной (●) формах катодной привязки.

Средняя плотность тока на катоде определялась исходя из размера эрозийных отпечатков дуги. Предполагалось, что весь ток замыкался внутри оплавленной части поверхности катода.

Полученные таким образом оценки показали, что при обеих формах привязки дуги к катоду плотность тока не зависела от тока (рис. 9). В контрагированной катодной привязке плотность тока почти в четыре раза выше, чем в диффузной и достигает 12–15 кА/см<sup>2</sup>.

В заключение раздела отметим, что в контрагированной привязке при увеличении тока свыше ~160 А наблюдалась тенденция к снижению как температуры плазмы, так и плотности тока. По нашему мнению, это связано с увеличением диаметра привязки  $d$  при увеличении тока до размера, сравнимого с диаметром катодного стержня  $D$ , т.е. с переходом от  $D/d \gg 1$  к  $D/d \sim 1$ , что изменяет характер теплоотвода в стержне и теплообмена в привязке дуги.

### 3. Обсуждение результатов

ВАХ дуги в обеих исследованных модах — с катодной привязкой в диффузной и в контрагированной (осесимметричной) формах — состоят из двух участков: падающего и растущего. Характеристики пересекаются при  $I \approx 120$  А. При меньших и при больших токах характеристики различаются, причем в разные стороны. Различие относительно невелико (от нескольких десятых долей вольта до одного вольта), однако достаточно большая статистика, набранная в экспериментах, делает его достоверным. Это подтверждается также и измерениями напряжения в отдельных опытах, когда наблюдался спонтанный переход между различными формами катодной привязки. Напряжение при таком переходе изменялось в зависимости от тока в большую или меньшую сторону в хорошем соответствии с результатами усреднения, приведенными на рис. 5.

Характеристики сняты в сопоставимых условиях: и диффузная, и контрагированная привязки были расположены примерно на оси симметрии, что обеспечивало визуально идентичную форму дугового канала и анодной привязки. Это дает основание считать, что различие в напряжениях, соответствующих разным формам привязки, связано с различием падения напряжения в прикатодной области в этих формах привязки. (Следует, однако, иметь в виду, что падение напряжения в прикатодной области складывается из падения в прикатодном слое и в области растекания тока. Падения напряжения в области растекания тока в разных формах привязки могут различаться. Кроме того, можно ожидать, что в дуге с контрагированной катодной привязкой при прочих равных условиях катодная струя более интенсивная. Это может сказаться на структуре прианодной области, а значит, и на падении потенциала в ней [32].)

Вид полученных в настоящей работе ВАХ дуги качественно сходен с ВАХ прикатодного слоя, полученными в [13] методом бифуркационного анализа. Пересечение ВАХ, полученных в настоящей работе при  $I \approx 120$  А, а также наблюдавшиеся периодические переходы из контрагированной моды в диффузную и обратно при токах, близких к  $I = 120$  А, позволяют считать, что это и есть точка ветвления для реализованных в эксперименте условий горения дуги.

Количественное сравнение измеренных ВАХ с результатами численного моделирования [12] невозможно, так как в [12], как и в упомянутой выше работе [13], сделаны расчеты ВАХ не дуги, а прикатодного слоя. Можно было бы сравнить расчетную и экспериментальную разницу в напряжениях, соответствующих различным формам привязки, и положение точки ветвления. Однако расчеты [12] выполнены для стержня с длиной выступающей части  $L = 10$  мм, как и в настоящей работе, но вдвое большего диаметра. Необходимо также отметить, что в эксперименте осесимметричная привязка реализовалась устойчиво только после изменения формы катодного стержня, когда его кончик приобретал форму полусферы. Расчет же сделан для стержня, имеющего цилиндрическую форму. Различия в напряжениях на дуге с контрагированной и диффузной формами привязки в том случае, когда форма катодного стержня была близка к цилиндрической, как отмечено выше, связаны, главным образом, с различиями падения на дуговом канале и прианодной области, а не в прикатодной области плазмы.

Качественно эксперимент согласуется с численным расчетом, выполненным в предположении, что боковая поверхность катодного стержня электрически и термически изолирована, т.е. плотности тока и теплового потока на нее равны нулю ([12], рис. 11). В этом расчете, как и в настоящем эксперименте, имеется точка ветвления при  $I \approx 100$  А, и слева от нее (при меньших токах) катодное падение потенциала в диффузной привязке несколько выше, чем в контрагированной, а справа, напротив, ниже. В расчете область существования контрагированной привязки ограничена током  $I \approx 140$  А. В эксперименте

такое ограничение в исследованном диапазоне токов ( $I \leq 200$  А) не было обнаружено. Контрагированная привязка могла наблюдаться и при  $I \approx 200$  А, но, как уже было указано выше, параметры ее отличаются от тех, что характерны для меньших токов ( $I \leq 150$  А). В эксперименте не удалось обнаружить „высоковольтную“ ветвь ВАХ контрагированной привязки, полученную в результате расчета. Можно думать, что эта ветвь неустойчива. Анализ устойчивости полученных решений в [12] не проводился.

Полученные в настоящей работе характерные значения температуры поверхности катодного стержня, зависимость температуры от тока и распределения температуры вдоль оси стержня при диффузной форме привязки дуги к катоду находятся в хорошем согласии с литературными данными [3].

Различие результатов, полученных при контрагированной и диффузной формах привязки, состоит не только в общем снижении температуры катода, которое тем более выражено, чем больше ток (рис. 6). Обращает на себя внимание совсем слабая зависимость температуры вблизи кончика катодного стержня от тока. Этот результат соответствует результатам численного моделирования контрагированной привязки, полученным в [12]. Как уже было указано, количественное сравнение наших результатов с расчетами [12] невозможно. Однако отметим, что качественно полученные в настоящей работе результаты находятся в хорошем согласии с расчетными. Действительно, в [12] температура вблизи кончика стержня при контрагированной привязке изменяется лишь на  $\approx 150$  К при изменении тока от  $\approx 15$  до  $\approx 110$  А. В то же время при диффузной форме привязки изменение тока приблизительно в тех же пределах приводит, согласно расчетам, к изменению температуры боковой поверхности стержня на  $\approx 600$  К.

Температура плазмы в контрагированной катодной привязке, полученная в настоящей работе, существенно превышает температуру, полученную в контрагированных привязках как слаботочных дуг [14], так и дуг с токами  $\sim 10^2$  А [15]. По данным [15], температура плазмы в контрагированной привязке к катоду диаметром 3.2 мм из чистого вольфрама при токе  $I = 300$  А достигает  $T \approx 23\,000$  К. Как указано в подписи к рисунку (рис. 5, с, [15]), измерения выполнены на расстоянии  $z = 0.2$  мм от катода, однако на самом рисунке приведено другое значение  $z = 0.5$  мм. Полученные в настоящей работе результаты (рис. 5) показывают, что на расстоянии  $z = 0.5$  мм температура плазмы растет с ростом тока и уже при токе  $I = 115$  А (существенно меньшем, чем в [15]) превосходит 28 000 К. На расстоянии  $z = 0.2$  мм от катода различие настоящих результатов и результатов работы [15] еще более выражено. Причины, по которым результаты работы [15] представляются сомнительными, обсуждались выше (см. 2.3).

Полученные нами высокие значения температуры плазмы в непосредственной близости от поверхности катода в контрагированной привязке (рис. 7), как и ее

независимость от тока (рис. 8), находятся в хорошем согласии с результатами расчетов [12]. Действительно, если считать, что температура поверхности катода в зоне привязки достигает  $\sim 4000$  К [11], а катодное падение  $\sim 15$  В, то, согласно [12], температура плазмы непосредственно у поверхности катода  $T \sim 3$  эВ.

Из результатов предшествующих работ следует, что плотность тока в дуге атмосферного давления с термоэмиссионным катодом не зависит от тока, однако к какой форме привязки этот результат относится, не уточняется (см., например, [3]). Полученные в настоящей работе результаты показывают, что при обеих формах привязки дуги атмосферного давления к термоэмиссионному катоду плотность тока не зависит от тока до тех пор, пока ток не слишком велик для данного катода, т. е. когда выполняется условие  $D/d > 1$ .

Независимость плотности тока от тока в контрагированной катодной привязке следует из [11]. Недавно этот факт был вновь подтвержден в [16,17]. В этих работах было также обнаружено, что при высоком давлении ( $> 3$  атм) и/или большом токе реализуется еще одна форма контрагированной привязки. В этой форме привязки плотность тока падает при увеличении тока.

В настоящей работе плотность тока оценивалась таким же способом, как и в [16]. Однако она оказалась примерно в два раза выше полученной в [16] для дуг атмосферного давления. Это удивительный результат, так как в настоящей работе использовался катод с достаточно длинной ( $L \sim 10$  мм) выступающей из водоохлаждаемого держателя частью стержня, а в [16] был использован дисковый катод, впаянный в водоохлаждаемый держатель ( $L = 0$ ). В [3] приведены результаты, которые показывают, что чем короче выступающая из держателя часть катода, тем выше плотность тока. В настоящей работе эксперименты проводились только с катодами из чистого вольфрама, и, как и в [16,17], было обнаружено, что катодные эрозионные отпечатки дуги, горевшей на катоде в контрагированной форме, имеют вид кольца. Но в цитированных выше работах отпечатки кольцевой формы были получены только на катодах из торированного вольфрама.

## Выводы

1. Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты позволяют считать, что существование двух мод горения аргоновой дуги атмосферного давления с термоэмиссионным катодом из чистого вольфрама — моды с катодной привязкой в диффузной форме и моды с катодной привязкой в контрагированной форме — есть результат существования точек ветвления в решении задачи о тепловом балансе дугового катода, как это было обнаружено в работе [13] в результате теоретического анализа.

2. Напряжения горения дуги в этих модах отчетливо, хотя и не сильно, различаются. ВАХ мод пересекаются, точку пересечения следует рассматривать как точку ветвления.

3. Температура поверхности катодного стержня, ее зависимость от тока и распределение вдоль оси стержня в разных модах значительно различаются. В режиме с диффузной формой привязки температура катода вблизи его кончика ( $z = -1$  мм) существенно растет при увеличении тока, а в режиме с контрагированной формой привязки остается практически неизменной.

4. В режиме с контрагированной формой привязки температура прикатодной плазмы значительно выше, чем в режиме с диффузной формой привязки. Температура плазмы в непосредственной близости от поверхности катода (максимальная температура) в режиме с контрагированной формой привязки превышает 3 эВ.

5. Максимальная температура плазмы в прикатодной области дуги с контрагированной формой привязки не зависит от тока.

6. В обоих модах горения дуги средняя плотность тока на катоде не зависит от тока. В режиме с контрагированной формой катодной привязки средняя плотность тока приблизительно в четыре раза больше, чем в режиме с диффузной формой привязки, и составляет  $\approx 12\text{--}15$  кА/см<sup>2</sup>.

## Список литературы

- [1] Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Пустогаров А.В. и др. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. Новосибирск: Наука, 1982. 158 с.
- [2] Neumann W. The Mechanism of the Thermoemitting Arc Cathode. Berlin: Akademie-Verlag, 1987.
- [3] Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В. Термомиссионные дуговые катоды. М.: Энергоиздат, 1988. 192 с.
- [4] Паневин И.Г., Хвостюк В.И., Назаренко И.П. и др. Теория и расчет приэлектродных процессов. Низкотемпературная плазма. Новосибирск: Наука, 1992. Вып. 10. 197 с.
- [5] Зимин А.М., Назаренко И.П., Паневин И.Г., Хвостюк В.И. Математическое моделирование катодных процессов. Низкотемпературная плазма. Новосибирск: Наука, 1993. Вып. 11. 194 с.
- [6] Thoouret W., Weizel W. und Gunther P. // Zs. f. Phys. 1951. Bd. 130. S. 621–631.
- [7] Olsen H.N. // JQSRT. 1963. Vol. 3. P. 305–333.
- [8] Mesyats G.A. Cathode phenomena in a vacuum discharge: the breakdown, the spark and the arc. Moscow: Nauka, 2000. 400 p.
- [9] Juttner B. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. N 17. P. R103–R123.
- [10] Benilov M.S. and Marotta A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. Vol. 28. P. 1869–1882.
- [11] Benilov M.S. and Cunda M.D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. Vol. 35. P. 1736–1750.
- [12] Benilov M.S. and Cunda M.D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36. P. 603–614.
- [13] Benilov M.S. // Phys. Rev. E. 1998. Vol. 58. N 5. P. 6480–6494.
- [14] Redwitz M., Langenscheidt O., and Mentel J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. P. 3143–3154.
- [15] Haidar J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. Vol. 28. P. 2494–2504.
- [16] Nemchinsky V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36. P. 3007–3013.
- [17] Nemchinsky V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2004. Vol. 37. P. 1048–1051.
- [18] Pellerin S., Musiol K., Pokrzywka B., and Chapelle J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. Vol. 27. P. 522–528.
- [19] Pokrzywka B., Musiol K., Pellerin S., Pawelec E. and Chapelle J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. Vol. 29. P. 2644–2649.
- [20] Pokrzywka B., Pellerin S., Musiol K., Richard F., and Chapelle J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. Vol. 29. P. 2841–2849.
- [21] Бакуит Ф.Г. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. Т. 2. С. 80–93.
- [22] Школьник С.М. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000. Т. 2. С. 147–165.
- [23] Поль Р.В. Оптика и атомная физика. М.: Наука, 1966. 552 с.
- [24] Голубовский Ю.Б. // Вестн. ЛГУ. Физика и Химия. 1967. № 10. Вып. 2. С. 64–68.
- [25] Митрофанов Н.К., Школьник С.М. // Матер. Конф. ФНТП-2001. Петрозаводск, 2001. Т. 1. С. 194–198.
- [26] Berlinger K. and Thoma P. // JQSRT. 1976. Vol. 16. P. 605–609.
- [27] Wiese W.L. et al. Atomic transition probabilities. Vol. II. Washington D.C. US Department of Commerce. NSRDS-NBS 22. 1969.
- [28] Курсков А.А., Еришов-Павлов Е.А., Чвялева Л.В. // ЖПС. 1986. Т. XLV. № 5. С. 753–757.
- [29] Пикалов В.В., Мельникова Т.С. Томография плазмы. Новосибирск: Наука, 1995. 229 с.
- [30] Брон А.Б., Сушков Л.К. Потоки плазмы в электрической дуге выключающих аппаратов. Л.: Энергия, 1975. 211 с.
- [31] Дюжнев Г.А., Митрофанов Н.К., Школьник С.М. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 1. С. 35–40.
- [32] Бакуит Ф.Г., Дюжнев Г.А., Митрофанов Н.К., Школьник С.М. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 1. С. 41–45.