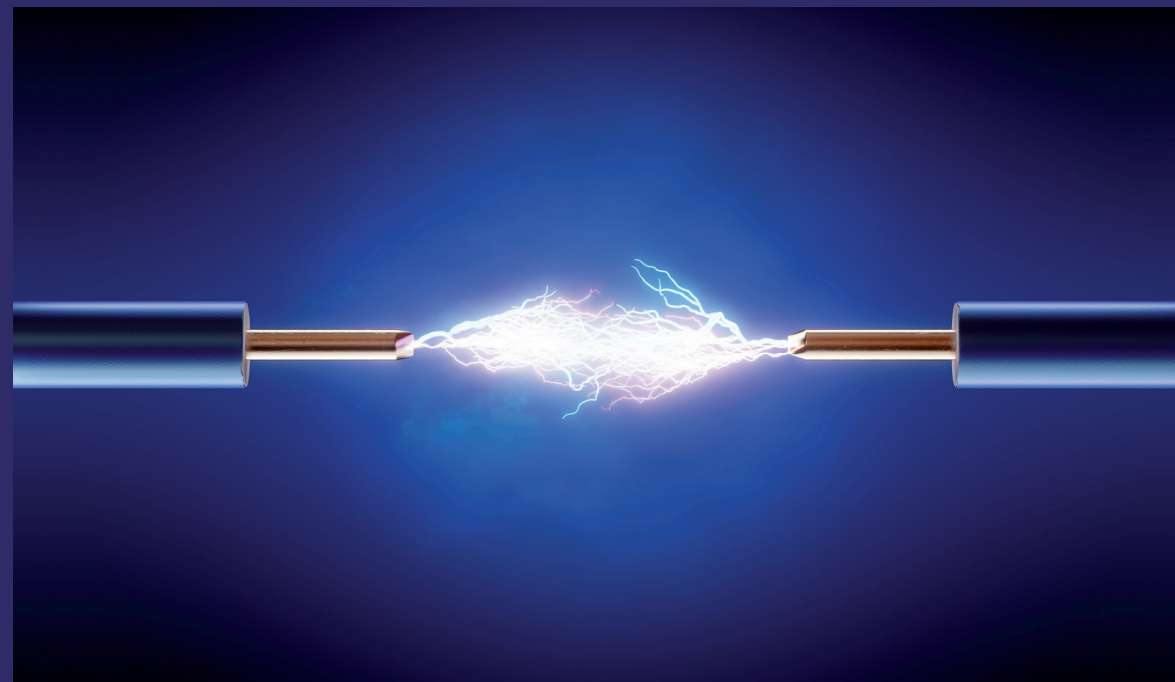
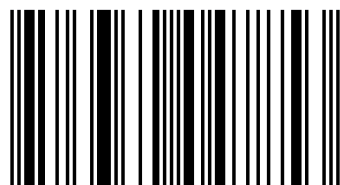


Многоканальные разряды между металлическими и электролитическими электродами, а также между электролитическими электродами представляют практический интерес как генераторы неравновесной плазмы с большим отрывом электронной температуры от температуры тяжёлых частиц. Низкотемпературная плазма с указанными свойствами имеет множество эффектов полезных с точки зрения технологических применений: очистка и полировка металлических поверхностей; одностадийность получения мелкодисперсного порошка из углеродистых и инструментальных сталей при атмосферном давлении; синтез органических соединений в растворах электролитов и др. Область применения разряда между металлическими и электролитическими электродами расширяется.

Разряд - источник плазмы



2001 году закончил Камский политехнический институт в г. Набережные Челны по специальности "Автомобили и автомобильное хозяйство". 2006 году защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидат технических наук. Ученое звание доцента получил в 2010 году.



978-3-330-04785-3

Гумеров, Ахметсагиров, Мухаметдинов

Айрат Завдатович Гумеров
Рамиль Ильясович Ахметсагиров
Эдуард Мухаматзакиевич Мухаметдинов

Многоканальный электрический разряд - источник плазмы

LAP LAMBERT
Academic Publishing

**Айрат Завдатович Гумеров
Рамиль Ильясович Ахметсагиров
Эдуард Мухаматзакиевич Мухаметдинов**

Многоканальный электрический разряд - источник плазмы

**Айрат Завдатович Гумеров
Рамиль Ильясович Ахметсагиров
Эдуард Мухаматзакиевич Мухаметдинов**

**Многоканальный электрический
разряд - источник плазмы**

LAP LAMBERT Academic Publishing RU

Impressum / Выходные данные

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u.s.w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Библиографическая информация, изданная Немецкой Национальной Библиотекой. Немецкая Национальная Библиотека включает данную публикацию в Немецкий Книжный Каталог; с подробными библиографическими данными можно ознакомиться в Интернете по адресу <http://dnb.d-nb.de>.

Любые названия марок и брендов, упомянутые в этой книге, принадлежат торговой марке, бренду или запатентованы и являются брендами соответствующих правообладателей. Использование названий брендов, названий товаров, торговых марок, описаний товаров, общих имён, и т.д. даже без точного упоминания в этой работе не является основанием того, что данные названия можно считать незарегистрированными под каким-либо брендом и не защищены законом о брендах и их можно использовать всем без ограничений.

Coverbild / Изображение на обложке предоставлено: www.ingimage.com

Verlag / Издатель:

LAP LAMBERT Academic Publishing

ist ein Imprint der / является торговой маркой

OmniScriptum GmbH & Co. KG

Bahnhofstraße 28, 66111 Saarbrücken, Deutschland / Германия

Email / электронная почта: info@omniscryptum.com

Herstellung: siehe letzte Seite /

Напечатано: см. последнюю страницу

ISBN: 978-3-330-04785-3

Zugl. / Утверд.: Казань, КГТУ им. А.Н.Тупорлева, 2006

Copyright © Айрат Завдатович Гумеров,

Рамиль Ильясович Ахметсагиров,

Эдуард Мухаматзакиевич Мухаметдинов

Copyright © 2017 OmniScriptum GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten. / Все права защищены. Saarbrücken 2017

ГУМЕРОВ АЙРАТ ЗАВДАТОВИЧ

ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУЙНОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО
РАЗРЯДА МЕЖДУ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ АНОДОМ
(ПРОТОЧНЫЙ И НЕПРОТОЧНЫЙ) И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ
КАТОДОМ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Содержание

Принятые обозначения и сокращения	5
Введение	6
Глава 1 Обзор исследований электрического разряда в газе между электролитическим и металлическим электродами	9
1.1 Особенности электрического разряда между металлическими электродами	9
1.2 Электрические разряды с электролитическим катодом	15
1.3 Электрические разряды с электролитическим анодом	27
1.4 Электрические разряды между электролитическими электродами	27
1.5 Использование электрических разрядов с электролитическими электродами в технологии	30
Глава 2 Экспериментальная установка для исследования струйного многоканального разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом и методика измерений	40
2.1 Структурная схема экспериментальной установки	40
2.2 Система электрического питания высоковольтной экспериментальной установки	43
2.3 Система электрического питания низковольтной экспериментальной установки	45
2.4 Электролитическая ванна	48
2.5 Системы охлаждения и подачи электролита	50
2.6 Измерительная аппаратура. Методика проведения	

экспериментов и оценка точности измерений	52
Глава 3 Результаты экспериментальных исследований струйного	
многоканального разряда между электролитическим	
анодом и металлическим катодом	55
3.1 Зажигание разряда между электролитическим анодом и	
металлическим катодом	55
3.2 Падение напряжения в электролите и вольтамперные	
характеристики разряда между электролитическим	
анодом и металлическим катодом	59
3.3 Структуры струйного многоканального разряда	68
3.4 Особенности границы раздела между плазмой и	
проточным электролитическим анодом	79
3.5 Распределения потенциала и напряженности	
электрического поля	83
3.6 Плотности тока на металлическом катоде и	
электролитическом аноде	85
3.7 Обобщенные вольтамперные характеристики струйного	
многоканального разряда между электролитическим	
анодом и металлическим катодом	88
Глава 4 Устройства для получения струйного многоканального	
разряда с проточным и непроточным электролитическим	
анодом и методики обработки поверхности изделий	96
4.1 Устройство для получения струйного многоканального	
разряда с проточным электролитическим анодом	96
4.2 Методика получения оксидного порошка железа (Fe_3O_4) ..	102
4.3 Методика упрочнения поверхности металлических	

изделий	108
4.4 Очистка поверхности металлических тел из сплавов цветных металлов	110
Выводы	115
Список использованной литературы	117

Принятые обозначения и сокращения

- I – сила тока разряда;
 U – напряжение разряда;
 $U_{\text{э}}$ – падение напряжения в электролите;
 $U_{\text{пр}}$ – напряжение зажигания разряда;
 $j_{\text{эа}}$ – плотность тока на электролитическом аноде;
 $j_{\text{мк}}$ – плотность тока на металлическом катоде;
 $d_{\text{к}}$ – диаметр металлического катода;
 $d_{\text{кт}}$ – диаметр контрагированной точки на поверхности металлического катода;
 $S_{\text{а}}$ – площадь анодного пятна;
 $S_{\text{к}}$ – площадь катодного пятна;
 l – межэлектродное расстояние;
 $l_{\text{о}}$ – действительное межэлектродное расстояние;
 $c_{\text{э}}$ – концентрация электролита;
 $H_{\text{э}}$ – глубина погружения токоподводящей пластины в электролит;
 T – температура электролита;
 t – время обработки детали, изделия, заготовки;
 L – высота плазменной струи;
 HV_{50} – микротвердость по Виккерсу.

Сокращения

- ВАХ – вольтамперная характеристика;
 МР – многоканальный разряд;
 ПЭА – проточный электролитический анод;
 ПС – плазменный столб.

Введение

Электрические разряды в газе между металлическими электродами изучены достаточно хорошо. В последние годы большое внимание уделяется исследованию газовых разрядов между металлическим и электролитическим, а также между электролитическими электродами. Интерес к таким источникам низкотемпературной плазмы объясняется тем, что они используются в технологических целях и обладают рядом достоинств. Режимы горения разряда можно легко управлять изменением концентрации и состава электролита. Обработка изделий с помощью плазмы разряда между металлическим и электролитическим электродами возможна, когда другие методы более трудоемки, более дороги или их невозможно применять по другим причинам (например, экологическим). Благоприятное сочетание высокой температуры нагрева и элементов электролита в возбужденном и ионизованном состояниях позволяет осуществлять нагрев металла и сплавов в электролите, электротермическую обработку материалов. Многоканальные разряды с электролитическими электродами может использоваться в плазменной технологии нанесения теплозащитных, антикоррозийных, антифрикционных, и диэлектрических покрытий. Перспективность использования генераторов неравновесной плазмы с электролитическими электродами в этих целях подтверждается результатами многих экспериментальных исследований [1 – 5 и др.]

Многоканальные разряды между металлическими и электролитическими электродами, а также между электролитическими электродами представляют практический интерес как генераторы неравновесной плазмы с большим отрывом электронной температуры от температуры тяжёлых частиц. Низкотемпературная плазма с указанными свойствами имеет множество эффектов полезных с точки зрения технологических применений: очистка и полировка металлических

поверхностей; одностадийность получения мелкодисперсного порошка из углеродистых и инструментальных сталей при атмосферном давлении; синтез органических соединений в растворах электролитов и др. Область применения разряда между металлическими и электролитическими электродами расширяется. В последние годы определились новые перспективные направления применения многоканального разряда между металлическим и электролитическим электродами в плазмохимии, электронике и машиностроении.

Многоканальные разряды между металлическими и электролитическими электродами, являются полезными не только с точки зрения технологических применений, но и имеют важное значение для изучения физических явлений. Такие разряды между металлическим катодом и электролитическим анодом отличаются особой устойчивостью. Они имеют стабильную диффузную структуру даже при атмосферном давлении. Несмотря на это, не исчерпаны различные способы и варианты получения источников низкотемпературной плазмы многоканальных разрядов с электролитическими электродами. Всё это задерживает разработку плазменных установок и новых технологических процессов с использованием многоканальных разрядов с нетрадиционными электродами и их внедрение в производство.

Содержание работы по главам

В первой главе приведён анализ известных экспериментальных исследований разрядов горящих между электролитическим и металлическим электродами, а также обсуждаются области их некоторых практических применений, сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе приведены описания экспериментальной установки. Представлена функциональная схема низковольтного и высоковольтного экспериментального комплекса для исследования многоканального разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом. Приведены

описания экспериментальной аппаратуры и методики измерений параметров разряда с электролитными электродами.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований струйного многоканального разряда между металлическим катодом (охлаждаемый и неохлаждаемый) и электролитическим анодом (проточный и не проточный) при атмосферном давлении: зажигание разряда, падение напряжения в электролитическом аноде, вольтамперные характеристики. Изучены структуры струйного многоканального разряда, особенности границы раздела между плазмой и проточным электролитическим анодом. Определены распределение потенциала и напряженность электрического поля, плотности тока на металлическом катоде и электролитическом аноде. Обобщены вольтамперные характеристики разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом при атмосферном давлении в критериальной форме.

В четвёртой главе приведены устройства для получения струйного многоканального разряда между металлическим катодом и проточным электролитическим анодом. Разработаны методики упрочнения поверхности металлических изделий, получения дисперсного порошка оксида железа, очистки поверхности изделий из сплавов цветных металлов при помощи данного устройства.

Глава 1

Обзор исследований электрического разряда в газе между электролитическим и металлическим электродами

1.1 Особенности электрического разряда между металлическими электродами

Среди большого разнообразия видов газового разряда – тлеющий разряд отличается легкостью осуществления сильно неравновесного состояния плазмы. При обычных условиях эмиссия электронов с катода, даже в присутствии плазмы возле него, чрезвычайно мала. Только при прикладывании к разрядному промежутку, заполненному газом, напряжения, большего пробойного, устанавливается режим самостоятельного разряда. Он позволяет поддерживать в объеме низкотемпературную плазму, проводящую электрический ток.

Эта низкотемпературная плазма представляет собой объект, интересный для целого ряда приложений, для которых наиболее важно, что средняя энергия электронов, дрейфующих в электрическом поле, как правило, на порядок и более превышает тепловую энергию. Данное обстоятельство определяет высокую эффективность газоразрядных источников света с тлеющим разрядом. Получение неравновесного состояния – основное условие для достижения усиления света. Возможность ускорить химические реакции, оставляя газ холодным, обусловила широкое использование тлеющего разряда в плазмохимии. В настоящее время большое внимание уделяется разработке новых эффективных методов нанесения покрытий с заданными свойствами на поверхности различных материалов. Одним из перспективных методов является метод получения плазмы в газовом промежутке между обрабатываемым изделием из проводящего материала и электролитическим электродом.

Впервые разряд между электролитом и твердым анодом был получен Планта [6]. В его опытах анодом служил заостренный уголь, катодом – раствор хлористого натрия. Он предполагал связь наблюдаемого явления с разрядами типа шаровой молнии. Разряд гальванического тока через тонкий слой электролита описывается в [7]. В [8] описаны условия, при которых наблюдается указанное явление в процессе нагрева металлов в электролите. В [9, 10] изучалось влияние состава электролита на шаровой слой в разряде.

Эксперименты с разрядом между металлическим катодом и поверхностью раствора-анода из азотно-серебряной соли при различных давлениях проводились Губкиным [11]. В [12] приведено описание визуальных наблюдений разрядов в воздухе при атмосферном давлении, возникающих между металлическим острием и поверхностью электролита. В [12] полагают, что дуговой разряд возможен только при металлическом катоде. В этом случае катод может быть нагрет до высокой температуры. Когда металл служил анодом при напряжении, превышающем 500 В, наблюдалось подобие тлеющего разряда. Эксперименты со слабыми растворами кислоты и «горячими» и «холодными» электродами, находящимися на некотором расстоянии (1-10 мм) от поверхности электролита, показали, что существенной разницы в процессе между «горячим» и «холодным» анодом не обнаруживается [13]. В работе [14] показано, что на границе раздела раствор-газ наблюдается интенсивное образование гидроокисла, который в реакции $\text{OH}^- + \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$ образует в газовой среде свободные молекулы воды. Они, как диэлектрики с большой диэлектрической постоянной, притягиваются к аноду в область максимальной напряженности поля и поляризуются на нем, постепенно все больше и больше блокируя его. При достаточной концентрации гидроокисла в газовой среде анод может быть полностью экранирован слоем поляризованных молекул воды, что способствует образованию вокруг анода промежуточного раствора. В этом случае электрические микроразряды происходят между жидкими слоями.

Образование промежуточного раствора может происходить не в любом электролите, а только в концентрированных растворах солей щелочных металлов и щелочах, т.е. тогда, когда концентрация ионов OH^- значительна. Поэтому можно считать, что образование промежуточного раствора обуславливается окислительным процессом ионов OH^- на границе раздела газ-электролит и связано с образованием вокруг анода тонкого адсорбированного слоя из поляризованных молекул воды. Адсорбированный слой молекул воды вокруг анода образуется за счет свободных молекул, находящихся в газовой среде с высокой напряженностью поля (между раствором и анодом). Качественный химический анализ собранных с анода растворов показал, что они представляют собой не чистую воду, а раствор с определенной концентрацией различных ионов. Вокруг анода не может образоваться капля чистой воды в связи с тем, что в ней и основном растворе происходят микроразряды, которые сопровождаются выделением тепла, нагревающего каплю. Температура промежуточных растворов во время образования равна 343°K . Это вызывает определенную деполяризацию молекул воды, адсорбированных вокруг анода, и обеспечивает протекание электрохимических реакций между анодом и промежуточным раствором, что подтверждается наличием ионов анода в растворе. Кроме того, электрические разряды между основным и промежуточным растворами переносят некоторую долю основного раствора в промежуточный слой за счет механического катодного распыления электролита [15]. Разряд имел вид слабо светящегося столба, оканчивающегося на поверхности электролита сиреневым пятном. Эту форму разряда автор называет «тлеющей дугой». При изменении полярности обнаружили, что разряд зажигается при меньших напряжениях. От полярности металла зависело количество выделившихся веществ.

В [16] приведено сравнение напряжения зажигания постоянного тока в атмосферном воздухе для различных электролитических катодов и

металлических анодов с обобщённой кривой Пашена (кривая 1), построенной в соответствии с [17]. При малых межэлектродных расстояниях экспериментальные данные удовлетворительно описываются обобщённым законом Пашена. При больших межэлектродных расстояниях наблюдается отклонение данных от кривой Пашена. В [18] также представлено сравнение экспериментальных данных с обобщённой кривой Пашена. При пониженных давлениях и малых межэлектродных расстояниях для напряжения зажигания НЧ разряда выполняется закон Пашена, а при больших межэлектродных расстояниях наблюдается значительное отклонение от кривой 1. Напряжение зажигания ВЧЕ разряда существенно снижается от кривой Пашена.

В работе [19] отмечен различный характер свечения и химических реакций в зависимости от полярности электрода из раствора йодистого калия. Эти явления объяснили механическим действием летящих от катода и врывающихся в электролит электронов. В работе [20] описаны результаты качественных спектрографических исследований свечений на аноде, возникающих при контактном электролизе тлеющим разрядом. Для снятия спектров свечения была использована электролитическая ячейка, которая является источником света. Дно ячейки изготовлено из тонкой прозрачной пленки. Над пленкой находится слой электролита толщиной 10 мм. Свечение на аноде всегда окружено раствором, поэтому был снят только спектр видимой части излучения.

Обширные исследования химических реакций в зоне разряда между металлическим и электролитическим электродами проведены в [21, 22]. В результате исследований отмечено влияние концентрации электролита и полярности электродов. Когда металл служил анодом, содержание окисленных продуктов во много раз превосходило то количество, которое получалось, когда металл был катодом.

В работе [23] отмечается, что одной из причин снижения температуры анода является интенсивное испарение электролита и связанное с этим

значительное поглощение тепла. Такие исследования проводились и в [24, 25], где получены ВАХ для стационарного разряда между никелевым диском и растворами KCl, NaCl, H₂SO₄, CH₃COOH различных концентраций при различных температурах и разрядных промежутках. Автор работы [26, 27] считает возможным проникновение газовых ионов внутрь электролита и образование там новых молекул. Разряд между металлом-анодом и электролитом-катодом назван «присосавшейся искрой».

Цель работы [28] состоит в выяснении механизма электронной эмиссии электролитического катода. Излагаются результаты экспериментального исследования спектра шумов разряда при использовании в качестве катода растворов Na₂SO₄ различной концентрации. При увеличении концентрации раствора обнаружены возрастание шума и возникновение неустойчивости разряда. Исследование спектра светового излучения слоя электролита, являющейся катодом, показало наличие интенсивных линий молекул водорода. Все это свидетельствует о том, что внутри катода возникают плазменные пузырьки с температурой около 5000 К. Появление свободных электронов внутри электролита связано с фотоионизацией молекул воды. При достаточно высокой плотности тока электрическое поле, проникающее в электролит, вытягивает электроны из микропузырьков плазмы, находящихся внутри электролита. В [29] изучено поведение метана в газовом разряде с электролитическим электродом. Явление перебрасывания электролита на металлический анод объясняется закономерностями переноса вещества в дуговом разряде, установленными авторами работы [30]. При отрицательной полярности пластинчатого электрода явление переноса электролита не наблюдалось. В данном случае была большая эрозия катода. На этом основании сделано заключение, что между металлическим анодом, находящимся в газовой фазе, и электролитическим катодом имеет место дуговая форма разряда. Причину незначительного нагрева анода автор видел в специфичности влияния электролитического катода. Однако при этом

неизвестно, влияло ли охлаждающее действие перебрасываемого на анод электролита или сам тепловой эффект разряда меньше, чем при разряде между двумя металлическими электродами.

Разряды с водными растворами, используемыми в качестве катода, изучены в [28]. Отмечено, что процессы в разрядах с водными капельками или частичками льда, являющимися катодами, имеют существенное значение для понимания механизма образования молнии в грозовых тучах. В работе [31] показано, что с увеличением логарифма концентрации водного раствора LiCl , который используется как катод, линейно уменьшается напряжение пробоя очищенного бензола. При этом предполагается, что имеет место ионная эмиссия из электролита в жидкий диэлектрик и плотность эмиссионного тока пропорциональна концентрации ионов в катоде.

К настоящему времени опубликовано много работ, посвященных изучению электрического разряда с металлическим катодом, в качестве которого используется ртуть. Детальные исследования процессов, происходящих на поверхности катода, были проведены И.Г. Кесаевым [32]. Данный разряд представляет собой дугу низкого давления с холодным катодом. Условия опыта приобретают сравнительно простой характер, так как разряд происходит в парах металла катода без участия посторонней среды. По своей структуре дуга низкого давления представляет собой соединение двух областей, резко отличающихся по внешнему виду и по роли, которую они выполняют. Первая область тесно прижата к катоду и имеет вид ярко светящегося пятна, совершающего беспорядочное перемещение по катоду (катодное пятно). Другая область занимает большую часть пространства между катодом и анодом, имеет вид не очень яркого диффузного свечения, распространяющегося на все сечение трубки с разреженным газом или парами металла. Эта часть разряда - положительный столб. Катодное пятно имеет способность распадаться на ряд автономных пятен, количество которых увеличивается с ростом тока.

1.2 Электрические разряды с электролитическим катодом

Опыты, проведенные авторами [6, 7], а затем и другими исследователями [9-16], представляли собой, в основном, феноменологическое описание разряда. Одной из первых попыток объяснения физической природы газового разряда с электролитическим катодом можно считать работу [33].

Электролитический катод влияет как на развитие разряда, так и на характеристики стационарного разряда. Рассмотрим сначала особенности развития разряда. Электрический пробой в газе представляет сложный, быстропотекающий процесс. Исследованию пробоя газов при нормальной температуре между твердыми электродами посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ [34], но до сих пор отсутствует полная теория, которая могла бы объяснить все известные экспериментальные факты и позволяла бы проводить расчеты в широком диапазоне параметров с удовлетворительной для практики точностью. Вопросы зажигания разряда между нетрадиционными электродами до последнего времени оставались практически не изученными.

Особенности зажигания разряда между металлическим и электролитическими электродами обусловлены действием электрического поля на электролит, влиянием поверхностного натяжения и силы тяжести электролита. В работе [35] эти особенности исследовались экспериментально на установке, показанной на рисунке 1.1. При повышении приложенного напряжения между электролитом и твердым электродом возникает искровой пробой. На рисунке 1.2 приведены зависимости напряжения пробоя от межэлектродного расстояния.

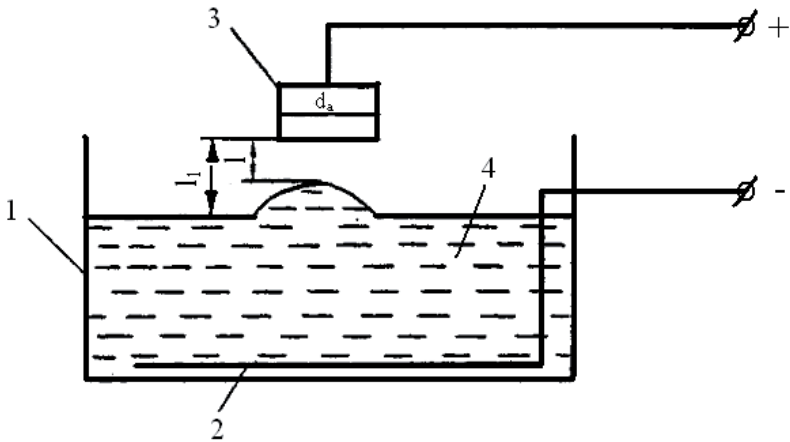


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема устройства [25]

1 – электролитическая ванна; 2 – металлическая пластинка; 3 – твердый электрод; 4 – электролит (0,5%-й раствор NaCl)

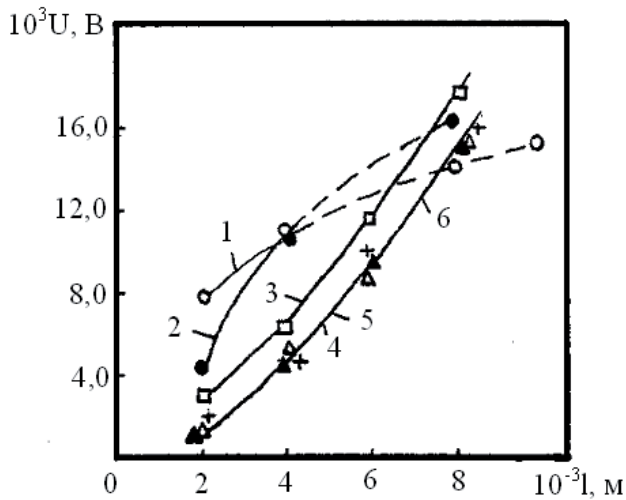


Рисунок 1.2 – Зависимость напряжения пробоя от межэлектродного расстояния при различных диаметрах металлического анода [35]

Экспериментальные точки 1, 2, 3 и 4 получены соответственно при диаметрах анода $d_a = 2 \cdot 10^{-3}$, $4 \cdot 10^{-3}$, $1,2 \cdot 10^{-2}$ и $5 \cdot 10^{-2}$ м. Точки 5 соответствуют случаю, когда электролит служит анодом, а точки 6 – значениям напряжения пробоя из [36]. Из графиков видно, что при больших d_a в указанном диапазоне изменения l напряжение пробоя не зависит от того, является ли электролит катодом и анодом. Это объясняют тем, что в обоих случаях процессом, определяющим пробой, является фотоионизация газа, а γ -процессы на катоде не играют существенной роли. Этот результат согласуется с выводами из [37] о том, что искровой пробой происходит при полном отсутствии каких бы то ни было γ -процессов на катоде. Штриховые линии на рисунке 1.2 соответствуют напряжению пробоя при появлении коронного разряда.

Сравнение кривых, изображенных на рисунке 1.2, с известными данными о напряжении пробоя воздуха между двумя металлическими электродами типа Роговского показывает их значительное расхождение: кривые на рисунке 1.2 располагаются ниже зависимости $U=f(l)$ для случая двух металлических электродов. Одна из причин уменьшения напряжения пробоя может быть связана с неустойчивостью поверхности электролита в сильном электрическом поле, описанной в работе [36]. В диапазоне $\frac{Pl}{T} = 0,0025 \div 0,25$ Па·м·К⁻¹ при малых межэлектродных расстояниях экспериментальные данные удовлетворительно описываются обобщенным законом Пашена. При больших межэлектродных расстояниях наблюдается отклонение данных от кривой Пашена.

В [16] предполагается, что с увеличением плотности тока образуется переходная область, которая содержит плазменные пузырьки внутри электролита и сильное электрическое поле пространственного заряда, проникающее внутрь электролита. Допускается, что сильное электрическое поле извлекает электроны из этих микроплазменных пузырьков. Важная

информация получена при изучении зависимости шума, генерируемого в разряде, от состава электролита, давления и величины тока. При $P > 9975$ Па частота шума увеличивается с ростом давления. Шум возникает вследствие микропробоев внутри электролитического катода, сопровождаемых излучением света. Форма и распределение интенсивности света зависят от прикатодного поля пространственного заряда, которое на поверхности электролита имеет порядок 10^8 В/м [38]. Плотность тока на катоде при атмосферном давлении меняется от $3 \cdot 10^4$ А/м² до $4 \cdot 10^6$ А/м² при токах соответственно 0,1 А и 300 А. В [16] обсуждается механизм электронной эмиссии из электролитических катодов. Исследования разрядов с водными растворами различных солей в качестве катода показали, что при низких и средних давлениях разряды этого типа ведут себя подобно тлеющему разряду [39], в которых самоподдерживание разряда обеспечивается в основном фотоэмиссией электронов. С увеличением амплитуды тока происходит довольно большое увеличение плотности тока на катоде. Зондовые измерения не обнаружили резкого уменьшения катодного падения потенциала, характерного для дуговых разрядов. Поэтому предполагается, что реализуется режим интенсивного тлеющего разряда даже при токах выше 100 А.

Современное состояние изучения пробоя газов изложено в [34]. В соответствии с [34] γ -процессы играют роль при $P \cdot l < 200$ Тор·см и применима Таунсендовская теория, а при $P \cdot l > 4000$ Тор·см пробой определяется стримерным механизмом. В промежуточном диапазоне, к которому относятся описанные опыты, ионизация может определяться и резонансным излучением с последующей ассоциативной ионизацией [40]. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в условиях работы [35] развитие электронных лавин поддерживается фотоионизацией, создающей вторичные электроны. Детальные теоретические расчеты развития лавины в этом случае требуют уточнения сечений фотоионизации

резонансного излучения и совместного решения уравнений переноса электронов и возбужденных молекул.

В работе [41] впервые приведены результаты исследований низковольтного разряда в электролите, проведенных еще в конце прошлого века [11]. В [42] изучен разряд, ток которого протекает через парогазовый пузырек. Авторы этой работы предполагают, что пузырек образуется как за счет Джоулева тепловыделения, так и в результате электролиза. По мнению некоторых исследователей [43] имеет место пробой «слабых» мест диэлектрического слоя на аноде. В [44] изложены результаты исследований поверхностных разрядов в электролите, которые показывают, что при изменении синусоидального напряжения между электродами от 0 до 400 В разряд проходит последовательно четыре стадии. При малых концентрациях $C < 70\%$ эти стадии чередуются с определенной цикличностью. Подобное чередование различных стадий вполне обоснованно связано с процессами образования парогазовой прослойки между электролитом и поверхностью анода и ее разрушением. При концентрациях $C > 70\%$ характер чередования различных стадий изменяется. Анализ осциллограмм свидетельствует об устойчивости парогазового слоя между электролитом и металлическим анодом. Показано, что все прикладываемое на электролитическую ячейку напряжение падает на прианодном участке. Аналогичные результаты были получены в работе [43]. В [45-47] исследованы физико-химические процессы в водных растворах, инициируемые анодными микроразрядами. Установлен тлеющий характер газовых микроразрядов на аноде, погруженном в электролит. Показано образование в приразрядном объеме раствора валентно-несвязанных электронов в количестве, достаточном для поддержания разряда, и обоснован механизм эмиссии электронов из электролитического катода в газовый разряд. В работе [48, 49] исследуется механизм плазменно-электролитного нагрева металлических электродов. Определены динамические вольтамперные характеристики низковольтного

электрического разряда и баланс тепла, выделявшегося в электрическом разряде, в электролите и в электроде в стадии стационарного нагрева. С использованием измеренных значений, температур электрода и электролита рассчитаны доля мощности разряда, идущая на нагрев электролита, а также потери энергии на излучение электродами и за счет теплопроводности металла.

Электрические, тепловые и спектральные характеристики разряда с электролитическим электродом достаточно подробно исследованы в [48, 50-68]. Феноменологическое описание разряда с электролитическим катодом, данное автором [64], показывает, что разряд между электролитическим катодом и твердотельным анодом состоит из большого количества нитевидных каналов. По мнению автора [64], этот разряд можно отнести к разновидности многоканального разряда.

На рисунке 1.3 приведены ВАХ электролитической ячейки при разных поляриностях активного электрода и для разных электролитов. Зондовые измерения потенциала в устойчивых режимах горения разряда показали, что уменьшение тока сопровождается резким перераспределением потенциала в межэлектродном зазоре. В этих областях падение напряжения на электролите соответствует падению при нормальном электролизе с заданным током. Разность напряжений для двух ветвей ВАХ в пределах погрешности измерений равна падению напряжения на разряде в парогазовом слое. В разряде вблизи катода увеличение напряжения на ячейке приводит к снижению тока до тех пор, пока не устанавливается стабильная газопаровая оболочка. В случае электролита Na_2CO_3 (рисунок 1.3,а) ее установление практически совпадает с быстрым нагревом электрода. Этому моменту соответствует излом ВАХ разряда и в дальнейшем снижение напряжения сопровождается уменьшением силы тока.

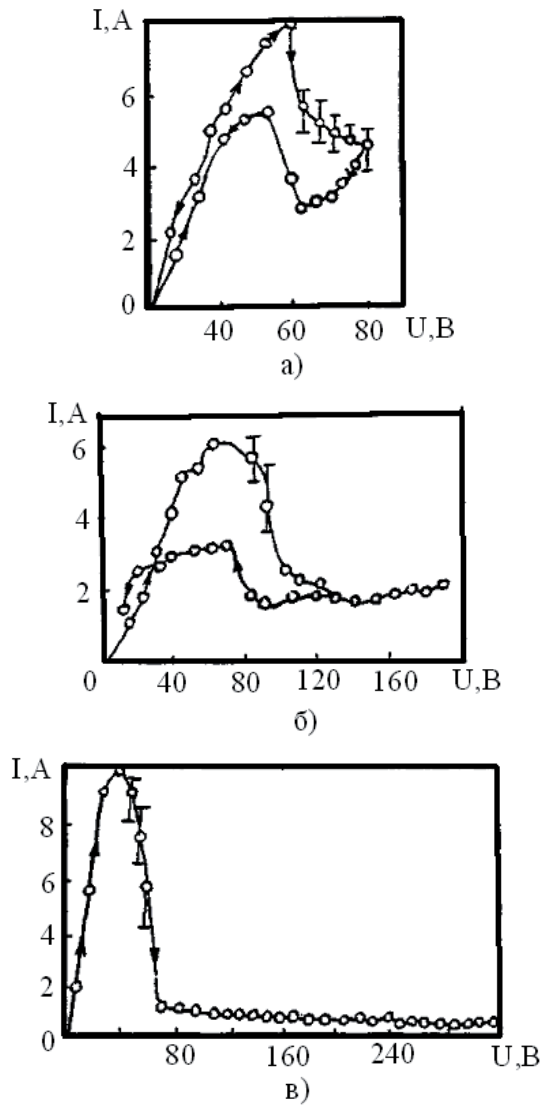


Рисунок 1.3 – Вольтамперные характеристики электролитической ячейки при активных катоде (а) и аноде (б, в). Диаметр электродов 0,5 см, глубина погружения в электролите 0,6 см [39]

Аналогичные возрастающие ВАХ стационарного разряда вблизи катода наблюдались и в других электролитах (водных растворах Na_2SO_4 , NaSO_3 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, Na_2CO_3 , NH_4Cl , KOH). Такие же ВАХ анодной области наблюдались и в [57].

Для измерения потенциала плазмы в [54-56] использован цилиндрический зонд из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм. На рисунке 1.4 приведено распределение потенциала между электролитическим катодом (техническая вода) и медным анодом. Как видно, потенциал растет линейно от катода к аноду. Линейная экстраполяция распределения потенциала до поверхности анода и катода позволяет определить значения падений напряжения на катоде U_k и аноде U_a [48]. Установлено, что падения напряжения на электродах, определенные по вольтамперной характеристике при опущенном до соприкосновения с электролитом аноде, с достаточно большой точностью совпадают с результатами, полученными методом экстраполяции распределения потенциала. Следовательно, оба метода одинаково приемлемы при изучении разрядов.

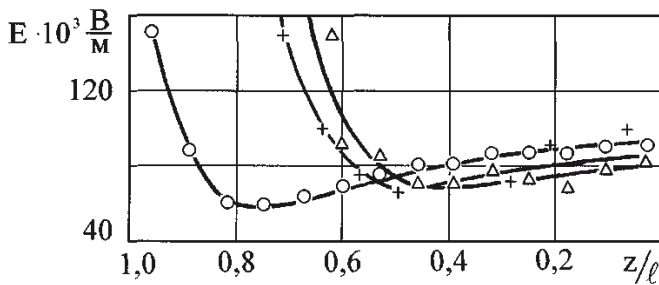


Рисунок 1.4 – Распределение напряженности электрического поля вдоль разряда: $l=3,8$ мм; $I(o)=46 \cdot 10^{-3}$ А; $I(+)=70 \cdot 10^{-3}$ А; $I(\Delta)=46 \cdot 10^{-3}$ А. Катод – техническая вода, анод – электрод Роговского, медь М1 [56]

Распределение напряжённости электрического поля в [64] определялось по экспериментально найденным распределениям потенциала с использованием формулы

$$\overline{E} = -\text{grad}\varphi \quad (1.1)$$

Характерные распределения напряжённости электрического поля в разряде при атмосферном давлении [56] представлены на рисунке 1.4. Из рисунка видно, что поле атмосферного разряда подобно полю разряда при низком давлении [69], т.е. является существенно неоднородным. Напряжённость поля с удалением от катода сначала резко уменьшается и достигает минимума, затем медленно возрастает в направлении анода. Таким образом, и при атмосферном давлении, и при низком давлении наблюдается минимум в распределении E вдоль осевой линии от катода к аноду. При низком давлении минимум является более ярко выраженным (рисунок 1.5), чем при атмосферном давлении (рисунок 1.4).

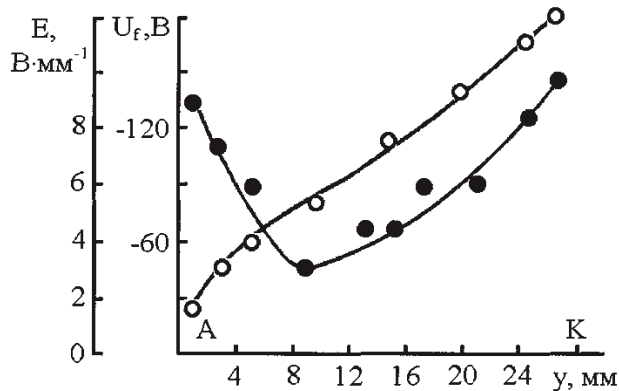


Рисунок 1.5 Распределение потенциала и напряжённости электрического поля на оси разряда между электролитическим катодом

(техническая вода) и металлическим анодом (Ст.3 $d = 4$ мм) при $P=1,33$ кПа и $I=100$ мА для $l=30$ мм [69]

В [54, 56-57, 70] экспериментально исследован высоковольтный объемный разряд в воздухе при атмосферном давлении между электролитом и медным анодом в диапазоне тока $25 \div 500$ мА и межэлектродного расстояния $1 \div 100$ мм. Определены ВАХ разряда, распределения потенциала и напряженности электрического поля, зависимости катодного и анодного падений потенциала от тока, потери теплоты через катод и анод и теплота, выносимое струей плазмы. Проанализировано влияние различных физических процессов на энергетический баланс прикатодной области. В описываемых экспериментах разряд имеет форму усеченного конуса. Нижнее большее основание служило катодным пятном, а верхнее – анодным. В результате воздействия разряда электролит испаряется и его пары через катодное пятно поступают в положительный столб. Реактивная сила паров несколько деформирует катодное пятно, поэтому поверхность электролита не является плоской, ее выпуклость обращена в глубину электролита (центр кривизны поверхности электролита в области катодного пятна расположен выше поверхности электролита). Как показали эксперименты, диаметр катодного пятна увеличивается с ростом тока. При повышении тока от 35 до 160 мА диаметр пятна в случае технической воды увеличивается от 2,5 до 4,7 мм, а в случае 0,5%-ного раствора NaCl находится в диапазоне $2 \div 3,5$ мм. Непосредственно у поверхности катода имеется ярко светящийся слой с резкими границами. Его цвет фиолетовый и в исследованном диапазоне параметров не зависит от концентрации соли и величины тока. В направлении к аноду, положительный столб сужается. Когда катодом служила техническая вода, свечение положительного столба было фиолетовым и в направлении оси почти не менялось. В случае катода из раствора соли NaCl нижняя часть столба имеет желтый цвет, характерный

для паров натрия. По мере удаления от катода появляется цвет, который затем переходит в фиолетовый. В прианодной области имеет место зеленое свечение, что объясняется проникновением паров меди в положительный столб из анодного пятна. Анодное пятно имеет ярко-красный цвет, его диаметр увеличивается с ростом тока.

Описанные выше особенности разряда согласуются также с результатами исследования распределения спектра излучения [57].

Следует отметить, что в экспериментах не измерен расход пара, который образуется под воздействием разряда. Следовательно, не учтено тепло, затрачиваемое на парообразование. Поэтому действительные значения Q_k могут отличаться от приведенных.

Для обобщения вольтамперных и тепловых характеристик дугового разряда широко используются методы теории подобия и размерности. Первая попытка применения этих методов к разряду с электролитическим катодом предпринята в [57]. В этой работе ВАХ разряда обобщена в виде зависимости

$$\frac{U \cdot I^{0,5}}{I} = f\left(\frac{I}{I^{0,75}}\right) \quad (1.2)$$

Результаты такой обработки экспериментальных данных представлены на рисунке 1.6. Однако в указанной работе не учитывалось влияние давления на характеристики разряда.

Максимальное среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных напряжения разряда от полученных по критериальному уравнению составляет $10 \div 20$ %.

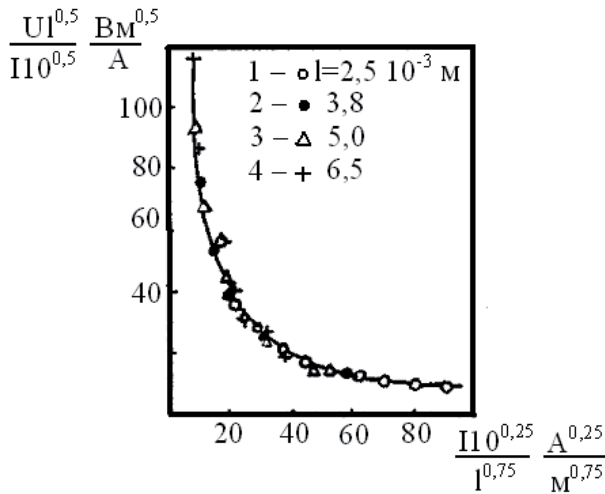


Рисунок 1.5 – Обобщенная вольтамперная характеристика разряда

1 – $l=2,5$ мм; 2 – 3,8 мм; 3 – 5,0 мм; 4 – 6,5 мм [57]

Использование электролитов в качестве катода, как утверждают авторы, позволяет получить устойчивый самостоятельный объемный разряд при атмосферном давлении в широком диапазоне изменения величины тока. Методом экстраполяции распределения потенциала до поверхностей анода и катода находились значения катодного и анодного падений потенциала. Катодное падение потенциала находится в пределах $350 \div 410$ В, а анодное падение потенциала составляет $160 \div 200$ В [71]. Такое большое катодное падение потенциала характерно для тлеющего разряда [72].

1.3 Электрические разряды с электролитическим анодом

Некоторые результаты исследования разряда между двумя электролитическими электродами, а также разряда в системе струя электролита – металлический электрод представлены в работах [59, 73, 74-78]. В [76] был исследован разряд постоянного тока между струёй электролита и твёрдым электродом. При атмосферном давлении он горит в следующих диапазонах изменения параметров: тока от 0,2 до 6 А, длины струи от 0,005 до 0,03 м и расхода электролита от 0,001 до 0,005 л/сек. Установлено, что разряд имеет многоканальную структуру. Его цвет зависит от состава и концентрации электролита. Число микроканалов увеличивается с ростом тока. На устойчивое горение разряда существенное влияние оказывают расход электролита и диаметр струи. Замена электролитического катода на электролитический анод при неизменных прочих условиях увеличивает плотность тока на электролитическом электроде на один порядок величины.

1.4 Электрические разряды с электролитическими электродами

В [59] исследуется разряд при атмосферном давлении, когда оба электрода являются электролитами. Разряд реализуется с помощью устройства, представленного на рисунке 1.6. Средняя напряжённость поля в плазме равна 1000 В/см, плотность тока - менее 1 А/см². Катодное падение напряжения составляет 400 В, а анодное - 200 В.

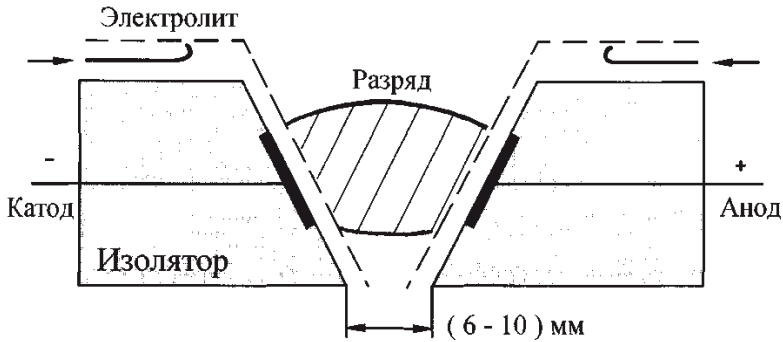


Рисунок 1.6 – Разрядный узел для реализации разряда с электролитическими электродами [59]

В [79] описываются тепловые и энергетические характеристики разрядов с пористыми электродами. Пористые электролитные катоды были изготовлены различных форм и размеров. На рисунке 1.7 представлен эскиз пористого электролитного катода, диаметр D пористого тела которого 65 мм и более. Он состоит из токоподвода – напорной трубки 1, пористого тела 3 в виде стакана и корпуса 4, снабжённого патрубком 5. Корпус 4 изготовлен из токопроводящего материала, а пористое тело 3 изготовлено из огнеупорного диэлектрика – шамотного кирпича, пористость которого составляет в среднем около 40 %. Пунктирными линиями условно показаны контуры каналов 6, выполненных внутри корпуса 4. Эти каналы соединяют полость зазора 7, образованного между дном стакана 3 и корпусом 4, с патрубком 5. Расположение каналов 6 выбрано таким образом, чтобы обеспечить съём тепла потоком электролита со всех частей катода. Пористый электролитный катод с пористым телом меньшего диаметра отличается тем, что в его корпусе отсутствуют дополнительные каналы. Пористый электролитный катод работает следующим образом. Электролит 2, подводимый через трубку

1, протекая по зазору 7, смачивает пористое тело 3. Просачиваясь через пористое тело, электролит поступает на рабочую поверхность 8. Преобладающая часть электролита, протекая по каналам 6, поступает к патрубку 5 и отводится от катода. Эта часть электролита служит как охлаждающая жидкость.

Генератор направленного потока плазмы предназначен для работы с электролитами, приготовленными из водных растворов солей щелочных металлов и щелочей с концентрацией по массе от 0,1 до 3% [79]. Он имеет торцевой пористый электролитный катод и кольцевой анод. Металлический анод может располагаться на различных расстояниях от катода. Расстояние между катодом и анодом может меняться в пределах от 20 до 200 мм.

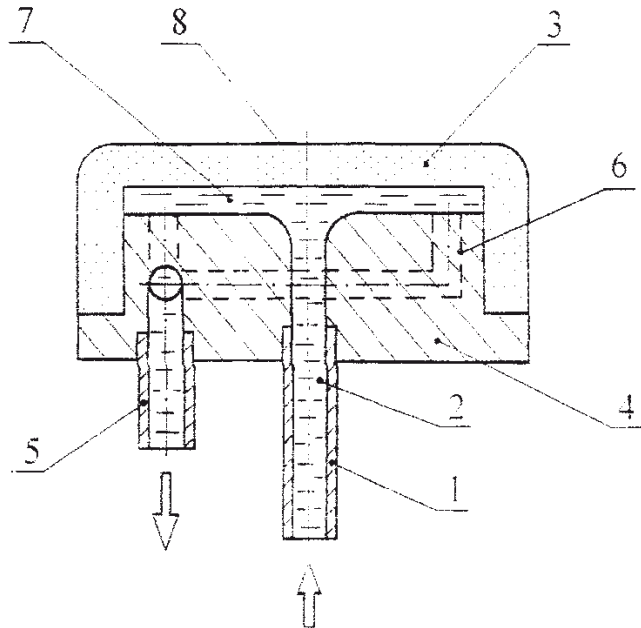


Рисунок 1.7 – Пористый электролитный катод

Из проведенного обзора можно сделать следующие выводы. В настоящее время наиболее изучены электрические характеристики разрядов с электролитическими электродами при малых межэлектродных расстояниях и относительно при малых силах тока. Но еще нет теории разряда в газе между электролитическим анодом и металлическим катодом, которая была бы в состоянии объяснить все известные экспериментальные факты и позволяла бы производить расчеты с удовлетворительной для практики точностью. Очень мало экспериментальных данных о характеристиках электрического разряда с электролитическим анодом из различных электролитов при больших силах тока. Далеко недостаточно изучены структура разряда, распределения потенциала и напряженности электрического поля, анодное и катодное падения потенциала, плотность тока на электродах. Мало данных о взаимодействии плазмы такого разряда с поверхностями твердых тел. Всё это указывает на актуальность изучения характеристик многоканального разряда между металлическим и электролитическим (непроточные и проточные электролиты) электродами при атмосферном давлении при больших силах тока. Следует также отметить тот факт, что число различных способов получения разряда с электролитическими электродами растет [59, 80-82].

1.5 Использование электрических разрядов с электролитическими электродами в технологии

Плазменную обработку различных изделий с помощью разряда, горящего между металлическим и электролитическим электродами, целесообразно применить в тех случаях, когда другие методы более трудоемки или их применение невозможно по различным другим причинам. В последнее время возрос интерес к таким источникам плазмы. Как известно [83], электрические разряды с одним электролитическим электродом использовались более ста лет назад для электролиза водных растворов, где

один из металлических электродов выносился из электролита для того, чтобы избежать реакций на поверхности электрода. С середины 40-х годов эти разряды начали использовать для нагрева металлов и сплавов в электролите [8, 84], для электротермической обработки материалов [30, 85]. Нагрев металлов и сплавов в электролитной плазме в анодном процессе позволяет плавно изменять температуру заготовки в интервале 620÷1300 К. Благоприятное сочетание высокой температуры нагрева и элементов водного раствора в возбужденном и ионизированном состояниях открывает возможности ускорения процесса электротермической обработки [49, 86].

Электрические разряды с электролитическими электродами могут использоваться в плазменной технологии нанесения теплозащитных, противокоррозионных, антифрикционных и диэлектрических покрытий [44, 87-92]. Оксидируемая деталь помещается чуть ниже поверхности электролита, а катод находится над поверхностью электролита [93, 94]. Полярность может быть обратной, но при этом толщина анодного слоя будет меньше. В результате анодирования изделия обладают достаточно высокими антифрикционными свойствами и износостойкостью. Достоинствами плазменно-электролитического метода нанесения оксидных покрытий являются: высокая скорость нанесения и достаточно большая толщина (сотни нм) слоя. Диэлектрические оксидные плёнки обладают высоким пробивным напряжением (до 9300 В) и могут быть использованы при изготовлении высоковольтных прецизионных конденсаторов.

В [48] на основе результатов экспериментального исследования описан механизм плазменно-электролитного нагрева металлов. Поверхностный слой активного электрода при бомбардировке заряженными частицами нагревается и упрочняется. При этом охлаждение его, за счет теплообмена, с окружающим электролитом через парогазовую оболочку, предотвращает возможность изменения структуры металла в объеме.

В работах [95, 96] установлены возможности использования разряда с электролитическим электродом для получения металлического порошка, очистки поверхности и снятия заусенцев с поверхности изделий из различных металлов, а также для получения тонких плёнок металлов. В качестве электролитического электрода используются водные растворы NaCl и CuSO₄. Порошок получается переменным током $I=0,7\div2,0$ А при давлениях $P=2660\div13300$ Па и межэлектродном расстоянии $l=10\div20$ мм. В этих режимах горения разряда плотность тока j на металлическом электроде находится в пределах от 3 до 30 А/см². Этот процесс был упрощён и усовершенствован путём повышения плотности тока на металлическом электроде и использованием технической воды в качестве электролитического электрода. Диапазон изменения j расширился и составил от 0,5 до 02 А/см², как при переменном токе, так и при постоянном. Оптимальным условием получения порошка было $l/d=0,4\div2$. Этот метод получения ферритных порошков из стальных электродов, содержащих углерод, позволяет избежать многих недостатков, которыми обладают другие технологии. В работе [95] проведены также исследования по снятию заусенцев с деталей сложной конфигурации разрядом с электролитным катодом. Разряд происходил в парогазовом слое толщиной 0,2÷0,5 мм, который состоит из пара и водорода, выделяющегося из электролита. В качестве электролита использовались водные растворы NaCl, KCl, CuSO₄ и техническая вода. В зависимости от площади обрабатываемого участка ток менялся в пределах 50÷70 А. Напряжение было ~450 В. Обработка изделий проводилась при атмосферном давлении. Мощность установки вставляла 60 кВт.

В отличие от электролизных способов получения порошка [97, 98], в работе [95] достигнута высокая производительность процесса получения порошка при давлении $P=10^5$ Па. Но этот способ не позволил получать порошки тугоплавких металлов. Производительность устройств в работах

[97, 98] составила $0,07 \div 0,1$ г/ч порошка, а в [95] достигнута производительность процесса получения порошка $60 \div 80$ г/ч. В работе [66] предлагается электролит для получения никелевого порошка. Авторами работы [2] рассмотрено влияние характеристик разряда на интенсивность получения порошка и его дисперсность. Было установлено, что с повышением плотности тока на катоде и уменьшением концентрации углерода в стальных электродах (ниже 0,8 %) интенсивность процесса возрастает.

В [79] для получения порошка разряд зажигался между пористым электролитным катодом и металлическим стержнем, которые устанавливались вдоль одной оси. Межэлектродное расстояние поддерживалось в пределах $30 \div 40$ мм. Использовались, стержни из углеродистой стали марок: сталь 20, сталь 45 и инструментальной стали марки У8 с диаметром 10, 15 и 20 мм. Электролитом служил водный раствор NaCl с массовой концентрацией 0,5 %. Растворы солей имеют малое электролитическое сопротивление. Поэтому они предпочтительнее, чем техническая вода, так как чем меньше сопротивление электролита, тем меньше выделяется джоулево тепло внутри пористого электролитного катода, следовательно, уменьшаются тепловые потери. Оптимальный диапазон плотности тока в металлическом аноде составляет $1,5 \div 4$ А/см². При малых плотностях тока, уменьшается производительность процесса, а при больших плотностях появляется капельный срыв материала стержня. Представлена зависимость от плотности тока удельной массовой производительности $m_{уд}$, которая представляет собой отношение массового выхода порошка за один час к площади сечения металлического стержня. С увеличением плотности тока удельная производительность процесса возрастает для всех использованных стальных стержней. При этом следует отметить, что максимальный массовый выход порошка получается примерно в 1,5 раза больше того значения, которое было достигнуто авторами работ

[99]. По-видимому, одним из основных параметров, приводящих к увеличению массового выхода порошка, является увеличение диаметра стального стержня, так как чем больше сечение стержня, тем больше активная поверхность, на которой идут процессы распыления материала. Исследования показали, что свойства получаемого порошка практически не отличаются от свойств порошка, полученного в работах [95, 99]. В составе порошка основную долю (70÷90 % по объему) занимает магнетит Fe_3O_4 . Остальная часть в основном состоит из оксида железа – вюстита FeO . Частицы получаемого порошка сферические. Отклонения от сферической формы встречаются крайне редко. Диаметр примерно 50% частиц находится в интервале от 100 до 300 мкм. Наименьший диаметр частиц – около 1 мкм. Максимальный размер частиц зависит от плотности тока. В режимах с большими плотностями тока появляются частицы с диаметром 1 мм и более.

В работе [78] описано устройство для получения металлического порошка паровоздушным разрядом, горящим между электролитическим анодом и металлическим катодом.

В [100] отмечено, что традиционные способы очистки металла в металлургии отличаются существенными недостатками: химическое травление связано с потерей металла и загрязнением окружающей среды; механические способы – с высоким износом инструмента и образованием налета на поверхности металла. Этим объясняется большой интерес к исследованию новых электрофизических способов очистки с применением плазмы газового разряда. Однако газовые разряды имеют свои особенности. Очистка тлеющим разрядом и ионной бомбардировкой проката требует высокого вакуума в зоне очистки и сложного вакуумного оборудования.

Электрогидравлическая очистка высоковольтным импульсным разрядом в технической воде и разрядом тесла требует применения дорогостоящего и небезопасного высоковольтного оборудования. Наиболее интересной с точки зрения производственных условий является очистка

натяжки дуговым разрядом. Однако максимальная эффективность очистки дуговым разрядом достигается в вакууме, что усложняет процесс обработки. Максимальный эффект получается, когда анодом служит заряженная струя электролита. Такая система является одним из вариантов электронно-плазменной обработки металла.

В работах [64, 101, 102] разработаны технологические процессы повышения долговечности, качества и надёжности медицинских инструментов путём модификации поверхностного слоя плазмой разряда с электролитическим катодом. Обработке подвергались изделия из коррозионностойких и износостойких сталей, титановых сплавов. Показано, что плазма данного разряда может быть наиболее эффективно использована для очистки, полировки с одновременным удалением трещиноватого и рельефного слоев, упрочнения, газонасыщения, активации поверхности, улучшения механических и других служебных характеристик обрабатываемого изделия.

При разработке технологических процессов очистки плазмой разряда с электролитическим катодом в [64, 101, 102] объектом исследования выбраны стальные изделия медико-инструментальной промышленности: иглодержатели и микрохирургические инструменты. Оптимальные режимы очистки данных изделий следующие: $q=7,8 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, $l=2 \text{ мм}$, $\tau=10 \text{ мин}$. Температура изделия контролировалась с помощью платино-платинородиевых термопар. Показано, что очистка микрохирургических инструментов и иглодержателей плазмой разряда с электролитическим катодом может быть использована перед нанесением на них покрытий нитрида титана ионно-плазменным методом.

При плазменной полировке разрядом с электролитическим катодом коробчатого замка зажима, коробчатого замка иглодержателя, микрохирургических игл и ультразвуковых инструментов максимальный результат достигается за определённый промежуток времени. Например, при

плазменном воздействии на исходную поверхность с шероховатостью не менее 8-9 класса за 30÷40 мин обработки достигается $R_a=0,25\div0,20$ мкм. Поверхность после плазменной обработки становится более однородной и удаляются примесные дефекты. Установлено, что снижение шероховатости максимально при воздействии с тепловым потоком в пределах от $7,4\cdot10^{-2}$ до $8,2\cdot10^{-1}$ Вт·м². Сделан вывод о том, что для достижения 10 класса шероховатости необходимо производить обработку в режиме, соответствующем «дождевой форме разряда». При этом термический КПД составляет 20÷21 %. Установлено, что существенную роль при выборе режима плазменной полировки играет межэлектродное расстояние l . Для каждого металла найдены оптимальные l . Они находятся в интервале от 1,5 до 2,5 мм.

Большое количество исследований посвящено проблеме очистки и обеззараживания воды с помощью различных типов газовых разрядов. Предполагается, что обеззараживающее действие импульсного электрического разряда в воде связано с несколькими факторами влияния на микроорганизмы [102]. Под действием свободных атомов и радикалов происходит распад аминокислот и белка, деполяризация нуклеиновых кислот, расщепление других биологически активных веществ. Кроме этого, непосредственное действие на микроорганизмы оказывает ударная волна и ультрафиолетовое излучение разряда в электролите. Обеззараживающее действие продолжается длительное время после прекращения разрядной обработки (сутки, неделя и более), что вызвано действием продуктов разложения микроорганизмов в активной фазе процесса. Явно выраженное бактерицидное действие на микробную клетку отмечается при энергии разряда $(0,6\div0,8)\cdot10^2$ Дж.

Электрический разряд с жидким металлическим катодом широко используется в ртутных выпрямителях [103]. Их выпрямляющее действие

основано на поддержании около катода постоянного маломощного разряда между ртутью-катодом и так называемым ртутным анодом.

В [73, 75, 104, 105] исследовались возможности применения плазмы разряда, горящего между струёй электролита и твёрдым электродом для очистки поверхности металлов, снятия заусенцев, прошивки отверстий и резки металлов, а также для получения оксидного порошка из тугоплавких металлов. Показано, что очищать поверхности и удалять заусенцы в 2-3 раза эффективнее с помощью разряда с электролитическим анодом, чем с помощью разряда с электролитическим катодом. Объясняется это тем, что плотность тока на металлическом катоде в разряде с электролитическим анодом почти на порядок превышает плотность тока на металлическом аноде разряда с электролитическим катодом. Средняя скорость съёма металла составляла $0,2 \div 0,8$ мм/мин, что сравнимо со скоростью съёма металла способом ЭХО [106].

Разряд с электролитическими электродами в промышленных масштабах применяется для нагрева металлов и сплавов в электролите [8, 30, 84, 107], а также нанесения теплозащитных, противокоррозионных, антифрикционных и диэлектрических покрытий [92, 87, 108]. То, что нагрев металлов в электролите происходит под действием плазмы разряда, а не по другой причине, раскрыто авторами работы [48].

Одним из трудоемких и маломеханизированных процессов в машиностроении является процесс удаления заусенцев, остающихся на кромках деталей после механической обработки заготовки. Заусенцы являются многочисленными и опасными источниками технологических загрязнений. Большинство известных способов удаления заусенцев основываются на механической или электрохимической обработке материалов [109, 110], а также на применении электроразрядной плазмы с электролитическим анодом [111] (производят очистку катанки от окалины) и электролитическим катодом [112]. Все эти способы обладают рядом существенных недостатков

технологического, экономического и экологического характера. В [112] при напряжении $100 \div 350$ В и плотности тока $10^2 \div 5 \cdot 10^3$ А/м² очистка стальной детали проводят в режиме микродуговых или дуговых разрядов с точечными пятнами. Поэтому в этом режиме не уменьшается шероховатость поверхности и не удаляются заусенцы. В [95] предлагается электротермический способ очистки поверхности и снятие заусенцев с деталей сложной формы с одновременным уменьшением шероховатости поверхности. Но используемые плотности тока не позволили обрабатывать деталей с достаточно высокой производительностью труда по сравнению с другими существующими способами удаления заусенцев.

В [113] разработан способ обработки поверхностей подвергающихся износу металлических изделий, погруженных в электролит. Достоинством способа является возможность совмещения эффективной обработки изделия с процессами очистки поверхности от жиров минерального, растительного и животного происхождения. По утверждению авторов, данный способ, по сравнению с химической и электролитической обработкой поверхности, позволяет использование электролитов с меньшей концентрацией примесей (неорганических и органических). Очистка поверхности происходит быстрее и эффективнее за счет дополнительного воздействия на поверхность многоканального разряда. Погружение обрабатываемой детали в электролит продиктовано тем, что при использовании в качестве анода массивных деталей тепловое воздействие разряда приводит к локальному перегреву поверхности, укрупнению зерна, то есть к увеличению шероховатости поверхности, что является нецелесообразным. Данный способ рекомендуется авторами для обработки труднодоступных участков деталей сложной конфигурации. Он обеспечивает полировку поверхностей металлических изделий с закруглением краев и удалением острых микровыступов, уменьшением шероховатости до одного класса в зависимости от используемого электролита и режима горения разряда.

На основании проведенного критического обзора литературных данных можно сделать следующие обобщающие выводы, что далеко не исчерпаны возможности использования многоканальных разрядов с электролитическими электродами в различных областях науки и техники, а также для различных технологических процессов.

Глава 2

Экспериментальные установки для исследования струйного многоканального разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом и методика измерений

В этой главе представлено описание экспериментальных установок и аппаратуры для исследования физико-термических процессов в электрических разрядах, протекающих между электролитическим (проточным и непроточным) анодом и металлическим (охлаждаемым и неохлаждаемым) катодом при атмосферном давлении. Приведены описания методик проведения экспериментов и обработки результатов, даны оценки погрешности измерений и вычислений параметров разряда.

Экспериментальные установки (высоковольтный – до 4000 В и низковольтный до 600 В), предназначенные для изучения электрического разряда при атмосферном давлении, состоят из системы электрического питания; оборудования предназначенного для хранения, очистки, подачи и регулирования параметров электролита; сменных электролитических ячеек – ванн; аппаратуры контроля и управления работой установки и измерения характеристик электрических разрядов.

2.1 Структурная схема экспериментальной установки

Высоковольтная экспериментальная установка предназначена для исследования электрического разряда в диапазоне напряжения разряда $U=0,2\div4$ кВ, токов $I=0,01\div10$ А, межэлектродных расстояний $l=0,1\div100$ мм. При помощи низковольтной экспериментальной установки можно исследовать электрический разряд между электролитическим и металлическим электродами при следующих диапазонах электрических параметров: напряжение на разрядном промежутке $U=0,05\div600$ В; ток

разряда $I=10\div 200$ А. Структурная схема установок, реализующая перечисленные условия, представлена на рисунке 2.1.

Экспериментальная установка с металлическим и электролитическим электродами состоит из систем электрического питания, электролитической ванны, контрольно-измерительной аппаратуры, устройство для перемещения металлического электрода относительно электролита.

Основными частями экспериментальной установки являются блок разрядной камеры с системой подачи и очистки электролита, источник питания с быстродействующей системой защиты от коротких замыканий, система контроля, управления и регулирования электрических и технологических параметров. Источник питания, состоящий из регулятора напряжения 15, повышающего трансформатора 14 и блока выпрямителей 13, обеспечивает подачу регулируемого стабилизированного постоянного напряжения по токоподводам на разрядный промежуток. Блок разрядной камеры содержит емкости для электролита 8 и 10. Электролит во время работы постоянно перекачивается из нижней емкости в верхнюю и через дренажное отверстие вновь стекает в нижнюю, благодаря чему происходит его постоянное перемешивание. На дне верхней емкости установлена изолированный от корпуса анодная электродная пластина. Отрицательный потенциал подводится к изолированной от корпуса штанге, к которой с помощью зажимов могут быть прикреплены металлические электроды различной формы. Штанга с помощью электропривода может перемещаться в вертикальной плоскости, благодаря чему можно устанавливать необходимое межэлектродное расстояние. Во время экспериментальных исследований, электролит нагревается и загрязняется. Для поддержания постоянства характеристик электролита используются системы очистки и охлаждения электролита. Для охлаждения твердого металлического катода используется водопроводная вода.

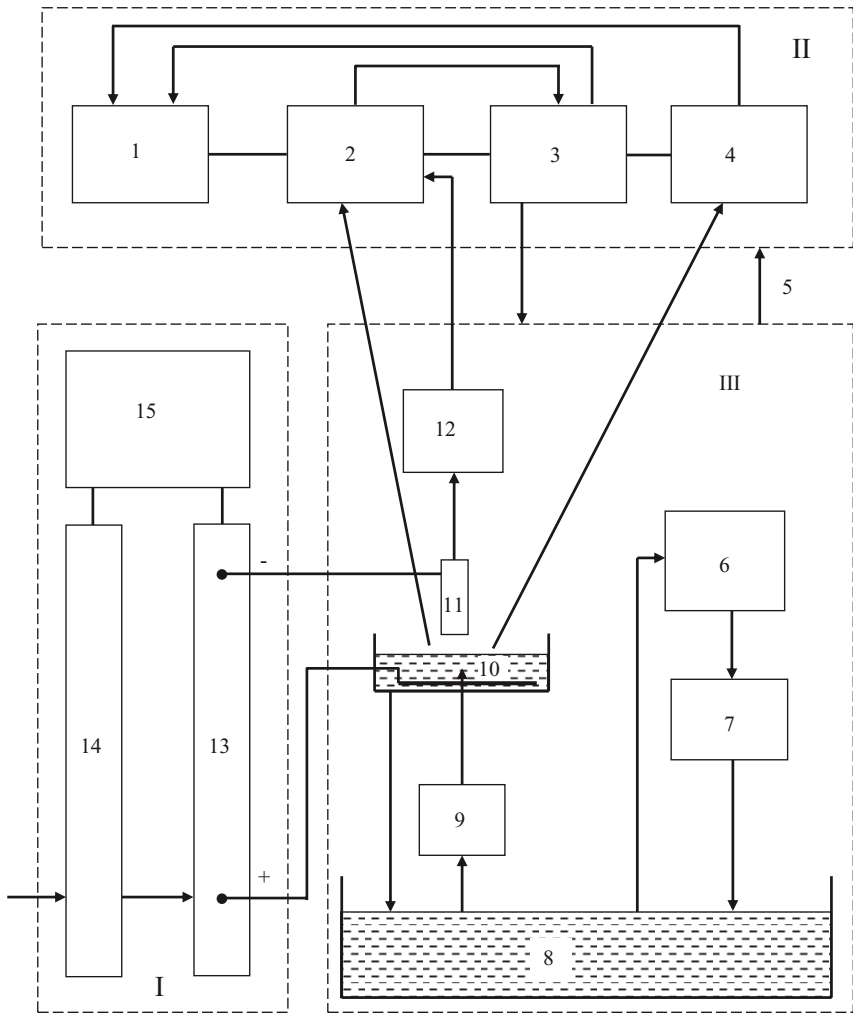


Рисунок 2.1 – Структурная схема экспериментальной установки

1 – стабилизатор напряжения; 2 – система контроля межэлектродного расстояния; 3 – система контроля параметров электролита; 4 – система

контроля электрических параметров разряда; 5 – вытяжная вентиляция; 6 – насос перекачки электролита; 7 – фильтр для очистки электролита; 8 – емкость с электролитом; 9 – насос подачи электролита в электролитическую ванну; 10 – электролитическая ванна; 11 – металлический катод с системой охлаждения; 12 – держатель металлического катода с приводом; 13 – блок выпрямителей; 14 – трансформатор; 15 – регулятор напряжения.

2.2 Система электрического питания высоковольтной экспериментальной установки

Система электрического питания высоковольтной установки (рисунок 2.2) предназначена для питания разряда, измерительной аппаратуры и вспомогательного оборудования. Источник питания разряда обеспечивает регулирование и преобразование сетевого напряжения и состоит из низковольтного и высоковольтного регулируемых блоков, обеспечивая тем самым указанные диапазоны изменений напряжения и тока.

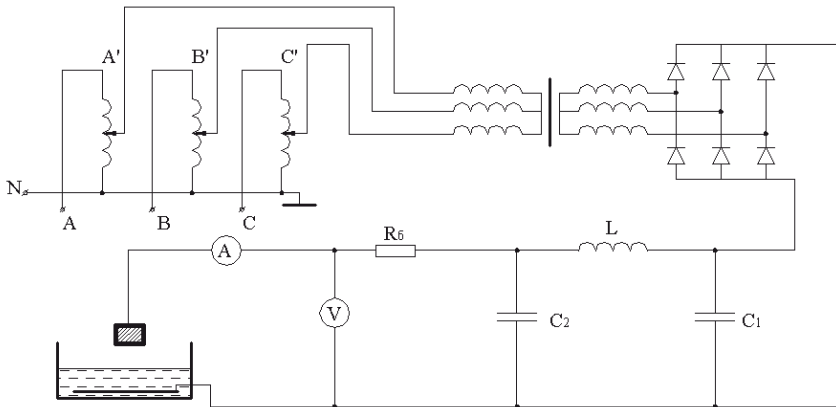


Рисунок 2.2 – Система высоковольтного электрического питания экспериментальной установки

Источник питания обеспечивает регулируемое постоянное напряжение до 4000 В при номинальном токе до 10 А. Трехфазное сетевое напряжение через предохранители и рубильник, подается на регулятор напряжения типа ИР 60 УХЛ4, который позволяет регулировать трехфазное напряжение от 0 до 660 В. После регулятора напряжения питание подается на повышающий трехфазный трансформатор. На выходе с трансформатора можно получить напряжение до 4000 В. Переменное напряжение подается на выпрямитель, собранный по схеме Ларионова из вентилях типа ВЛ-200. Амплитуда пульсаций выпрямленного напряжения сглаживается П-образным L-C фильтром ($C_1=C_2=100$ мкФ, $L=50 \cdot 10^{-3}$ Гн) уменьшается от 6% до 1% от выпрямленного. Далее для регулирования напряжения и ограничения тока в случаях короткого замыкания используются балластные сопротивления. Блок этих сопротивлений позволяет получить сопротивление от 20 до 200 кОм. Токи и напряжения измеряются щитовыми приборами кл. точности 0,5 и 1,5, установленными на пульте управления. На нем же размещены кнопки пуска и выключения ИП, низковольтных выпрямителей, питающих электродвигатели вспомогательного оборудования, понижающего трансформатора, питания двигателей оснастки, координатных устройств регулирования межэлектродного расстояния и зондовых измерений (ЭД типа РД-110-Р8), кнопки включения и выключения вентиляторов отсоса паров воды и газов, и т.д., сигнальные лампочки.

Суммарная электрическая мощность, потребляемая экспериментальной установкой, не превышает 10 кВт.

Фото высоковольтной экспериментальной установки представлено на рисунке 2.3.

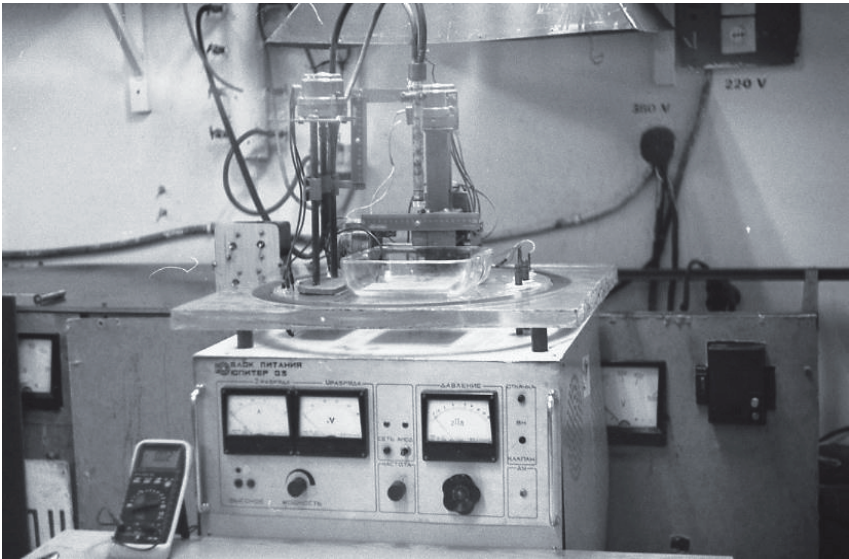


Рисунок 2.3 – Фото высоковольтной экспериментальной установки

2.3 Система электрического питания низковольтной экспериментальной установки

Система электроснабжения установки обеспечивает электрической энергией разрядное устройство с электролитической ванной, пульт управления, систему измерений и вспомогательное оборудование.

Функциональная электрическая схема низковольтной установки представлена на рисунке 2.4.

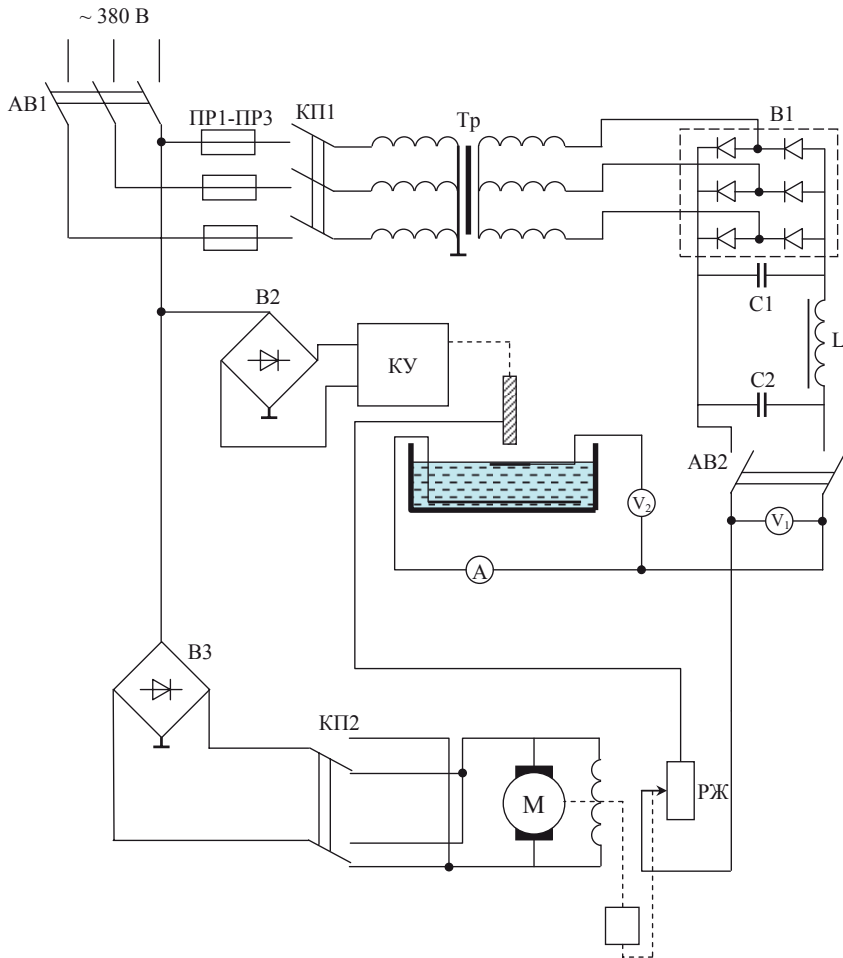


Рисунок 2.4 – Функциональная электрическая схема низковольтной электрической установки

Трехфазный электрический ток с напряжением 380 В и частотой 50 Гц подается на установку от распределительного щита РЩ типа ВРУ1-221Р30 при помощи автоматического выключателя АВ1 типа АЗ716. Переменный ток через предохранители ПР1-ПР3, контакторный переключатель КП1 и развязывающий трансформатор Тр 380/400 В подается на выпрямитель В1, собранный по схеме Ларионова из шести полупроводниковых вентилей типа ВЛ-200. Выпрямитель имеет выходное напряжение 600 В и номинальный ток 200 А. Амплитуда пульсации напряжения в такой схеме может достигать 6% от выпрямленного напряжения. Поэтому с целью уменьшения пульсаций в цепь включен П-образный LC фильтр с параметрами $C_1=4,7$ мкФ, $C_2=5$ мкФ, $L=50$ мГн. Коэффициент сглаживания фильтра рассчитан по методике, описанной в [114]. Развязывающий трансформатор включен в цепь питания разрядного устройства с электролитической ванной с целью обеспечения возможности заземления одного из электродов. Для получения крутопадающей вольтамперной характеристики последовательно с разрядным устройством включено балластное сопротивление РЖ, представляющее собой жидкостный реостат. Изменение уровня погружения подвижного электрода и, следовательно, регулирование сопротивления реостата достигается с помощью реверсивного электромеханизма М типа МЭ252, который питается постоянным током от выпрямителя В3 типа ВСА-6К.

Дистанционное управление реостатом и включение разрядного устройства с помощью контакторного переключателя КП2 типа КТ7023, установленным на пульте управления. Для измерения напряжения и тока разряда используются вольтметр V_1 типа М330 и амперметр А М330 класса точности 1,5 с шунтом 300 А класса точности 0,5. Вольтметр V_2 используется для измерения падения напряжения в электролите. Измерительные приборы расположены на пульте управления.

Выпрямитель В2, собранный по мостовой схеме из полупроводниковых диодов типа Д248Б, служит для питания постоянным током координатного устройства, в состав которого входит электродвигатель типа А-220-78. Координатное устройство позволяет перемещать металлический электрод в разряде.

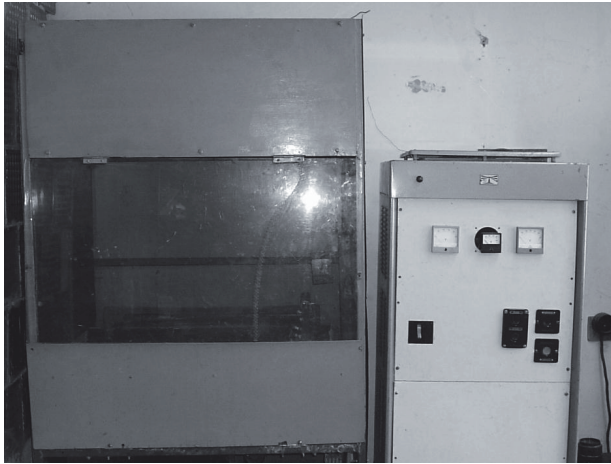


Рисунок 2.5 – Фото низковольтной экспериментальной установки

2.4 Электролитическая ванна

Электролитическая ванна состоит из диэлектрического корпуса 1 (рисунок 2.6), металлической пластинки 2, служащей для подвода напряжения к электролиту 3, медного или стального охлаждаемого электрода 4. Во время экспериментальных исследований использовали медную, алюминиевую, а также стальную пластину. Электрод 4, который подключен к другой клемме источника питания, закрепляли на координатном устройстве, позволяющем регулировать межэлектродное расстояние. В качестве

электролита использовались очищенная или техническая вода, электролиты различной природы и концентрации.

Температура жидкости измеряли ртутным термометром ТН4-М ценой деления шкалы $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. с погрешностью не более $1,2\%$, а также цифровым прибором МГ890. Разрядный ток изменяли регулированием напряжения источника питания регулятором напряжения типа ИР 60 УХЛ 4 или с помощью балластного сопротивления. Разрядный ток измеряли амперметром типа Ц4311 (кл. точности 1,0) и прибором марки МУ69 (кл. точности 0,5), а напряжение в разрядном промежутке измеряли киловольтметром типа С75 (кл. точности 1,5) или щитовым прибором класса, точности 1,0.

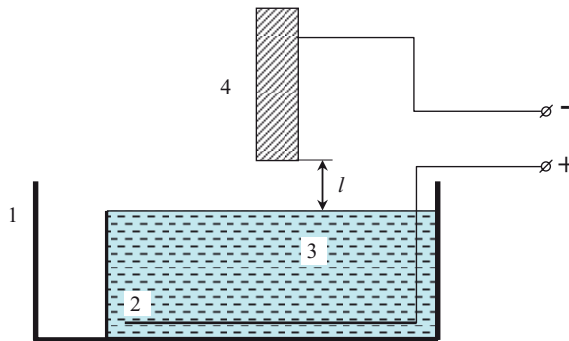


Рисунок 2.6 – Схема электролитической ванны с проточным электролитическим анодом

l – электролитическая ванна; 2 – токоподвод (металлическая пластина);
3 – электролит; 4 – металлический катод

2.5 Системы охлаждения и подачи электролита

Система, охлаждения установки служит для охлаждения металлических электродов, электролита. Она питается из магистральной водопроводной сети, а подача электролита осуществляется из специального бака. Система охлаждения работает под напором воды водопроводной сети, и давление воды в ней регулируется с помощью водопроводной запорной арматуры. Функциональная схема охлаждения электролитной ячейки и металлического электрода на рисунке 2.7.

Подача электролита 2 в электролитическую ячейку осуществляется насосом 6. Расход электролита измеряется ротаметром марки РС-7 или определяется измерением его расхода из промежуточной емкости. Предварительная тарировка ротаметра позволяет измерять расход электролита с погрешностью не более 5%. Расход электролита регулируется вентилем 5. Межэлектродное расстояние регулируется специальной оснасткой перемещением металлического электрода 1 и устанавливается с точностью $\pm 0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

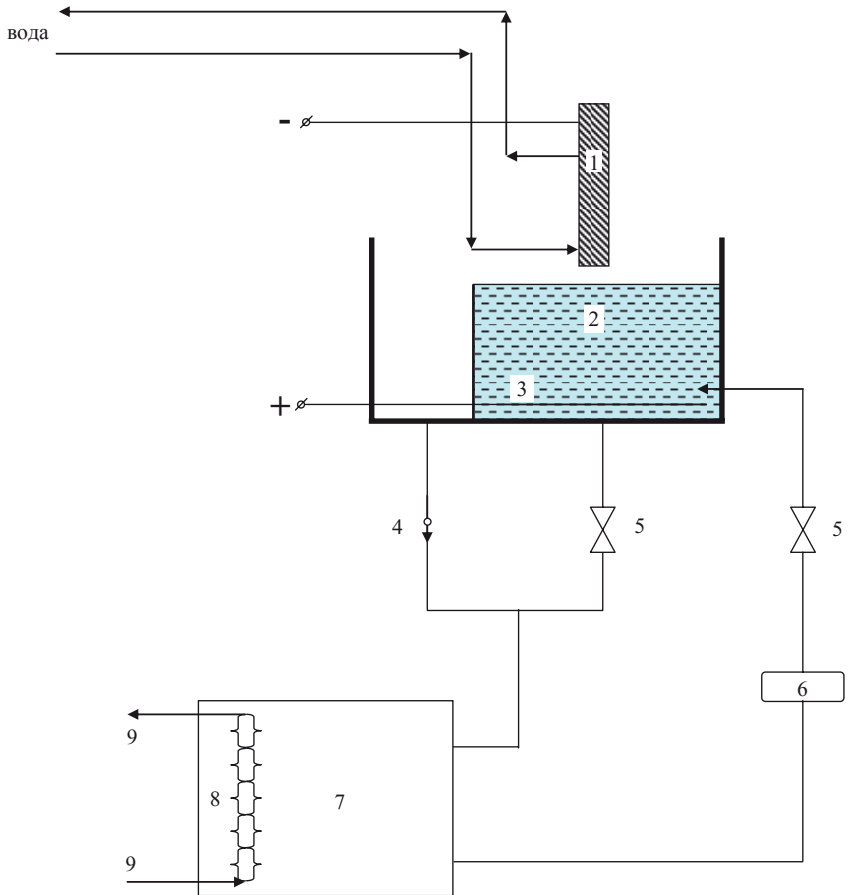


Рисунок 2.7 – Функциональная схема охлаждения электролитической ячейки и металлического электрода

2.6 Измерительная аппаратура. Методика проведения экспериментов и оценка точности измерений

Экспериментально исследовался электрический разряд между проточным электролитическим анодом и металлическим анодом в диапазоне $l=0,1\div100$ мм, $U=0\div4000$ В, $I=0,01\div50$ А на высоковольтном устройстве и до 200 А на низковольтном. В качестве проточного электролитического анода использовалась очищенная и техническая вода, растворы NaCl, CuSO₄. С целью обеспечения хорошей повторяемости результатов измерений использовались металлические электроды с определенной шероховатостью поверхности R_a от 0,8 до 1,6 мкм. До начала эксперимента они подвергались тренировке электрическим разрядом. Для тренировки выбирались режимы, когда разряд горел устойчиво и поверхность твердого электрода была покрыта свечением. В течение 10-30 минут тренировки напряжение разряда уменьшалось на 1÷3%. Дальнейшее увеличение времени тренировки электродов не вызывало изменения напряжения разряда. Поэтому твердые электроды подвергались тренировке в течении не менее 30 минут. Перед каждым экспериментом ареометром определялась плотность проточного электролитического анода. Одной из основных характеристик электрического разряда в газе является его вольтамперная характеристика. В экспериментах ВАХ снималась при помощи амперметров типа Ц4311 (кл. точности 1,0) и прибором марки МУ69 (кл. точности 0,5), а напряжение в разрядном промежутке измеряли киловольтметром типа С75 (кл. точности 1,5) или щитовым прибором класса, точности 1,0. Относительная погрешность измерения напряжения и тока разряда не превышали 1,5%. При определении вольтамперных характеристик сначала измерялось суммарное падение напряжения в разряде и электролите. Для определения падения напряжения на проточном электролитическом аноде использовали

дополнительный вольтметр типа М330 или DT823. Один зажим вольтметра соединяли с токоподводом на дне электролитической ванны, а второй при помощи кольцевого зонда максимально приближали к поверхности проточного электролитического анода. Разность напряжений между двумя зажимами вольтметра показывал падение напряжения на проточном электролитическом аноде. Падение напряжения в разряде определялось как разность суммарного напряжения и напряжения на проточном электролитическом аноде.

Для каждого набора значений давления, межэлектродного расстояния, материала, состава и диаметра электрода регистрация ВАХ разряда проводилась не менее 7 раз. Температура электролита контролировалась с помощью термометров с ценой деления 0,5 °С. Температура в плазменной струе измерялось термопарой типа ТПП группы ПП и ТПР (условные обозначения градуировок ПП-1 и ПР 30/6) и вторичным прибором класса точности 0,05.

При определении распределения потенциала и напряженности электрического поля менялось расстояние между металлическим катодом и проточным электролитическим анодом и фиксировалось изменение напряжения горения разряда с расстоянием при постоянной величине тока. Экстраполяция к нулевому расстоянию между анодом и электролитом дает катодное падение потенциала. Осредненная плотность тока на электродах определялась как отношение тока разряда к площади катодного или анодного пятна.

$$j = \frac{I}{S} \quad (2.3)$$

Площади катодного и анодного пятен определялись путем измерения их диаметров с помощью микроскопа типа СП-52 с погрешностью $\pm 0,05$ мм.

Погрешность измерения диаметра пятна достигает 0,5 мм. Катодные пятна сложной структуры проектировались на экран с миллиметровой сеткой, как это было сделано в [115].

Гранулометрический состав металлического порошка был определен путем просеивания пробы через набор сит с размерами стороны ячейки от 0,05 до 2,5 мм. Для анализа формы и размера частиц использовали металлографический микроскоп ММР-2.

При определении микротвердости поверхности обработанных плазменной струей образцов использовался прибор типа ПМТ-3. Метод определения микротвердости стандартизован (ГОСТ 10354-82).

Глава 3

Результаты экспериментальных исследований струйного многоканального разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом

Из анализа работ, указанных в главе I, следует, что исследования свойств низкотемпературной плазмы разряда между электролитическим (проточным и непроточным) анодом и металлическим катодом проводились, в основном, при пониженных давлениях, а при атмосферном давлении только при малых токах.

В третьей главе описываются процессы, происходящие при зажигании разряда, падение напряжения в электролите, вольтамперные характеристики, структуры струйного многоканального разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом. Здесь же приведены особенности границы раздела между плазмой и электролитическим анодом, распределение потенциала и напряженность электрического поля, плотности тока на металлическом катоде и электролитическом аноде. Экспериментально полученные ВАХ разряда обобщены в критериальной форме. Получены формулы для расчета зависимостей напряжения и напряженности электрического поля от межэлектродного расстояния и силы тока при атмосферном давлении. Результаты исследований опубликованы в работах [116-120].

3.1 Зажигание разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом

Зажигание – это существенно нестационарный процесс бурной ионизации газа, превращения неионизированного газа в проводящую плазму, которое происходит при быстром «включении» достаточно сильного внешнего поля. Процесс зажигания протекает неоднородно и сопровождается

следующими явлениями. После установки необходимого межэлектродного расстояния, постепенно повышается приложенное напряжение. После некоторого увеличения напряжения, под нижней поверхностью металлического катода электролит начинает «отталкиваться» от металлического катода (рисунок 3.1). Действительное межэлектродное расстояние (l_0) увеличивается в центре, а по краям – уменьшается. В зависимости от диаметра металлического катода ($d_k \geq 5$ мм), электролит замыкает на катод. Поэтому, при межэлектродном расстоянии $l=1$ мм зажигание происходит только с металлическими катодами относительно малого диаметра ($d_k < 5$ мм). Увеличение приложенного напряжения при замкнутых электродах приводит к процессу электролиза. В данном случае зажечь разряд можно только увеличивая межэлектродное расстояние.

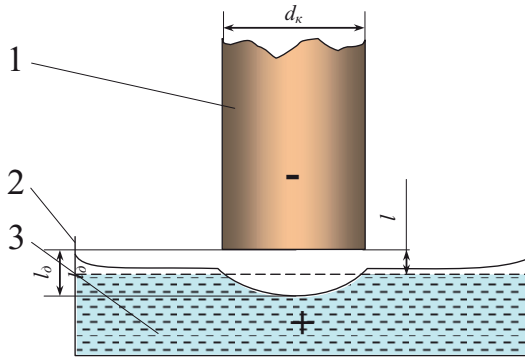


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема устройства

1 – металлический катод; 2 – электролитическая ванна; 3 – электролитический анод

Напряжение зажигания существенно зависит не только от диаметра металлического катода, но и от состава и концентрации электролитического

анода, глубины погружения токоподводящей пластины, материала катода. На рисунке 3.2 приведены зависимости напряжения зажигания для случая, когда электролитом служит техническая вода, и эти зависимости сравниваются с обобщенной кривой Пашена. Из графика видно существенное отклонение экспериментальных данных от этой обобщенной кривой. Сравнивая кривые 1 и 2, а также 3 и 4, можно отметить влияние глубины погружения токоподводящей пластины на напряжение зажигания. Это объясняется тем, что при увеличении глубины электролита пропорционально увеличивается и сопротивление электролитического анода и для преодоления этого сопротивления нужно больше напряжение. Также из рисунка 3.2 видно, что при использовании в роли металлического катода меди, зажигание происходит при большем напряжении, чем при использовании стали 45.

Сравнение экспериментальных данных с обобщенной кривой Пашена, при использовании в качестве электролитического анода раствора NaCl различной концентрации ($c_3=0,1\%$, $c_3=1\%$), приведено на рисунке 3.3. Как и в предыдущем случае (рисунок 3.2), наблюдается влияние на напряжение зажигания глубины погружения токоподводящей пластины и материала металлического катода. Сравнивая данные рисунки, можно отметить влияние на напряжение зажигания состава и концентрации электролитического анода. Использование вместо технической воды раствора NaCl приводит к уменьшению напряжения зажигания при одинаковых межэлектродных расстояниях. Также увеличение концентрации электролита приводит к уменьшению напряжения зажигания (кривые 1 и 2 рисунка 3.3). Эти изменения связаны с проводимостью электролитического анода.

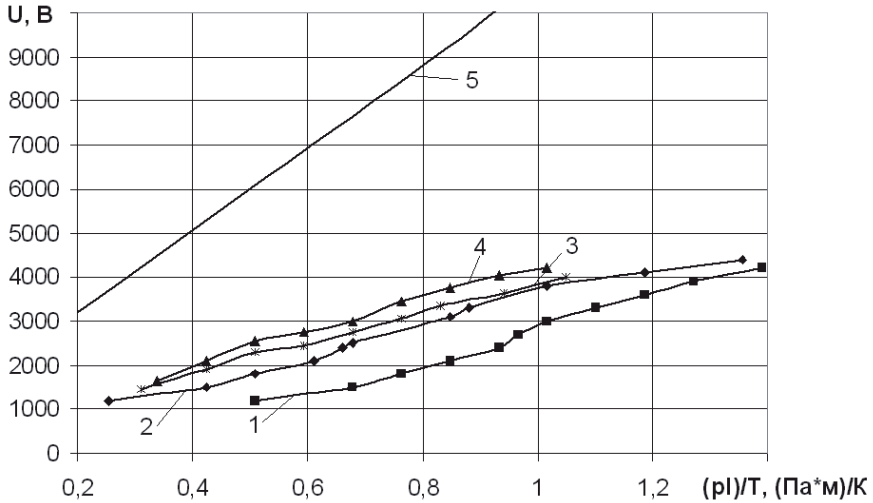


Рисунок 3.2 – Сравнение экспериментальных данных с обобщенной кривой Пашена (кривая 5) (электролитический анод – техническая вода, металлический катод – охлаждаемый, $d_k=20$ мм):

1 – катод – сталь 45, глубина электролита $H_s=28$ мм; 2 – катод – сталь 45, глубина электролита $H_s=56$ мм; 3 – катод – медь, глубина электролита $H_s=28$ мм; 4 – катод – медь, глубина электролита $H_s=56$ мм

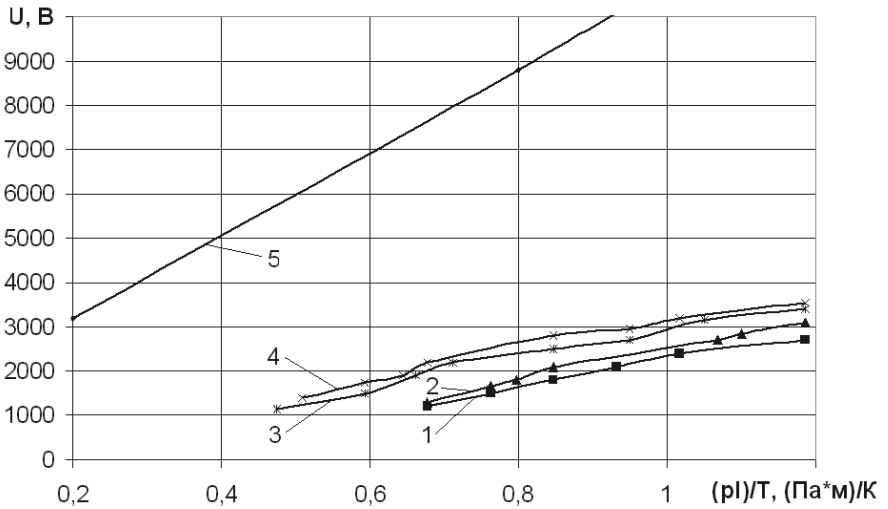


Рисунок 3.3 – Сравнение экспериментальных данных с обобщенной кривой

Пашена (кривая 5) (электролитический анод – раствор NaCl различной

концентрации, металлический катод – охлаждаемый, $d_k=20$ мм):

1 – катод – сталь 45, глубина электролита $H_3=56$ мм, $c_3=1\%$; 2 – катод – сталь 45, глубина электролита $H_3=56$ мм, $c_3=0,1\%$; 3 – катод – медь, глубина электролита $H_3=28$ мм, $c_3=0,1\%$; 4 – катод – медь, глубина электролита $H_3=56$ мм, $c_3=0,1\%$

3.2 Падение напряжения в электролите и вольтамперные характеристики разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом

При определении электрических параметров разряда важное значение имеет определение падения напряжения на электролите. Методика определения падения напряжения описано во второй главе. Применение данной методики позволило получить более точные значения. Сравнение значений, полученных при помощи данной методики, со значениями [76, 79,

95] показало, что при токах разряда $I \leq 2$ А, отклонение друг от друга составляет менее 10 %. Дальнейшее увеличение тока разряда показывает, что при методике, примененной в данной работе, значения падения напряжения отличаются в сторону уменьшения на 25÷45 %.

Характерные зависимости падения напряжения на проточном электролитическом аноде от тока разряда для различных значений диаметров медного катода и межэлектродных расстояний представлены на рисунке 3.4. Как видно из графика, на величину падения напряжения в проточном электролитическом аноде из технической воды влияет не только диаметр металлического катода (кривые 1, 2, 3), но и межэлектродное расстояние (кривые 3, 4, 5). Увеличение межэлектродного расстояния приводит к уменьшению падения напряжения в электролите при одинаковых токах разряда. В зависимости от диаметра металлического катода пропорционально изменяется значение падения напряжения в электролитическом аноде. При использовании в качестве электролитического анода раствора NaCl различной концентрации (0,05%, 0,1%), падения напряжения в электролите уменьшаются в среднем в три раза (рисунок 3.5). Причем существенное влияние при этом имеет концентрация электролитического анода (кривые 2, 4). Сравнение кривых 2 и 3, 4 и 5 показывает влияние на величину падения напряжения в электролите материала металлического охлаждаемого катода. В отличие от технической воды, при использовании растворов NaCl в качестве электролитического анода изменение межэлектродного расстояния не существенно влияет на величину падения напряжения (кривые 1 и 2).

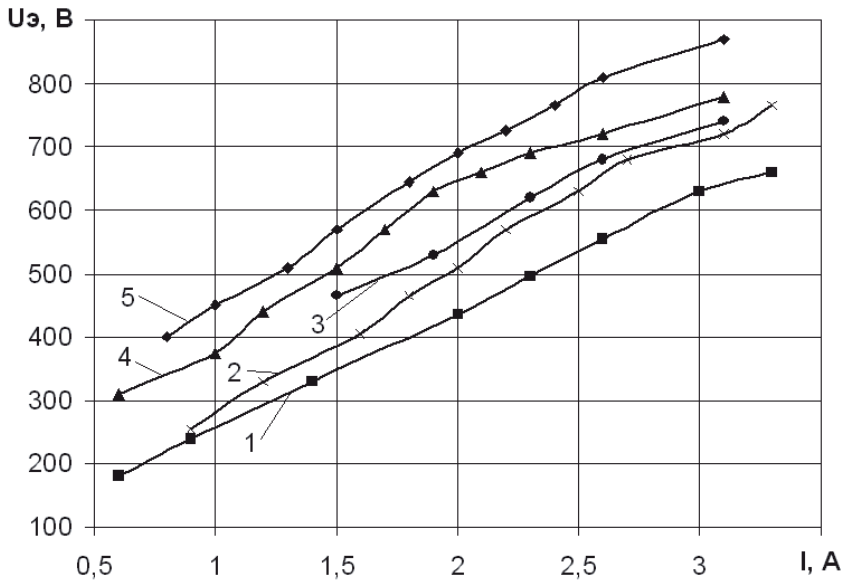


Рисунок 3.4 – Зависимость падения напряжения в электролитическом аноде (техническая вода) от тока разряда для различных значений диаметров медного катода и межэлектродных расстояний:

1 – $d_k=25$ мм, $l=3$ мм; 2 – $d_k=20$ мм, $l=2$ мм; 3 – $d_k=15$ мм, $l=5$ мм; 4 – $d_k=15$ мм, $l=3$ мм; 5 – $d_k=15$ мм, $l=2$ мм

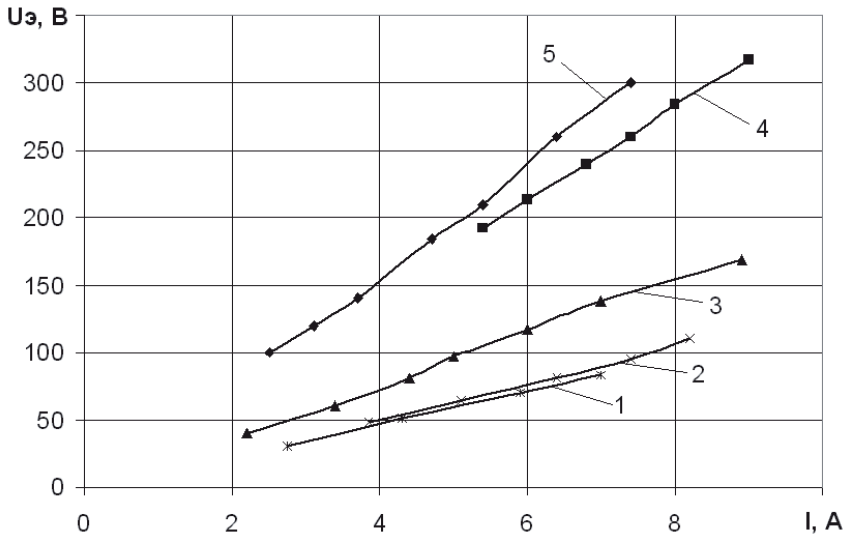


Рисунок 3.5 – Зависимость падения напряжения в электролитическом аноде (раствор NaCl) от тока разряда для различных значений диаметров металлического катода и межэлектродных расстояний

1 – катод – медь, $d_k=20$ мм, $l=3$ мм, анод – 0,1%-ый раствор NaCl; 2 – катод – медь, $d_k=20$ мм, $l=2$ мм, анод – 0,1%-ый раствор NaCl; 3 – катод – сталь 45, $d_k=20$ мм, $l=1$ мм, анод – 0,1%-ый раствор NaCl; 4 – катод – медь, $d_k=20$ мм, $l=2$ мм, анод – 0,05%-ый раствор NaCl; 5 – катод – сталь 45, $d_k=20$ мм, $l=1$ мм, анод – 0,05%-ый раствор NaCl

Анализ кривых рисунка 3.6 показывает, что падение напряжения на проточном электролитическом аноде не зависит от числа каналов струйного многоканального разряда. При увеличении тока разряда пропорционально увеличивается и число каналов разряда. Но при этом геометрические размеры одного канала уменьшаются и, следовательно, уменьшается площадь анодного пятна. Уменьшение площади анодного пятна приводит к

увеличению сопротивления одного канала. Но при этом появляется дополнительный канал, то есть, разряд можно рассмотреть как систему, состоящую из параллельно соединенных нескольких каналов. Увеличение числа каналов не приводит к увеличению полного сопротивления, оно остается неизменной, что можно увидеть на рисунке 3.6.

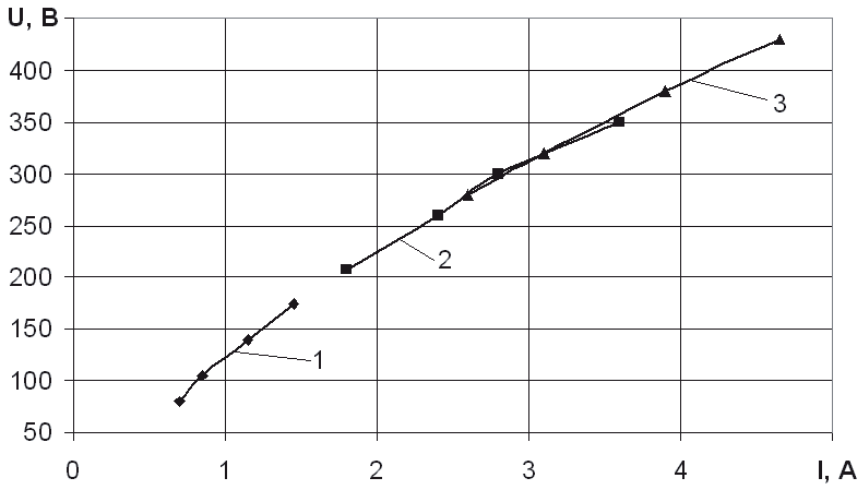


Рисунок 3.6 – Зависимость падения напряжения в электролитическом аноде (техническая вода) от тока разряда для разрядов с различными числами каналов

1 – с одним каналом; 2 – с двумя каналами; 3 – с тремя каналами

Наиболее важной интегральной характеристикой струйного многоканального разряда является его вольтамперная характеристика. По ней можно узнать о процессах, происходящих внутри разряда, и о свойствах плазмы. ВАХ разряда между проточным электролитическим анодом из технической воды и медным охлаждаемым катодом для различных

диаметров катода и межэлектродных расстояний представлены на рисунке 3.7. Сравнение кривых 1 и 2, 3 и 4 показывает влияние на характер ВАХ диаметра металлического катода: увеличение диаметра металлического катода и межэлектродного расстояния при одинаковых значениях силы тока разряда приводит к увеличению значения напряжения разряда.

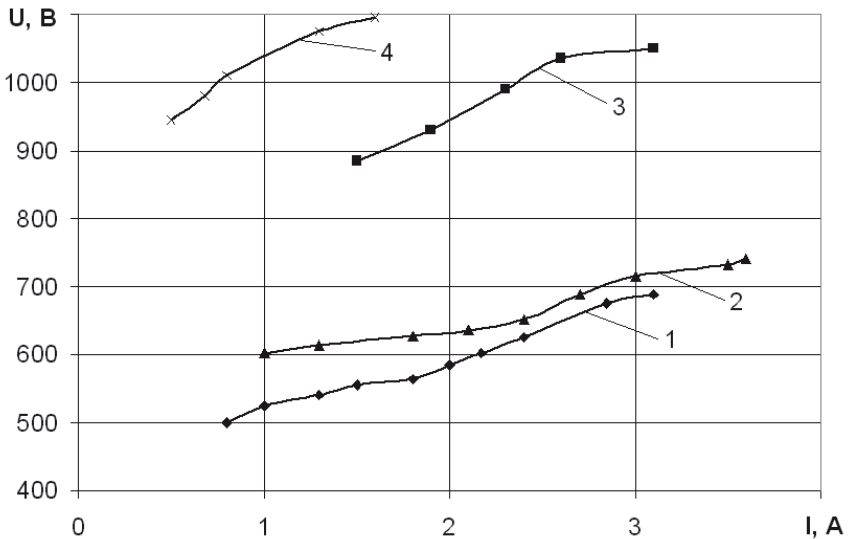


Рисунок 3.7 – Вольтамперная характеристика струйного многоканального разряда между проточным электролитическим анодом (техническая вода) и металлическим катодом (медь) для различных диаметров катода и межэлектродных расстояний

1 – $d_k=15$ мм, $l=2$ мм; 2 – $d_k=25$ мм, $l=2$ мм; 3 – $d_k=15$ мм, $l=5$ мм; 4 – $d_k=25$ мм, $l=5$ мм

Применение раствора NaCl различной концентрации в качестве проточного электролитического анода на характер ВАХ не влияет: все

кривые возрастающие (рисунок 3.8). Сравнивая кривые 1 и 2, 3 и 4 можно определить влияние концентрации раствора. Особенно это заметно, когда в качестве металлического охлаждаемого катода применяется сталь 45. На характер ВАХ большее влияние оказывает материал металлического катода при применении раствора NaCl меньшей концентрации. Увеличение концентрации раствора до 0,1% приводит к тому, что различие между значениями напряжения при одинаковых значениях тока разряда и различных материалах составляет менее 50 В.

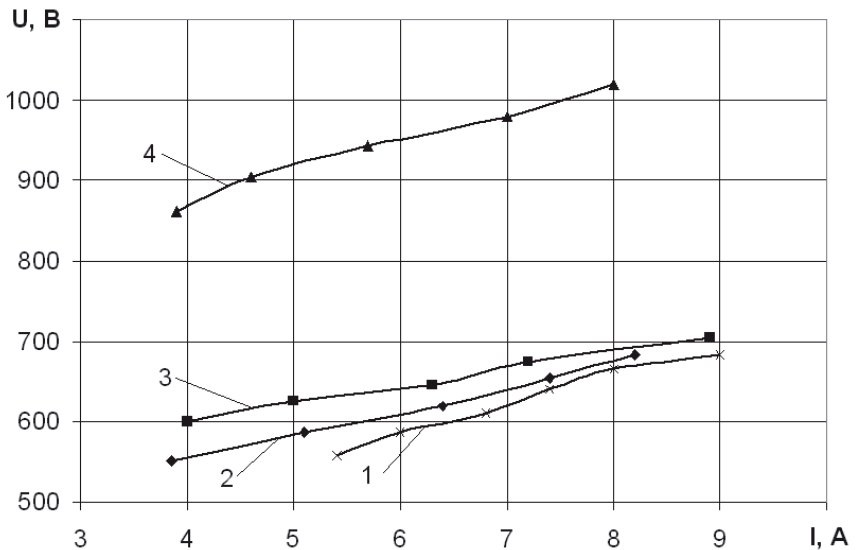


Рисунок 3.8 – ВАХ разряда между проточным электролитическим анодом (растворы NaCl) и охлаждаемым металлическим катодом для различных материалов катода и концентраций электролита

1 – анод – 0,1%-ый раствор NaCl, катод – медь; 2 – анод – 0,05%-ый раствор NaCl, катод – медь; 3 – анод – 0,1%-ый раствор NaCl, катод – сталь 45; 4 – анод – 0,05%-ый раствор NaCl, катод – сталь 45

На рисунке 3.9 представлена ВАХ разряда между проточным электролитическим анодом из технической воды и медным охлаждаемым катодом с различным числом каналов (1, 2 и 3). При этом межэлектродное расстояние поддерживалось постоянным. Изменяя значения тока разряда можно получить нужное количество каналов в струйном многоканальном разряде.

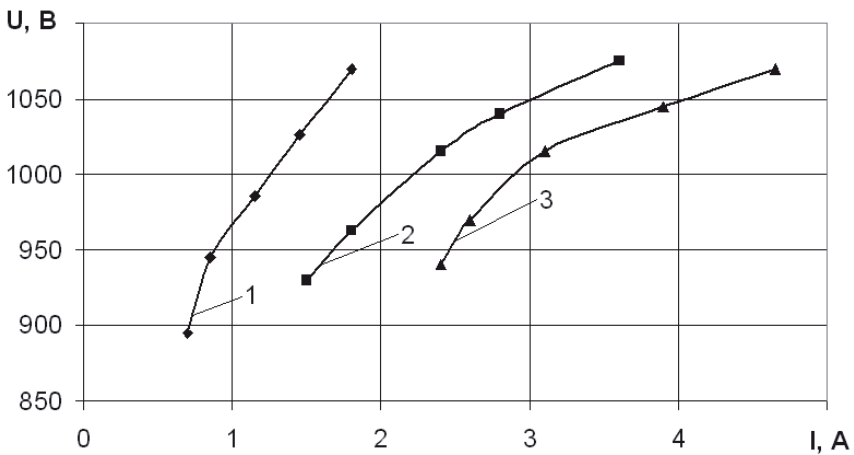


Рисунок 3.9 – ВАХ разряда между проточным электролитическим анодом из технической воды и медным катодом

1 – разряда с одним каналом; 2 – разряда с двумя каналами; 3 – разряд с тремя каналами

ВАХ разряда между проточным электролитическим анодом из технической воды и неохлаждаемым катодом из стали 45 при межэлектродном расстоянии 5 мм представлена на рисунке 3.10. Как видно из рисунка, ВАХ имеет немонотонный характер. После зажигания разряда с одним каналом, увеличение значения тока до $I=2,2$ А приводит к увеличению

каналов. При этом значение напряжения разряда не меняется. На торце металлического катода сталь переходит в жидкую фазу и принимает форму капли, что приводит к некоторому уменьшению межэлектродного расстояния. Разряд начинает протекать между расплавленным металлом-катодом и проточным электролитическим анодом. Дальнейшее увеличение тока разряда до 3 А приводит к увеличению напряжения разряда. При этом интенсивно выделяется ферромагнитный порошок. Увеличение тока разряда выше 3 А приводит к образованию на торце катода жидкого металла высотой до 5 мм и этот металл отрывается от электрода. Последний возрастающий участок на рисунке 3.10 соответствует резкому увеличению межэлектродного расстояния.

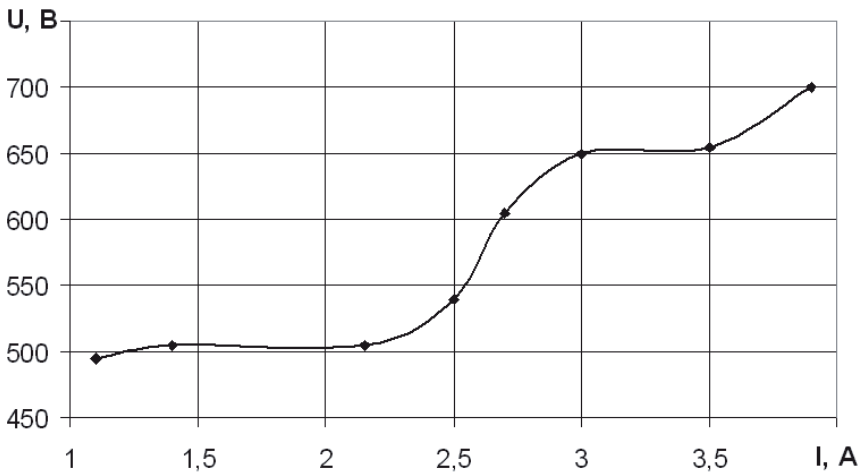


Рисунок 3.10 – ВАХ разряда между проточным электролитическим анодом из технической воды и стальным неохлаждаемым катодом при $l=5$ мм

Изменение глубины погружения токоподводящей пластины в проточном электролитическом аноде не оказывает влияние на характер ВАХ. При этом существенно изменяется только падение напряжения в проточном электролите.

3.3 Структуры струйного многоканального разряда

В качестве проточного электролитического анода использовали техническую воду, а металлическим неохлаждаемым катодом служила цилиндрическая сталь 45 диаметром от $d_k=5$ мм до $d_k=40$ мм. При межэлектродном расстоянии $l=1$ мм и диаметре металлического катода $d_k=5$ мм, напряжение пробоя составило $U_{np}=1500$ В. Это напряжение является минимальным для возникновения разряда, при меньшем напряжении и межэлектродном расстоянии разряд не возникает, а наблюдается электролиз вследствие замыкания проточного электролита на металлический катод. После возникновения разряда напряжение разряда составило $U=995$ В при токе разряда $I=1,5$ А и падении напряжения на проточном электролитическом аноде $U_{эл}=205$ В.

Минимальный ток, при котором горит разряд, составляет $I=0,3$ А. Разряд состоит из двух одинаковых каналов. Канал представляет собой правильный конус, вершину которого составляет ярко светящаяся контрагированная точка диаметром $d_{кт}=0,2$ мм на поверхности металлического катода. Нижняя поверхность конуса не доходит до поверхности проточного электролитического анода и находится на расстоянии 0,2 мм. Диаметр нижней части конусного канала составляет 3 мм. На поверхности проточного электролитического анода наблюдается ярко фиолетовое отражение нижней части конусного канала, так как этот канал не доходит до поверхности проточного электролитического анода (рисунок 3.11а, 3.12а).

Увеличение тока разряда до $I=0,75$ А приводит к появлению на поверхности металлического катода третьей контрагированной точки. При этом падение напряжения на проточном электролитическом аноде от $U_{эл}=35$ В увеличилось до $U_{эл}=103$ В, а напряжение разряда от $U=615$ В – до $U=797$ В. Эти увеличения электрических параметров разряда не привели к изменению формы канала разряда, а только изменились геометрические параметры канала: диаметр контрагированной точки достиг $d_{км}=0,4$ мм, диаметр нижней части конуса увеличился до 5 мм.

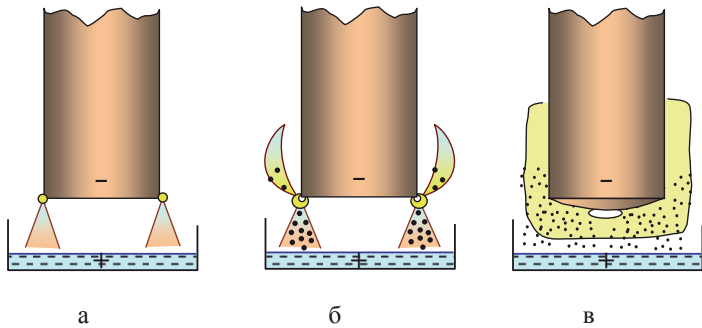
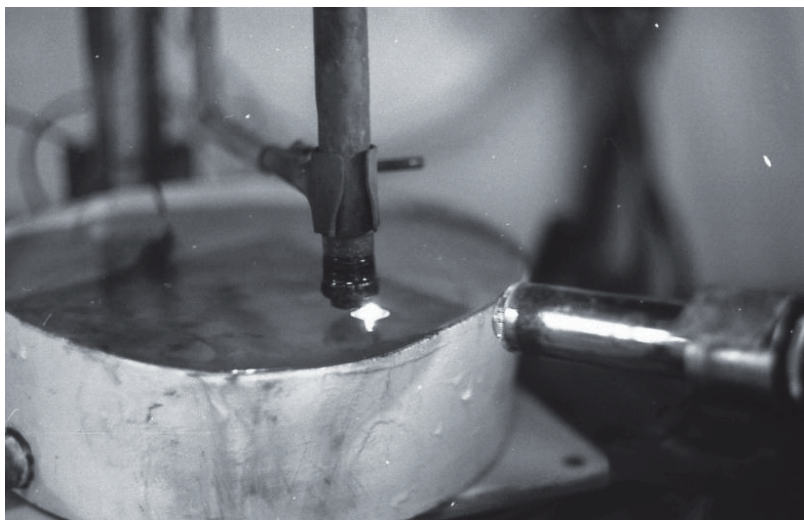


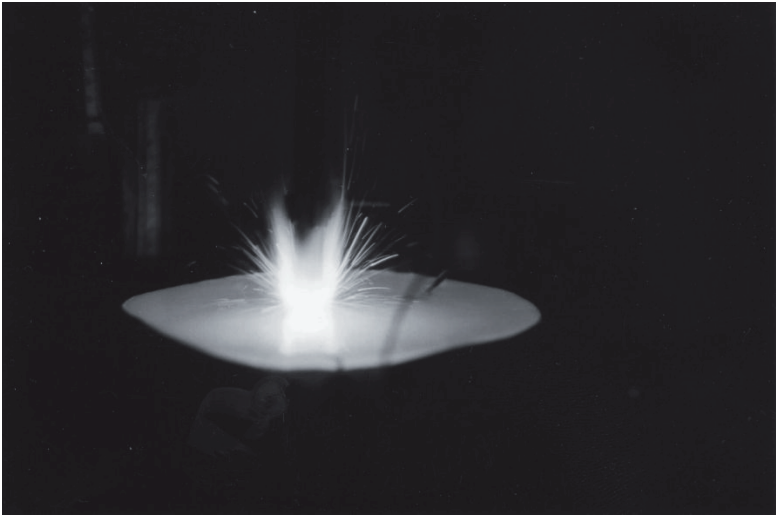
Рисунок 3.11 – Формы струйного многоканального разряда между проточным электролитическим анодом и неохлаждаемым металлическим (сталь 45) катодом



a



6



в

Рисунок 3.12 – Фото струйного многоканального разряда между проточным электролитическим и неохлаждаемым металлическим (сталь 45) катодом

При увеличении тока разряда до $I=1,23$ А металлический катод нагревается. Это приводит к резкому увеличению количества каналов (до 6-8). Контрагированные точки, которые являются вершинами этих конусных каналов, расположены по краям нижней окружности металлического катода. При этом напряжение разряда составляет $U=865$ В, а падение напряжения на проточном электролитическом аноде – $U_{эл}=160$ В. Размеры контрагированных точек на поверхности металлического катода остается неизменным, а диаметры нижней части конусного канала возрастает до 8 мм. Увеличение количества контрагированных точек и, соответственно, количества каналов, не нарушают симметричность расположения этих точек на поверхности металлического катода и каналов относительно друг друга. При данных электрических параметрах разряда на контрагированных точках

наблюдается расплавление металла и начинается слабое выделение оксидного порошка железа.

С ростом тока разряда до $I=2$ А каналы объединяются и укрупняются. Также меняется форма разряда. На поверхности металлического катода наблюдается 4-5 контрагированных точек диаметром $d_{кт}=1,2$ мм. Вокруг контрагированной точки появляется плазменный шлейф в форме ярко светящегося шара. Вершина конусного канала располагается на поверхности этого шара. Одновременно с конусным каналом появляется крюкообразная ореола желтого цвета, которая начинается от плазменного шлейфа. С увеличением диаметров контрагированных точек на поверхности металлического катода, увеличивается площадь расплавления металла и наблюдается более интенсивное выделение оксидного порошка железа. Напряжение разряда в данном случае составляет $U=940$ В, а падение напряжения на проточном электролитическом аноде – $U_{эл}=260$ В. (Рисунок 3.11б, 3.12б)

При токе разряда $I=2,6$ А, напряжении разряда $U=1000$ В, падении напряжения на проточном электролитическом аноде $U_{эл}=300$ В, интенсивность выделения оксидного порошка железа увеличивается. Это приводит к изменению формы нижней части металлического катода: электрод принимает полусферическую форму. Вследствие этого меняется форма разряда: контрагированные точки на поверхности металлического катода собираются в одну с диаметром $d_{кт}=5\div6$ мм. Эта точка находится в самой нижней части металлического катода. Конусный канал исчезает. Вся поверхность полусферы покрывается плазменным шлейфом. От этого плазменного шлейфа поднимается желтая ореола высотой до 80 мм. Вся нижняя поверхность металла переходит в расплавленное состояние и выделение оксидного порошка металла наблюдается со всей сферической поверхности металлического катода (рисунок 3.11в, 3.12в).

Дальнейшее увеличение тока разряда до $I=3$ А приводит к более интенсивному расплавлению металлического катода. Часть расплавленного катода, не успевая распыляться на оксидный порошок железа, в виде капли отделяется и попадает в электролит. Это приводит к значительному увеличению межэлектродного расстояния и вкладываемой электрической энергии не хватает для поддержания разряда.

При использовании в качестве металлического катода меди или алюминия, характер развития разряда не меняется. Критическим током для медного катода является $I=2,6$ А, для алюминиевого – $I=2,1$ А. В отличие от стального катода, при использовании медного или алюминиевого электрода не выделяется оксидный порошок этих металлов.

Изучено развитие катодных пятен на поверхности металлического катода и общая структура струйного многоканального разряда между электролитическим анодом и охлаждаемым металлическим катодом при атмосферном давлении. При малых межэлектродных расстояниях ($l=3$ мм) и небольших токах ($I=1$ А) наблюдается пятно, которое показано на рисунке 3.13а.

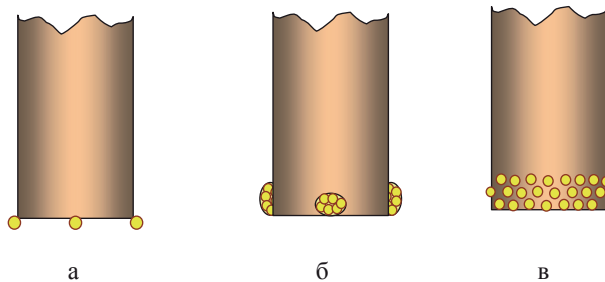
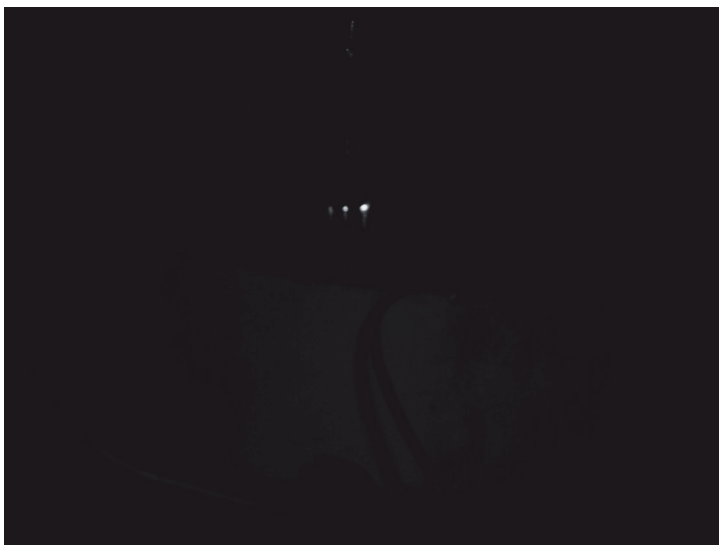
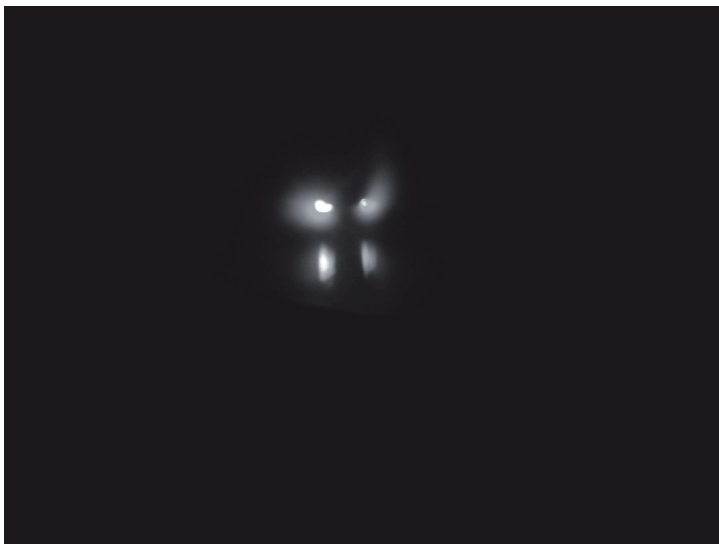


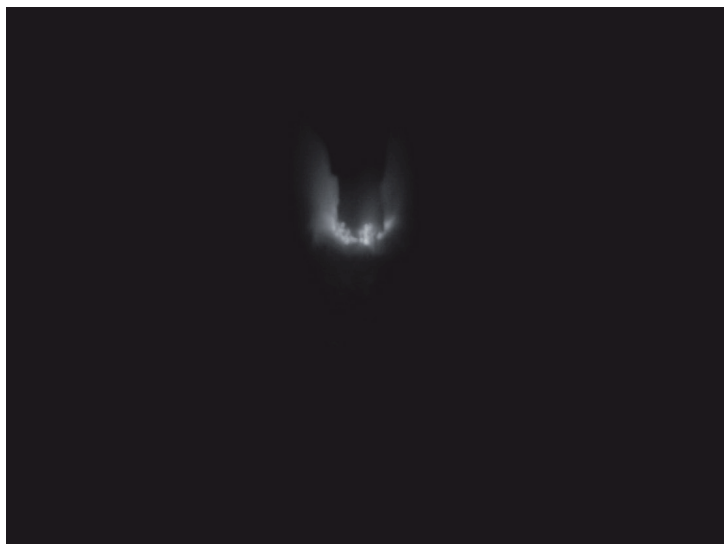
Рисунок 3.13 – Разновидности катодных пятен на поверхности металлического катода



a



b



в

Рисунок 3.14 – Фото разновидности катодных пятен на поверхности
металлического катода

На острой кромке металлического катода появляются от одного до пяти контрагированных точек в зависимости от тока разряда, которые позволяют образовать многоканальный разряд. Эти контрагированные точки могут вращаться по кромке катода как по часовой стрелке, так и против. Можно отметить, что контрагированные точки на острой кромке металлического катода располагаются симметрично относительно друг друга. При этом разряд имеет следующую структуру: от контрагированной точки в сторону электролитического анода опускается фиолетовый плазменный столб в форме правильного конуса (рисунок 3.15а, 3.16а).

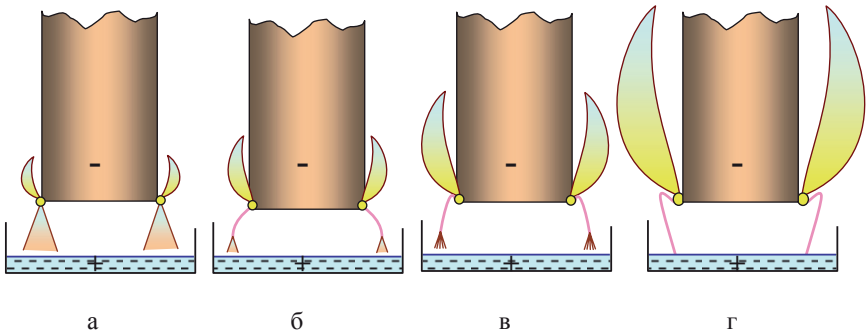
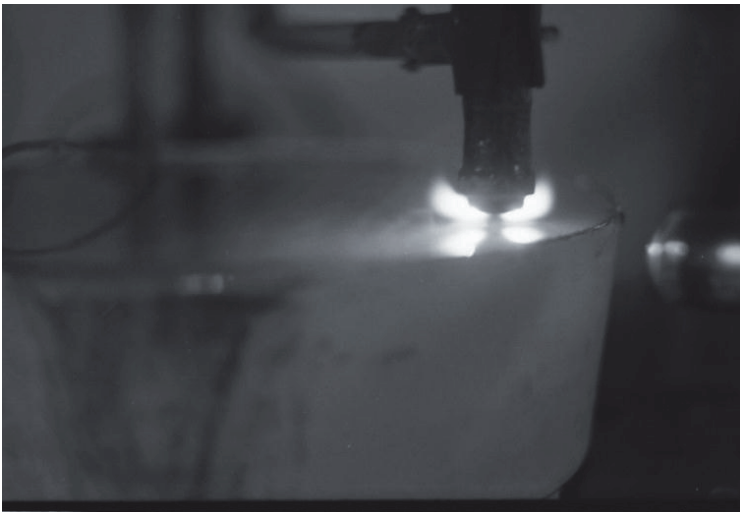
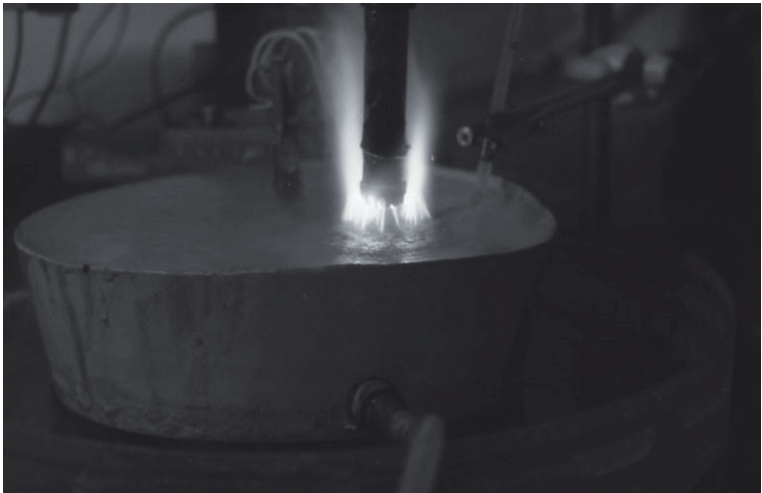


Рисунок 3.15 - Структура струйного многоканального разряда между охлаждаемым металлическим катодом и проточным электролитическим анодом в зависимости от изменений значений тока разряда и межэлектродного расстояния



а

6



B



Г

Рисунок 3.16 – Фото струйного многоканального разряда между охлаждаемым металлическим катодом и проточным электролитическим анодом в зависимости от изменений значений тока разряда и межэлектродного расстояния

Но основание этого конуса не достигает поверхности анода. Между плазменным столбом и электролитическим анодом остается некоторое расстояние. На поверхности анода можно наблюдать отражение нижней части плазменного столба фиолетового цвета. От контрагированной точки одновременно поднимается по боковой поверхности металлического катода ореол ярко-желтого цвета высотой 10-15 мм. С ростом тока до $I=2,5$ А и $l=10$ мм, контрагированная точка начинает распадаться и состоит из нескольких микроточек, объединенных между собой (рисунок 3.13б). Таких

объединений на кромке катода наблюдается несколько. При этом меняется и структура разряда: из этих микроточек вырастает одиночный канал. Этот канал отодвигает конусный плазменный столб вниз (рисунок 3.14б). Здесь также наблюдается некоторое пространство между плазмой и электролитическим анодом. По боковой поверхности металлического катода высота плазменной ореолы достигает до 30 мм. Увеличение межэлектродного расстояния до $l=15$ мм приводит к изменению структуры разряда (рисунок 3.14в). Конус на нижней части одинарного канала разделяется на несколько маленьких каналов. При этом на поверхности металлического катода изменений не наблюдается. Увеличение тока разряда до $I=5$ А приводит к распаданию контрагированных микроточек по всей боковой поверхности металлического катода. Их количество резко возрастает до нескольких десятков и они хаотично передвигаются относительно друг-друга по всей боковой поверхности металлического катода (рисунок 3.13в). На нижней поверхности катода эти контрагированные точки не наблюдались. С каждой точки возникают одинарные каналы и эти каналы достигают поверхности электролитического анода (рисунок 6г). Площадь, образованная этими каналами на поверхности электролитического анода, в 3÷4 раза больше площади нижней части металлического катода. При этом всю боковую поверхность катода охватывает плазменная ореола ярко-желтого цвета, высота которой достигает до 100 мм. Изменение состава и концентрации электролитического анода и материала металлического катода на развитие катодных пятен и структуры разряда существенно не влияет.

3.4 Особенности границы раздела между плазмой и проточным электролитическим анодом

Изучено состояние границы раздела между плазмой и электролитическим анодом. Выявлено различные формы возмущения

поверхности границы «плазма-электролит». Были определены следующие состояния границы: при величине тока разряда до $I=1,5$ А наблюдается гладкая поверхность. Увеличение тока разряда до $I=2,2$ А на поверхности электролитического анода наблюдается одинарная уединенная волна, направленная от центра (рисунок 3.17а, 3.18а). При достижении тока 2,5 А на поверхности металлического катода образуются контрагированные точки, которые являются источником канала разряда. С каждого разрядного канала генерируется колебание поверхности электролита, которые объединяются в один (рисунок 3.17б, 3.18б). Разрядный ток $I=4,1$ А является критическим для турбулентности. В этом случае, под действием разряда, показанного на рисунке 3.15в, 3.16в на поверхности электролитического анода появляется регулярная поверхностная рябь (рисунок 3.17в, 3.18в). Площадь области, обхваченной рябью, практически не превышает подкатодное пространство на поверхности проточного электролитического анода. Рябь переходит в бурлящую вспененную зону турбулентного перемешивания при токе разряда $I=5$ А. При этом площадь этой зоны в $2,5 \div 3$ раза больше рабочей нижней площади металлического катода при $3 \div 4$ мм межэлектродного расстояния (рисунок 3.17г, 3.18г), которая постепенно переходит на слабую рябь к краям электролитической ванны. С ростом межэлектродного расстояния пропорционально возрастает площадь бурлящей вспененной зоны вплоть до краев электролитической ванны.

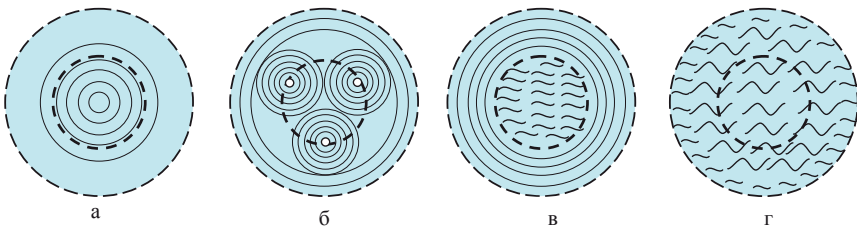
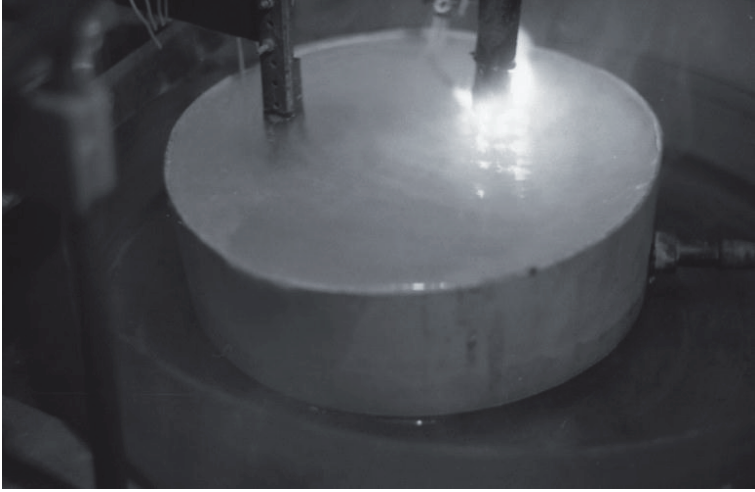


Рисунок 3.17 – Структура границы раздела «плазма-электролит»



a





в



г

3.18 – Фото границы раздела между плазмой и электролитическим анодом

3.5 Распределение потенциала и напряженность электрического поля

Изучение распределения потенциала и напряженности электрического поля имеет огромное значение для понимания физических процессов, происходящих как в плазменном столбе, так и в приэлектродных областях струйного многоканального разряда. В данной работе представлены результаты исследования распределения потенциала и напряженности электрического поля при атмосферном давлении для различных материалов металлического катода (сталь 45, М1), состава и концентрации проточного электролитического анода.

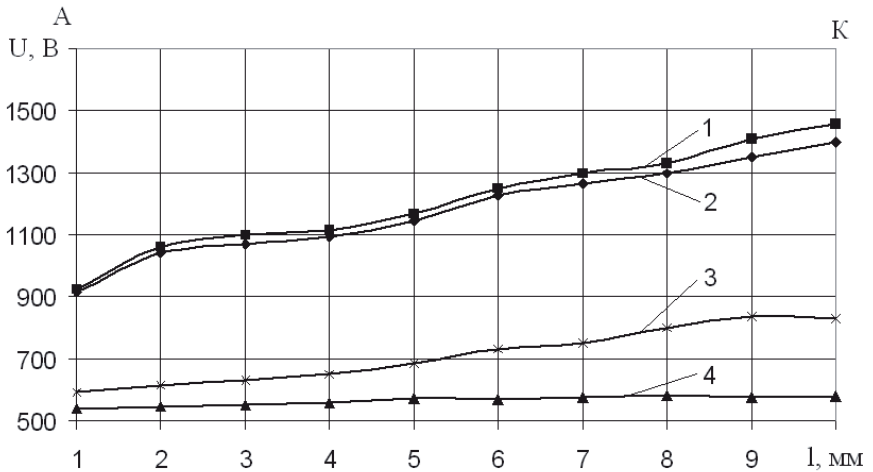


Рисунок 3.19 – Распределение потенциала на оси разряда между проточным электролитическим анодом и металлическим охлаждаемым катодом

1 – катод – сталь 45, анод – техническая вода, $I=3,5$ А; 2 – катод – сталь 45, анод – техническая вода, $I=3$ А; 3 – катод – медь, анод – 0,05%-ый раствор NaCl, $I=3$ А; 4 – катод – сталь 45, анод – 0,1%-ый раствор NaCl, $I=3$ А

Распределение потенциала на оси разряда между проточным электролитическим анодом и металлическим охлаждаемым катодом приведено на рисунке 3.19. Как видно из рисунка, все кривые имеют возрастающий характер. Максимальное значение наблюдается непосредственно возле металлического охлаждаемого катода.

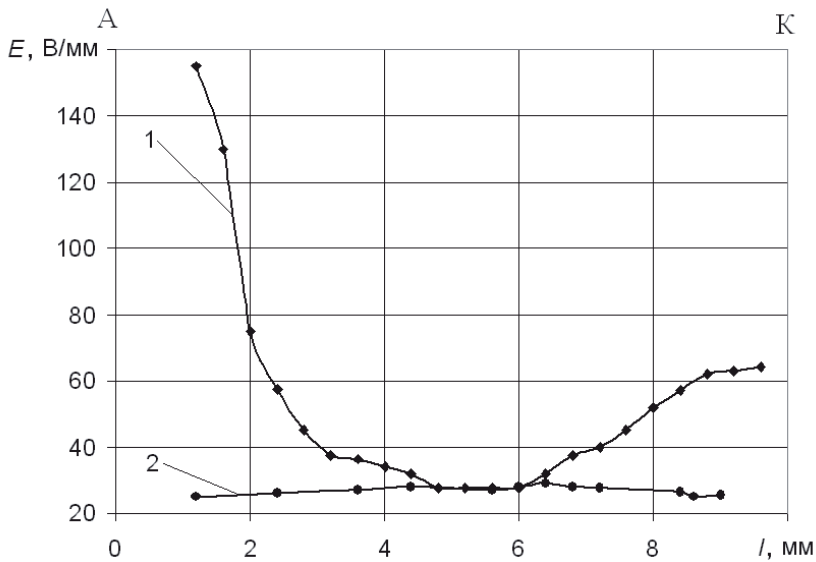


Рисунок 3.20 – Напряженность электрического поля разряда между проточным электролитическим анодом и металлическим охлаждаемым катодом

1 – катод – сталь 45, анод – техническая вода, $I=3,5$ А; 2 – катод – медь, анод – 0,1%-ый раствор NaCl, $I=3$ А

На рисунке 3.20 приведены зависимости напряженности электрического поля разряда между проточным электролитическим анодом

(техническая вода, 0,1-ый раствор NaCl) и охлаждаемым металлическим катодом (сталь 45, М1) от межэлектродного расстояния. При использовании технической воды, максимальная напряженность наблюдается непосредственно возле электролитического анода. До расстояния 5 мм от поверхности электролита наблюдается падение напряженности. Вблизи металлического катода напряженность возрастает до 65 В/мм. Колебание напряженности поля от 25 до 27 В/мм объясняется применением 0,1%-го раствора NaCl в качестве проточного электролитического анода.

3.6 Плотность тока на металлическом катоде и электролитическом аноде

Важнейшими параметрами электрического разряда являются значения плотности тока на катоде и аноде. Сначала рассмотрим зависимость плотности тока на металлическом катоде. На рисунке 3.21 представлена зависимость плотности тока на металлическом катоде от тока разряда для охлаждаемого и неохлаждаемого катода. В данном случае проточным электролитическим анодом служила техническая вода (кривые 1 и 2) и 0,1%-ый раствор NaCl (кривая 3), катод – сталь 45.

При случае с неохлаждаемым металлическим катодом (кривая 1), сначала наблюдается резкое падение плотности тока с увеличением тока разряда. Разряд имеет форму, изображенную на рисунке 3.11а. В диапазоне тока разряда от 1,23 А до 2,6 А кривая принимает более плавный падающий характер. Это связано с началом процесса выделения оксидного порошка железа (рисунок 3.11б). Закон Геля выполняется в интервале тока разряда $2,6 \leq I \leq 3$ А, который соответствует оптимальному режиму получения ферромагнитного порошка. При использовании охлаждаемого металлического катода, зависимость плотности тока от тока разряда имеет немонотонный характер (кривая 2).

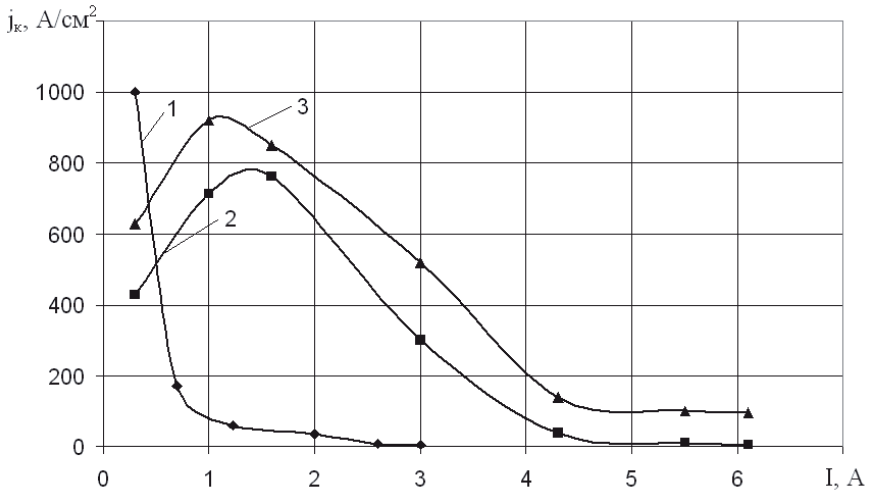


Рисунок 3.21 – Зависимость плотности тока на металлическом катоде от тока разряда

1 – неохлаждаемый катод, анод – техническая вода; 2 – охлаждаемый катод, анод – техническая вода; 3 – охлаждаемый катод, анод – 0,1%-ый раствор NaCl

С ростом тока разряда до 1,3 А увеличивается плотность тока на металлическом катоде. В данном случае протекает разряд, приведенный на рисунке 3.15а. Переход струйного многоканального разряда в следующую форму (рисунок 3.15б, в) приводит к уменьшению плотности тока с увеличением тока разряда до 4,5 А. Дальнейшее увеличение тока разряда не приводит к увеличению плотности тока на охлаждаемом металлическом катоде. Применение в качестве проточного электролитического анода 0,1%-го раствора NaCl не приводит к изменению характера зависимости плотности тока от тока разряда. При одинаковых значениях тока разряда величина

плотности тока в среднем на 200 A/cm^2 больше, чем при использовании технической воды.

Важным параметром для понимания физических процессов, происходящих на границе раздела проточного электролитического анода и плазмы является плотность тока на проточном электролитическом аноде. Зависимость плотности тока на проточном электролитическом аноде из технической воды и 0,1%-го раствора NaCl от тока разряда приведена на рисунке 3.22. Характер изменения кривой I в данном случае соответствует характеру изменения кривой I рисунка 3.21. Если максимальное значение плотности тока на металлическом катоде составляло 1000 A/cm^2 , то на поверхности проточного электролитического анода оно составляет $4,6 \text{ A/cm}^2$. Это прежде всего связано с проводимостью электродов. Использование охлаждаемого электрода в качестве металлического катода также не приводит к изменению характера зависимости плотности тока на электролитическом аноде от тока разряда. Также пиковое значение ($j_a=2,7 \text{ A/cm}^2$) наблюдается при токе разряда 1,3 А. Использование 0,1%-го раствора NaCl приводит к некоторому увеличению плотности тока на проточном электролитическом аноде при одинаковых значениях тока разряда.

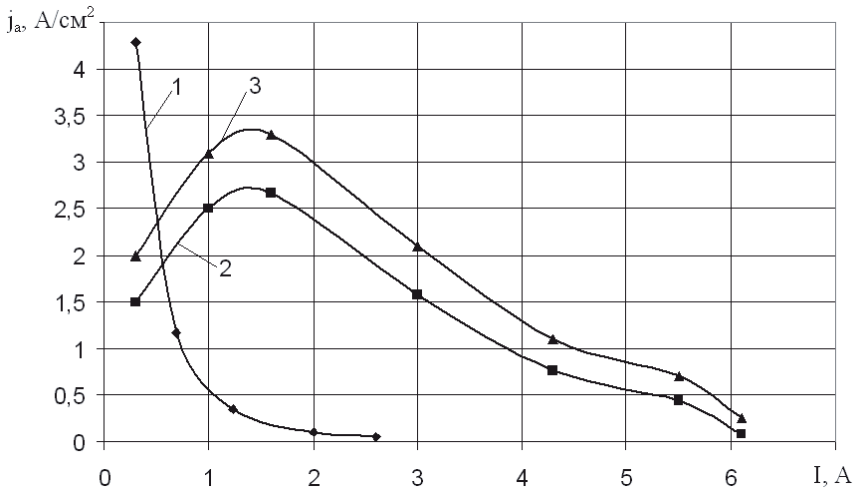


Рисунок 3.22 – Зависимость плотности тока на поверхности проточного электролитического анода от тока разряда

1 – неохлаждаемый катод, анод – техническая вода; 2 – охлаждаемый катод, анод – техническая вода; 3 – охлаждаемый катод, анод – 0,1%-ый раствор NaCl

3.7 Обобщенные вольтамперные характеристики струйного многоканального разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом

Известные критериальные обобщения вольтамперных характеристик относятся к дугам, стабилизированным в канале с потоком газа [121-123 и др.]. Теоретической основой таких обобщений является теория подобия и размерности. Для дуг в плазмотронах определены критериальные уравнения, необходимые для построения обобщенных вольтамперных характеристик. Получены соответствующие эмпирические формулы, позволяющие рассчитывать характеристики разряда в широком диапазоне изменения тока,

давления, расхода газа и геометрических размеров разрядной камеры [121-123]. Основные критерии свободных дуг были определены в [121]. Там же приведена обобщенная вольтамперная характеристика для дуг при атмосферном давлении. В последние годы эти методы начали применять к обобщению результатов экспериментальных исследований парогозовых разрядов между металлическим и электролитическим электродами [53, 64, 76, 95].

Рассмотрим критериальные уравнения, необходимые для обобщения характеристик многоканального разряда между проточным электролитическим катодом и металлическим анодом при отсутствии вынужденной конвекции. Будем считать, что у сравниваемых разрядов межэлектродные промежутки являются электрически подобными, т.е. $\Omega/l = \text{const}$, Ω – характерный размер электрода, l – межэлектродное расстояние.

Металлические электроды изготовлены из одинакового материала. В экспериментах использовался проточный электролит, поэтому свойство электролита во всех экспериментах одинаков. Температуры окружающих газов сравниваемых разрядов и температуры одноименных электродов одинаковы. Эти допущения позволяют исключить из рассмотрения ряд постоянных критериев подобия.

В этих условиях безразмерные интегральные характеристики разряда Ψ в первом приближении являются функциями определяющих критериев подобия и записываются в виде

$$\Psi = f_1 \left(\frac{I^2}{l^{1.5} g^{0.5} \chi_R T_R}, \frac{l P Q_{el}}{k T_R} \right) \quad (3.1)$$

где χ_R – теплопроводность исходного газа при температуре T_R , T_R – температура окружающего газа, g – ускорение земного тяготения, l –

межэлектродное расстояние, k – постоянная Больцмана, I – ток разряда, Q_{el} – сечение столкновения электрона с молекулой.

Локальные безразмерные характеристики разряда зависят и от размерных координат:

$$\bar{r} = \frac{r}{l}, \quad \bar{y} = \frac{y}{l}$$

где r и y расстояние до данной точки соответственно от оси разряда и поверхности проточного электролитного катода. Поэтому распределения безразмерных параметров разряда Ψ_I , описывается критериальными уравнениями

$$\Psi_1 = \left(\frac{I^2}{l^{1.5} g^{0.5} \chi_R T_R}, \frac{l P Q_{ea}}{k T_R}, \frac{r}{l}, \frac{y}{l} \right) \quad (3.2)$$

критерия подобия

$$\frac{I^2}{l^{1.5} g^{0.5} \chi_R T_R}$$

достаточно подробно рассмотрен в [121]. В [121] он был использован для обобщения ВАХ открытых дуг и в [57] – для обобщения ВАХ разряда между металлическим анодом и электролитическим катодом. Критерий подобия

$$\frac{l P Q_{ea}}{k T_R}$$

представляет собой обратное значение числа Кнудсена для электронов. Это следует из того, что средняя длина свободного пробега электрона определяется как

$$\lambda_e = \frac{1}{n_a Q_{ae}} = \frac{kT_R}{PQ_{ea}}$$

В работе [57] значение давления было постоянным, а величина межэлектродного расстояния изменялась незначительно. Поэтому влияние числа Кнудсена на обобщённые характеристики разряда осталось не выявленным. В экспериментах данной работы число Кнудсена изменялось, что должно позволить установить его роль в обобщенных характеристиках.

Безразмерное напряжение можно определить как

$$\bar{U} = \frac{U_p I^{0.5} g^{0.5}}{I}$$

В первом приближении величины g , T_R , χ_R , Q_{ea} можно считать постоянным. Наши эксперименты проводились только при атмосферном давлении. Отбросив постоянные размерные комплексы в (3.1) и (3.3), уравнение ВАХ разряда представим в виде степенной зависимости

$$\frac{U_p I^{0.5}}{I} = C \left(\frac{I}{I^{0.75}} \right)^\alpha \quad (3.4)$$

Критериальное уравнение (3.4) для обобщения ВАХ многоканального разряда в широком диапазоне тока и межэлектродного расстояния. Логарифмируя (3.4) и применяя метод наименьших квадратов для среднеквадратичного отклонения искомого функционала от

экспериментальных точек, находим эмпирические формулы для расчета неизвестных C, α .

При помощи пакета программ Excel и MathCad для разряда между проточным электролитическим анодом из 0,05 %-го раствора NaCl и металлическим анодом из материала сталь 45 получили обобщенное критериальное уравнение в виде:

$$\frac{U \cdot I^{0,5}}{I} = 381,2 \left(\frac{I}{I^{0,75}} \right)^{-0,7} \quad (3.5)$$

где $C=381,2 \text{ A}^{-0,3} \cdot \text{В} \cdot \text{м}^{0,55}$.

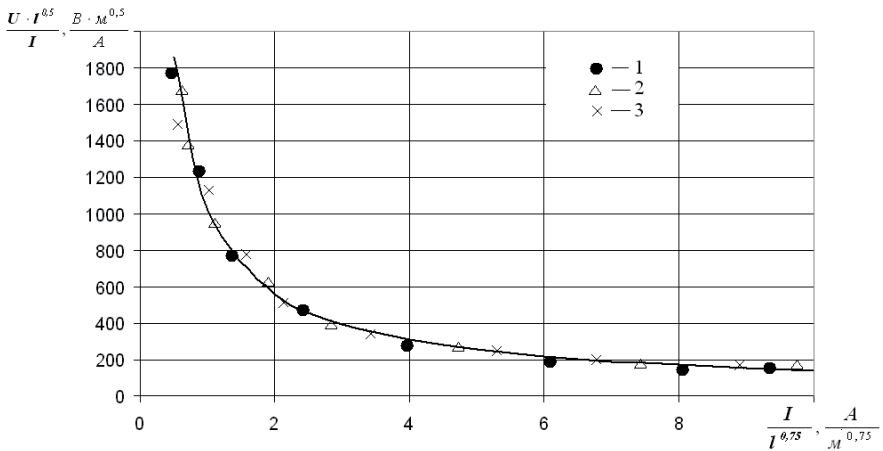


Рисунок 3.23 – Обобщенная вольтамперная характеристика струйного многоканального разряда между проточным электролитическим анодом (0,05 %-ый раствор NaCl) и металлическим охлаждаемым катодом (сталь 45)
 $1 - l=5$ мм; $2 - l=10$ мм; $3 - l=15$ мм

На рисунке 3.23 представлена зависимость $\frac{U \cdot I^{0,5}}{I}$ от параметра $\frac{I}{I^{0,5}}$, определенная уравнением (3.5). Также на этом рисунке приведены некоторые экспериментальные данные для значений напряжения разряда, межэлектродного расстояния и тока разряда в диапазоне параметров $600 \leq U \leq 1500$ В, $5 \leq l \leq 15$ мм, $2 \leq I \leq 10$ А.

Изменение концентрации проточного электролитического анода до 0,1 % и использование вместо стали 45 медного охлаждаемого катода приводит к изменению обобщенной вольтамперной характеристики, приведенной на рисунке 3.24.

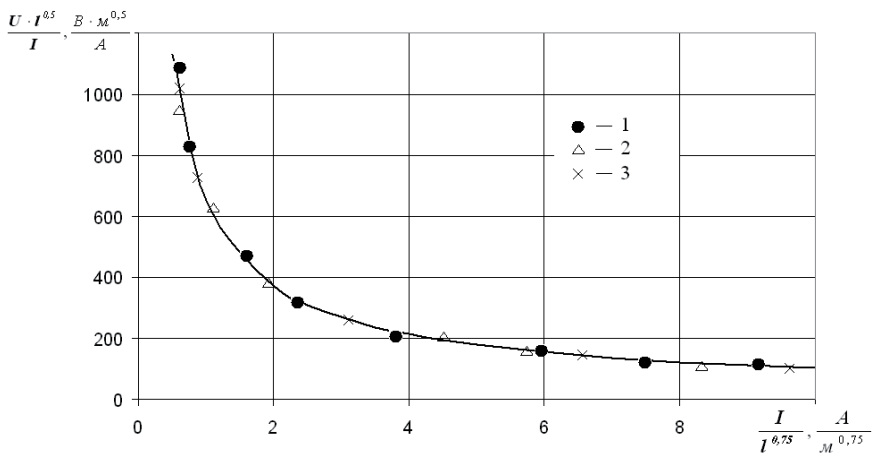


Рисунок 3.24 – Обобщенная вольтамперная характеристика струйного многоканального разряда между проточным электролитическим анодом (0,1%-ый раствор NaCl) и медным охлаждаемым катодом
 $1 - l=5$ мм; $2 - l=10$ мм; $3 - l=15$ мм

Данная вольтамперная характеристика описывается критериальным уравнением:

$$\frac{U \cdot I^{0,5}}{I} = 650,4 \left(\frac{I}{I^{0,75}} \right)^{-0,8} \quad (3.6)$$

где $C=381,2 \text{ A}^{-0,2} \cdot \text{В} \cdot \text{м}^{0,45}$.

Зависимость $\frac{U \cdot I^{0,5}}{I}$ от параметра $\frac{I}{I^{0,75}}$, определенная уравнением

$$\frac{U \cdot I^{0,5}}{I} = 381,2 \left(\frac{I}{I^{0,75}} \right)^{-0,7} \quad (3.7)$$

представлена на рисунке 3.25.

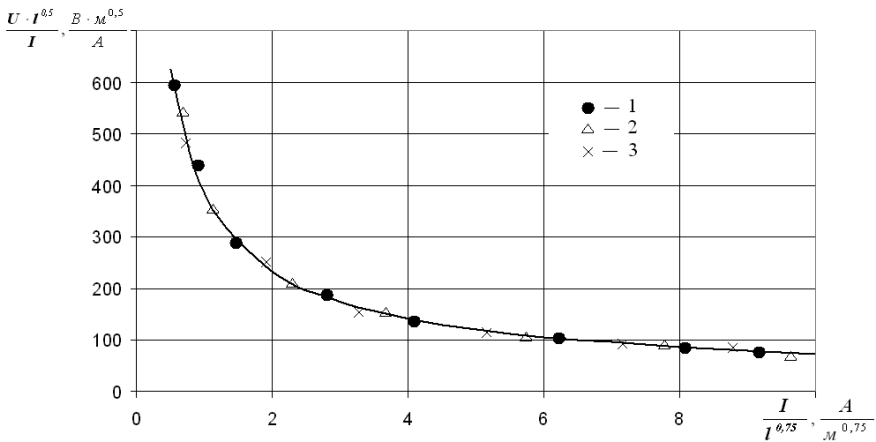


Рисунок 3.25 - Обобщенная вольтамперная характеристика струйного многоканального разряда между проточным электролитическим анодом (техническая вода) и медным охлаждаемым катодом

$1 - l=5 \text{ мм}; 2 - l=10 \text{ мм}; 3 - l=15 \text{ мм}$

В данном случае охлаждаемым металлическим катодом служила медь марки М1. В качестве проточного электролитического анода использовалась техническая вода. В данном случае коэффициент C равняется $381,2 \text{ A}^{-0,3} \cdot \text{В} \cdot \text{м}^{0,55}$.

Максимальное среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений напряжения разряда от полученных эмпирических уравнений (3.5), (3.6) и (3.7) составляет 10÷15%, поэтому эти критериальные уравнения можно использовать при расчетах плазменных установок с проточным электролитическим катодом.

Глава 4

Устройства для получения струйного многоканального разряда с проточным и непроточным электролитическим анодом и методики обработки поверхности изделий

В данной главе описано устройство для получения струйного многоканального разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом. При помощи данного устройства можно осуществлять нагрев, резку материалов, сварки пластин толщиной 0,5 мм и упрочнение поверхностей металлических изделий. Применением многофакторного планирования эксперимента разработана методика получения оксидного порошка железа. Также в данной главе описаны методики упрочнения и очистки поверхности металлических изделий при помощи струйного многоканального разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом. Результаты исследований описаны в работах [116, 125-129].

4.1 Устройство для получения струйного многоканального разряда с проточным электролитическим анодом

Известны способы и устройства для получения самостоятельного тлеющего разряда при атмосферном давлении между металлическими электродами [18, 70]. Недостатком этих устройств является сложность их создания. Известно также устройство для получения самостоятельного тлеющего разряда между электролитическим катодом и металлическим анодом [64]. Недостатком этого способа является то, что низкая устойчивость тлеющего разряда с контрагированным пятном на поверхности анода и распределенными пятнами на электролитическом катоде. В связи с этим ограничено практическое применение. Устройство для получения

одноструйного и многоструйного многоканального разряда между проточным электролитическим катодом и металлическим анодом описано в [124]. В [78] приведены устройства для получения паровоздушного разряда, порошка из стали, для упрочнения металлического катода. Величина тока разряда в данных установках не превышает 1 А.

Разработанное устройство для получения струйного многоканального разряда отличается простотой конструкции. Устройство представляет из себя полый цилиндр. Диаметр нижней внутренней части на 3÷5 мм меньше наружного диаметра (рисунок 4.1). Внутренняя часть устройства изготовлена в форме усеченного конуса. В целях увеличения долговечности, устройство выполняется охлаждаемым. Для охлаждения используется водопроводная вода.

Струйный многоканальный разряд возникает между нижней кромкой устройства и проточным электролитическим анодом. В зависимости от тока разряда, на торце катода-устройства появляются от 3 до 15 контрагированных точек, которые расположены симметрично между собой. Увеличение межэлектродного расстояния до 10 мм и тока разряда до 10 А приводит к появлению плазменного столба (1). При использовании открытой электролитической ванны этот столб направляется не только во внутреннюю часть устройства, а поднимается также и по боковой поверхности. Для избежания этого явления и, соответственно, потерь, применяется диэлектрический материал (2), который позволяет собрать плазменный столб в одну объединенную плазменную струю. Изменение внутреннего диаметра верхней части устройства дает возможность регулировать не только диаметра плазменной струи, но и высоту.

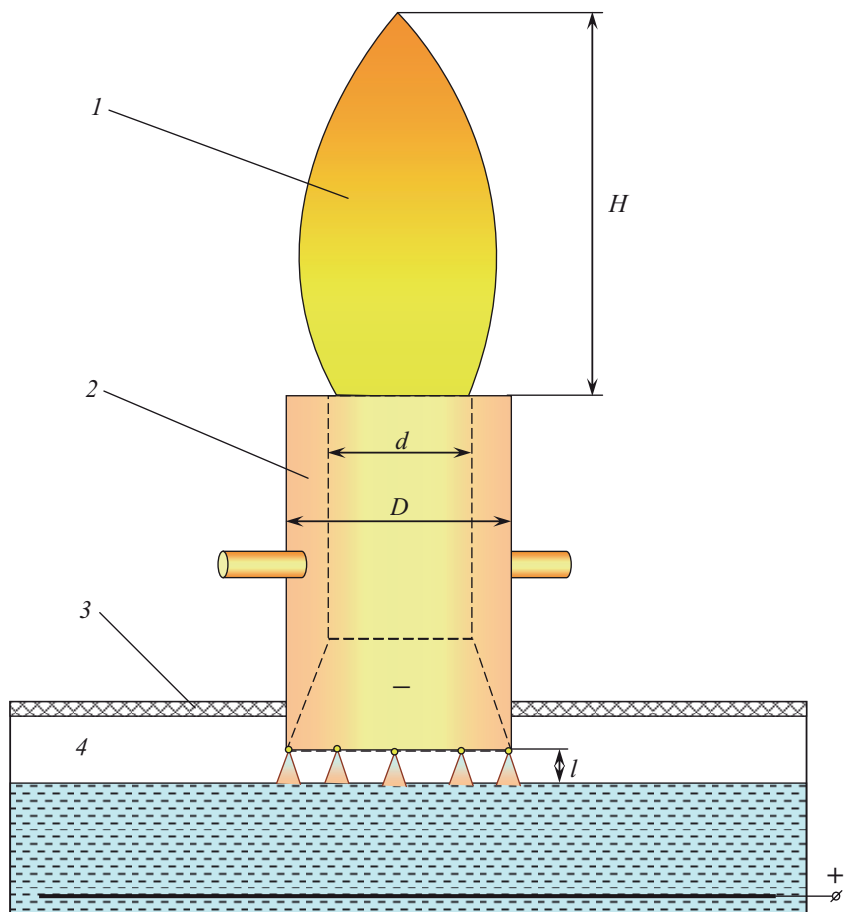


Рисунок 4.1 – Устройство для получения струйного многоканального разряда с проточным электролитическим анодом

1 – плазменная струя; 2 – устройство-катод; 3 – диэлектрический материал; 4 – электролитическая ванна с электролитом и токоподводящей пластиной

Вольтамперная характеристика устройства для получения струйного многоканального разряда с проточным электролитическим анодом из технической воды при различных межэлектродных расстояниях представлена на рисунке 4.2. Как видно из графика, увеличение межэлектродного расстояния при неизменной силе тока разряда приводит к увеличению напряжению разряда. Эти изменения влияют на параметры устройства.

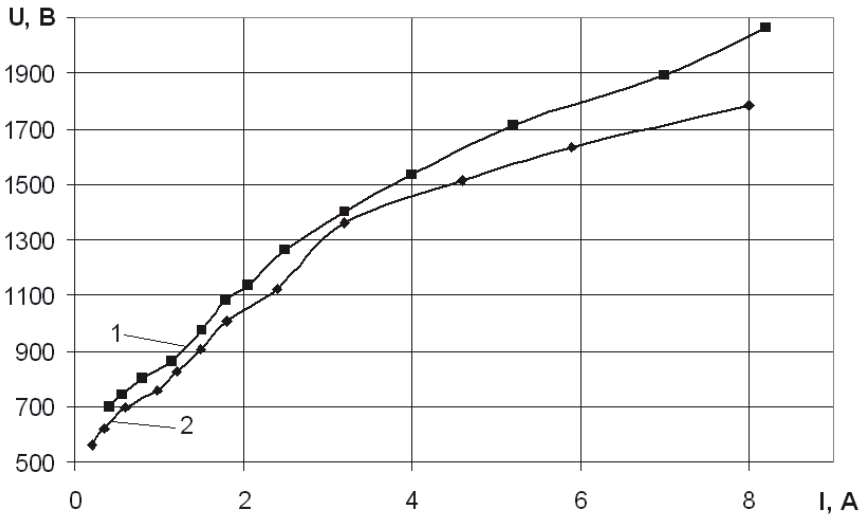


Рисунок 4.2 – Вольтамперная характеристика устройства для получения струйного многоканального разряда с проточным электролитическим анодом при различных межэлектродных расстояниях:

1 – $l=10$ мм; 2 – $l=5$ мм

Одним из важных параметров данного устройства является температура плазменной струи. Зависимость температуры плазменной струи

от диаметра струи представлена на рисунке 4.3. Температура в плазменной струе измерялось термопарой типа ТПП группы ПП и ТПР (условные обозначения градуировок ПП-1 и ПР 30/6) и вторичным прибором класса точности 0,05. Данная термопара позволяет измерять температуру до 2600 К. При расстоянии 60 мм от поверхности устройства в центре струи термопара расплавилась. На рисунке 4.3 пунктирными линиями показана температура, полученная при помощи математической аппроксимации. Как видно из этого графика, максимальная температура струи возникает около поверхности устройства и достигает 5200 К.

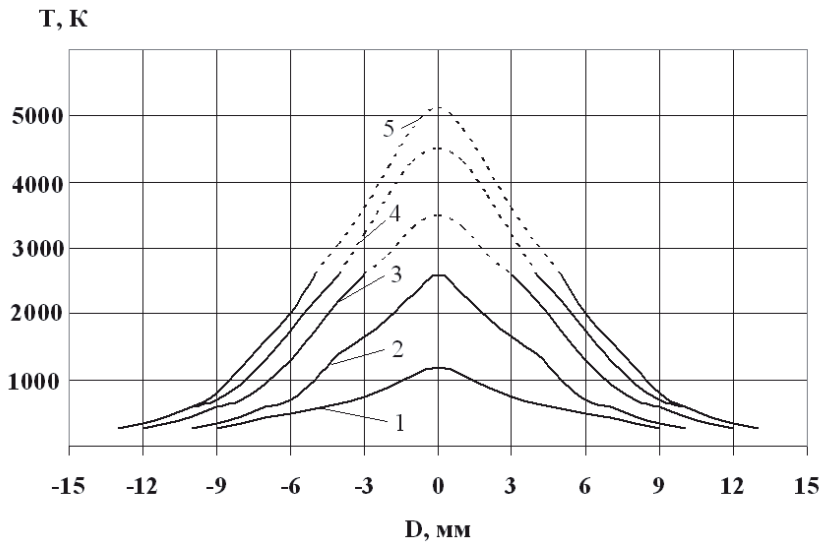


Рисунок 4.3 – Зависимость температуры плазменной струи от диаметра струи для различных расстояний от поверхности устройства:

1 – 100 мм; 2 – 80 мм; 3 – 60 мм; 4 – 40 мм; 5 – 20 мм

Из рисунка 4.3 видно, что максимальная температура достигается непосредственно над поверхностью устройства.

Также можно отметить, что длина плазменной струи над поверхностью устройства существенно зависит от межэлектродного расстояния, тока разряда и температуры проточного электролита. Зависимость длины струи над поверхностью устройства от межэлектродного расстояния представлена на рисунке 4.4. Как видно из графика, максимальная высота плазменной струи достигается при межэлектродном расстоянии $l=5$ мм. При этом использовалась разрядная камера следующих размеров: наружный диаметр $D=32$ мм; внутренний диаметр $d=15$ мм; высота $H=70$ мм. Эти размеры получены экспериментальным путем и являются оптимальными для данной разрядной камеры. Изменение внутреннего диаметра разрядной камеры приводит к уменьшению высоты плазменного столба.

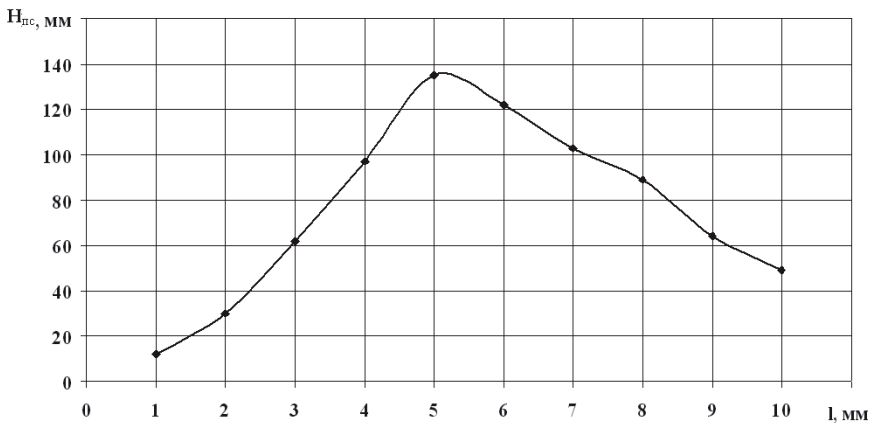


Рисунок 4.4 – Зависимость высоты плазменной струи от межэлектродного расстояния

4.2 Методика получения оксидного порошка железа (Fe_3O_4)

Процесс получения ферромагнитного порошка достаточно подробно описан в [95]. Также этот вопрос подробно рассмотрен в [78, 79]. В этих работах электролитом являлся катод. В нашем случае электролит являлся анодом, а в качестве металлического катода применялся сталь 45 цилиндрической формы. Диаметр металлического катода варьировался от 10 до 40 мм. В зависимости от диаметра металлического катода, межэлектродное расстояние устанавливали в пределах $2 \leq l \leq 10$ мм. Ток разряда увеличивали в пределах от 1,5 до 5 А. При малых токах разряда прекращается распыление металлического катода, а увеличение тока разряда выше 5 А приводит к капельному срыву материала. Для металлического катода диаметром $d_k=15$ мм оптимальным является межэлектродное расстояние $l=3$ мм и сила тока разряда $I=3$ А. При данных условиях достигается максимальная производительность ($P=0,13$ кг/час). Основная масса полученного оксидного порошка (около 75 %) имеет дисперсность $0,025 \div 0,03$ мм. Как видно, производительность оксидного порошка железа по сравнению с [95] увеличивается в 6 раз, а с [78, 79] - в два раза.

На рисунке 4.5 приведена зависимость производительности оксидного порошка железа от тока разряда для различных диаметров металлического катода. Максимальная производительность для случая с металлическим катодом (сталь 45) диаметром $d_k=15$ мм составляет 0,13 кг/час при токе разряда $I=3$ А. Увеличение диаметра металлического катода до $d_k=30$ мм приводит к увеличению производительности до $P=0,14$ кг/час при токе разряда $I=4$ А.

В данном случае форма разряда между проточным электролитическим анодом и металлическим катодом-стержнем имеет вид, изображенный на рисунке 3.11в, 3.12в. Плотность тока на металлическом катоде при максимальной производительности оксидного порошка железа составляет

$j_{\text{мк}}=7,8 \text{ А/см}^2$ независимо от диаметра металлического катода. Исходя из этого можно сказать, что к увеличению производительности получения оксидного порошка железа приводит именно увеличение диаметра металлического катода, так как при увеличении сечения металлического катода увеличивается активная поверхность, на которой протекают процессы распыления порошка.

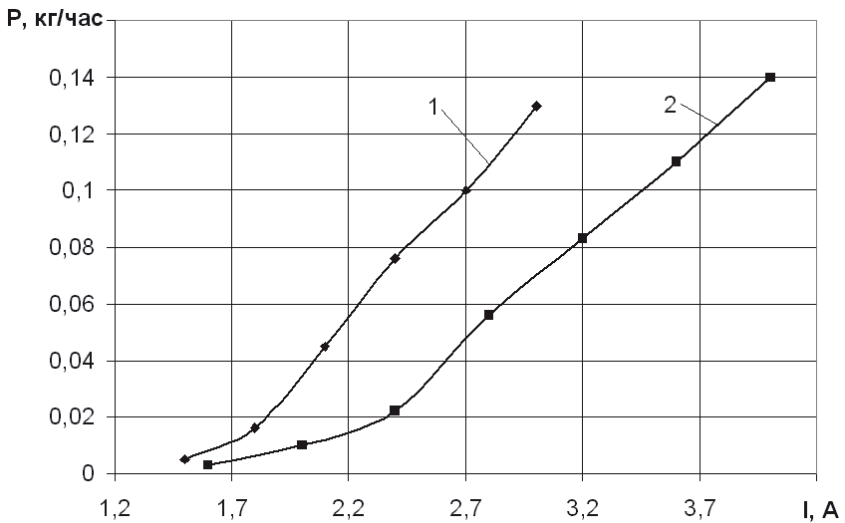


Рисунок 4.5 – Зависимость производительности оксидного порошка железа от тока разряда для различных диаметров металлического катода (сталь 45)
 1 – $d_k=15$ мм; 2 – $d_k=30$ мм

Исследования полученного оксидного порошка железа показали, что около 90 % порошка составляет магнетит Fe_3O_4 . Остальная часть состоит из оксида железа FeO . Магнетит Fe_3O_4 входит в группу ферритов со структурой шпинели и представляет практический интерес для порошковой металлургии

магнитных материалов. Особый интерес вызывает сферичность формы частиц магнетитного порошка, что является главным условием изотропности его магнитных свойств. Исследование полученного порошка в сравнении с эталонными ферритами показывает его существенно более высокие магнитные свойства (рисунок 4.6). Возможность получения больших значений магнитной индукции в порошке, в сочетании с сферичностью формы его частиц, говорит о перспективности порошков для использования в машиностроительной промышленности.

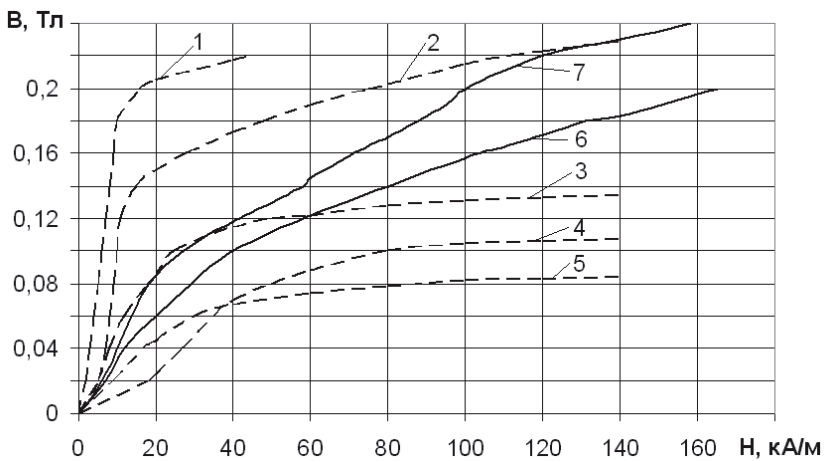


Рисунок 4.6 – Характеристики намагничивания ферритных порошков

1 – феррит марки М400НН; 2 – феррит марки М400мм; 3 – феррит; 4 – ноно феррит железа; 5 – шихта марки 3С418; 6 – металлический порошок; 7 – металлический порошок после тепловой обработки

Одной из поставленных задач являлось определение регрессионной зависимости получения оксидного порошка железа определенной дисперсности и производительности от условий технологического процесса.

При решении данной задачи использовались методы планирования факторного эксперимента типа 2^4 и 2^{4-1} , где учитывались линейные эффекты и эффекты взаимодействия. На основании предварительных исследований были выбраны основные факторы процесса, наиболее сильно влияющие дисперсность и производительность порошка: I – ток разряда; l – расстояние от поверхности проточного электролитического анода нижней кромки катода-стержня; d_k – диаметр металлического катода-стержня. В качестве выходной величины был выбран параметр P – производительность получения оксидного порошка железа и D – дисперсность порошка.

Применение методов многофакторного планирования эксперимента позволяет минимизировать экспериментальные усилия, повышает эффективность и качество исследований, позволяет вести целенаправленный поиск оптимальных условий протекания процессов получения оксидного порошка железа.

Матрица планирования эксперимента для производительности получения порошка из стали 45 приведены в таблице 4.1. Каждый эксперимент проводился три раза и в таблице 4.1 в последней графе приведены средние значения.

Таблица 4.1

Матрица планирования эксперимента

№ эксперимента	Код				
	x_0	x_1	x_2	x_3	y
1	+1	+1	-1	-1	0,073
2	+1	-1	+1	-1	0,016
3	+1	-1	-1	+1	0,034
4	+1	+1	+1	+1	0,1

Математическая обработка результатов эксперимента с помощью метода наименьших квадратов и пакета программ MathCad и Excel позволила получить уравнения регрессии для стали 45 в следующем виде:

$$y = 0,125 + 2,5x_1 - 9,83x_2x_3 \quad (4.1)$$

Матрица планирования эксперимента для получения порошка определенной дисперсности из стали 45 приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Матрица планирования эксперимента

№ эксперимента	Код				
	x_0	x_1	x_2	x_3	y
1	+1	+1	-1	-1	0,056
2	+1	-1	+1	-1	0,045
3	+1	-1	-1	+1	0,039
4	+1	+1	+1	+1	0,034

Уравнение регрессии в этом случае имеет вид:

$$y = 19,83 - 0,125x_1 + 1,2x_2 - 15,62x_1x_3 \quad (4.2)$$

Нижний и верхний уровни факторов, значение функции отклика для стали 45 приведены в таблице 4.3.

При помощи уравнений (4.1 и 4.2) подирая нужные режимы разряда можно получить оксидный порошок железа необходимой дисперсности и производительности.

Таблица 4.3

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Ток раз- ряда I , А	Межэлек- тронное рас- стояние l , мм	Диаметр металличе- ского ка- тода d_k , мм	Производитель- ность или дис- персность ок- сидного порошка
Основной уровень	3,25	6	25	
Интервал варьирования	1,75	4	15	
Верхний уровень	5	10	40	
Нижний уро- вень	1,5	2	10	
Код	x_1	x_2	x_3	y

4.3 Методика упрочнения поверхности металлических изделий

Повышение срока эксплуатации различных узлов и деталей, а также инструментов и оснастки представляет актуальную задачу. Одним из путей решения данной задачи является создание новых технологических процессов и оборудования для упрочнения поверхностей деталей. Все более заметное место в современной технологии занимают методы упрочнения материалов высококонцентрированными источниками излучения, в частности процессы плазменно-поверхностного упрочнения металлов. Такие процессы характеризуются наличием возможности управления в достаточно широком диапазоне температуры теплового потока, направляемого на обрабатываемую поверхность.

Описанное выше устройство получения струйного многоканального разряда позволяет обрабатывать металлические изделия в достаточно широком диапазоне температуры. Этим устройством можно получить поверхностное упрочнение изделий до необходимой микротвердости. Результаты многочисленных экспериментов показали, что температура плазменной струи существенно зависит от тока разряда, температуры электролита и межэлектродного расстояния. Также на конечный результат микротвердости влияет время обработки и расстояние от обрабатываемой поверхности до устройства.

Математическая обработка результатов эксперимента с помощью метода наименьших квадратов и пакета программ MathCad и Excel позволила получить уравнения регрессии для стали 45 в следующем виде:

$$y = 356,2 + 27,6 \cdot x_1 + 103,3 \cdot x_2 + 43 \cdot x_3 + 58,9 \cdot x_4 + 34,9 \cdot x_1 \cdot x_2 + 64,6 \cdot x_1 \cdot x_4 \quad (4.3)$$

Из полученного уравнения очевидна и зависимость показателя поверхностной микротвердости материалов от условий технологического процесса обработки.

Анализ полученных результатов эксперимента показывает значительное упрочнение поверхности металлических изделий. Так, для стали 45 в результате обработки плазменной струей микротвердость HV_{50} повышается в среднем в 3,5 раза при глубине упрочненного слоя $1,1 \div 1,7$ мм.

На рисунке 4.7 приведены зависимости микротвердости HV_{50} поверхности стали 45 после обработки плазменной струей от расстояния над поверхностью устройства и расстояния между проточным электролитическим анодом и нижней кромкой устройства. В данном случае электролитом являлась техническая вода. Время обработки образцов составил 12 секунд. Вкладываемая мощность – 8 кВт.

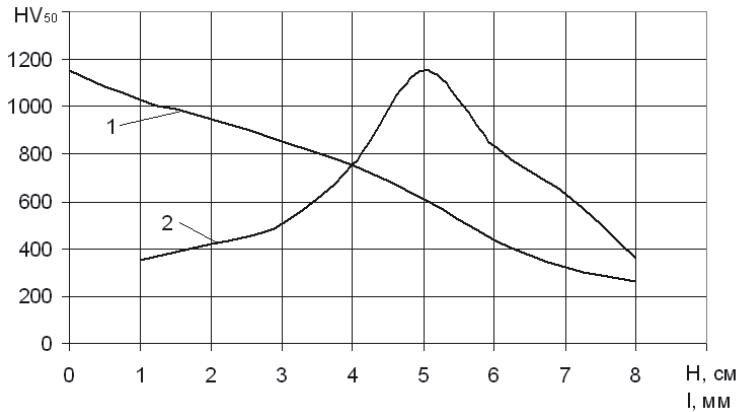
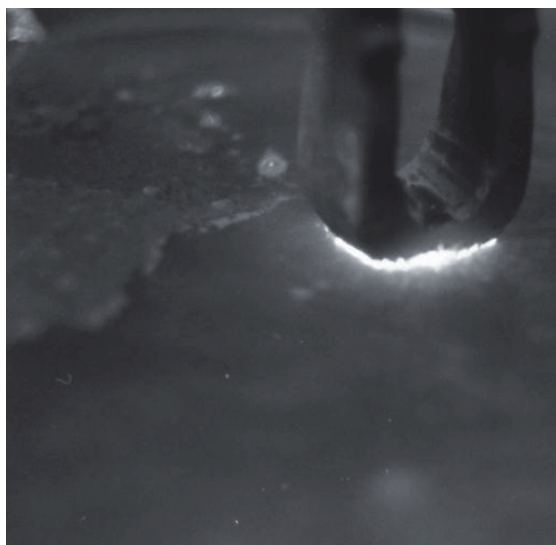


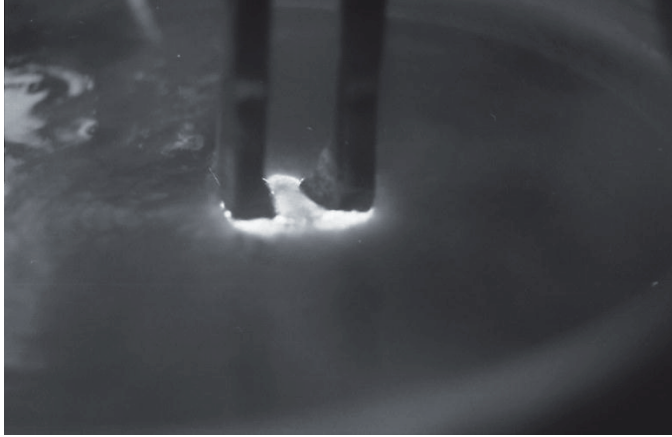
Рисунок 4.7 – Зависимость микротвердости стали 45 после обработки плазменной струей от высоты над поверхностью устройства (I) и от расстояния между проточным электролитическим анодом и нижней кромкой устройства (2)

4.4 Очистка поверхности металлических тел из сплавов цветных металлов

Одной из финишных технологических операций при изготовлении деталей является операция очистки поверхности. Предлагается способ очистки поверхности изделий из сплавов цветных металлов (латунь, бронза, алюминиевые сплавы) при помощи струйного многоканального разряда с проточным электролитическим анодом. Роль металлического катода выполняет обрабатываемая деталь. На рисунке 4.8 показан процесс очистки заготовки из латуни.



а



б

Рисунок 4.8 – Фото процесса обработки заготовки из латуни

Обрабатываемое изделие устанавливается непосредственно над поверхностью электролита (расстояние не более 1 мм) (рисунок 4.8а). После зажигания струйного многоканального разряда, образец плавно погружается в проточный электролитический анод (рисунок 4.8б). При этом напряжение разряда составляет $U=560$ В. В зависимости от площади поверхности обрабатываемого изделия, ток разряда варьируется от 2 до 50 А. В качестве проточного электролитического анода используется насыщенный раствор NaCl. До обработки шероховатость поверхности обрабатываемого изделия соответствовал 7 классу. Время обработки составило 30 секунд. Анализ обработанной поверхности показал, что класс шероховатости соответствовал 8 классу ($R_a=(0,45\pm0,5)\cdot10^{-6}$ м и $R_z=(2,1\pm0,5)\cdot10^{-6}$ м) по ГОСТу 2789-97. Увеличенные фотографии поверхности обработанных изделий показаны на

рисунке 4.9. Обработка экспериментальных данных показал, что на качество очистки поверхности изделий из цветных металлов существенное влияние оказывает температура электролита. Увеличение температуры электролитического анода не приводит к улучшению качества поверхности. Для получения 8 класса шероховатости по ГОСТу 2789-97 применялся электролит, температура которого составила от 40 до 55 °С. Для поддержания данного режима обработки применяется проточный электролитический анод. Проточностью электролита обеспечивается и поддержание концентрации раствора NaCl на необходимом уровне. При обработке изделий из сплавов алюминия до получения 8 класса шероховатости, время обработки составило 20 секунд. Увеличение времени обработки не приводит к улучшению качества поверхности.

В результате обработки наблюдалось изменение (уменьшение) веса обрабатываемых образцов. Так, в среднем, изменение веса образца из латуни, при продолжительности обработки $t=50$ сек., составляет $\Delta P_{\text{л}}=570$ мг; для образца из сплава алюминия за время $t=30$ сек. – $\Delta P_{\text{ал}}=450$ мг.

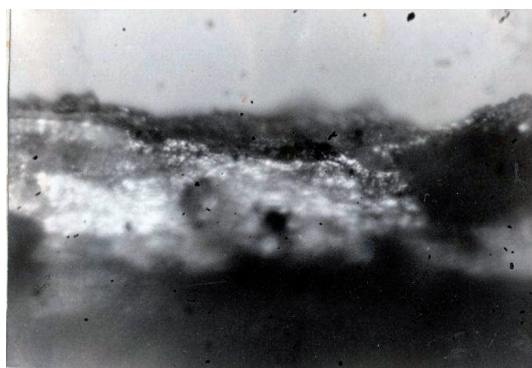
Таблица 4.4

Изменение веса обрабатываемых изделий

t , сек.	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$\Delta P_{\text{л}}$, мг	180	280	320	350	380	400	440	470	520	570
$\Delta P_{\text{ал}}$, мг	195	310	350	375	415	450	500	530	590	640



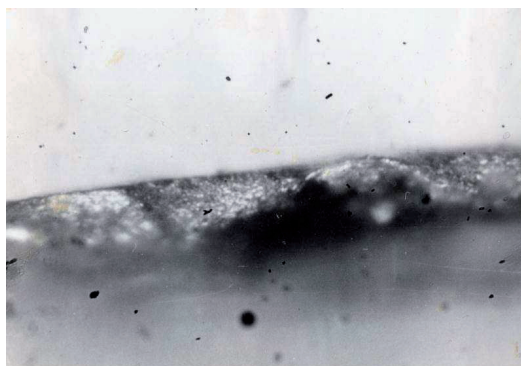
a



б



B



Г



Д

Рисунок 4.9 – Фото поверхности обработанных изделий из латуни при различных времени обработки (увеличение в 200 раз):
а – до обработки; б – $t=5$ сек.; в – $t=10$ сек.; г – $t=20$ сек.; д – $t=30$ сек.

Выводы

1. Разработана и создана экспериментальная установка для исследования струйного многоканального разряда между металлическим катодом (охлаждаемый и неохлаждаемый) и электролитическим (непроточные и проточные электролиты) анодом при атмосферном давлении в широком диапазоне межэлектродного расстояния ($l=1\div 100$ мм), диаметра катода ($d_k=5\div 40$ мм) и тока разряда ($I_p=0,01\div 50$ А).

2. Проведены комплексные экспериментальные исследования: зажигания разряда, падения напряжения на электролитическом аноде, вольтамперных характеристик, структуры разряда, распределения потенциала и напряженности электрического поля, плотности тока на металлическом катоде в широком диапазоне тока разряда $I_p=0,01\div 50$ А, межэлектродного расстояния $l=1\div 100$ мм и диаметра катода $d_k=5\div 40$ мм. Изучено развитие катодных пятен на поверхности металлического катода. Исследованы структуры струйного многоканального разряда. Показано, что ВАХ струйного многоканального разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом значительно зависит от I_p , l , d_k , а также от материала катода, состава и концентрации электролита. Установлен неоднородный характер распределения потенциала и напряженности электрического поля между электролитическим анодом и металлическим катодом.

3. Изучена граница раздела между плазмой и электролитическим анодом. Показано, что при увеличении тока разряда поверхность анода от гладкого сначала переходит в одинарную поперечную волну, затем в общую волну, генерируемую несколькими каналами. Регулярная поверхностная рябь в бурлящую вспененную зону турбулентного перемешивания переходит при токе разряда $I=5$ А.

4. Проанализированы и обобщены ВАХ струйного многоканального

разряда между металлическим охлаждаемым и неохлаждаемым катодом и проточным электролитическим анодом при атмосферном давлении. Получены зависимости, позволяющие рассчитать напряжение разряда. Максимальное среднеквадратическое отклонение экспериментальных значений напряжения разряда от расчетных значений, полученных по данным формулам, составляет менее 10 %. Поэтому их можно рекомендовать для инженерного расчета плазменных установок со струйным многоканальным разрядом.

5. Разработаны и созданы устройства:

- для получения струйного многоканального разряда между проточным электролитическим анодом и охлаждаемым металлическим катодом;
- для получения мелкодисперсного порошка из различных марок сталей при помощи струйного многоканального разряда с проточным электролитическим анодом и приведены сравнения характеристики этого порошка с полученными при помощи известных способов;
- для упрочнения поверхности материалов в многоканальном разряде с проточным электролитическим анодом;
- для очистки поверхности материалов в многоканальном разряде с проточным электролитическим анодом.

Список использованной литературы

1 Afanas'yeva N.A., Galimova R.K., Gaisin F.M., Gaisin A.F, Gainullina N.S. and Savel'ev V.A. The interaction of the steam-gas discharge plasma with the surfaces of solid and liquid substances. 5th European Conference on Thermal Plasma Processes, St. Peterburg, p. 193.

2 Валиев Р.А., Гайсин Ф.М., Шакиров Ю.И. Влияние характеристик разряда на интенсивность образования и дисперсность порошка.// Электронная обработка материалов. Кишинев. 1991. №3. С. 32-34.

3 Максимов А.И. Физика и химия взаимодействия плазмы с растворами.// Материалы 9 школы по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ. Иваново. Изд-во ИГХТУ. 1999. С. 46-53.

4 Морозова Н.К., Галимова Р.К., Гайсин Ф.М., Хазиев Р.М. ЯМР-исследование жидкостей, обработанных парогазовым разрядом. //Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. Казань. 1997. № 1. С. 224-228.

5 Тазмеев Б.Х. Исследование высоковольтного электрического разряда между металлическим анодом и жидким электролитным катодом при повышенных токах.// Материалы 9 школы по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ. Иваново. Изд-во ИГХТУ. 1999. С. 54-60.

6 Plante G.// Zeit. Phys. 1875. N80. S. 1133.

7 Слигунов Н.П. Разряд гальванического тока через тонкий слой электролита.// Журн. Русск. физ.-хим. общества. 1878. Т. 10. вып. 8, физ. Часть 2. С. 241-243.

8 Ясногородский И.З. Нагрев металлов и сплавов в электролите. - М.: Машгиз, 1949. - 128 с.

9 Сапрыкин В.Д. О природе свечения прианодного слоя при электролизе с выносным анодом //Электрохимия, 1965. Т.1, № 2. С.234-236.

10 Сапрыкин В.Д. Случай образования промежуточного раствора от действия электрических разрядов между выносным анодом и

концентрированный: раствором соли щелочного металла при сверхвысоких поляризациях //Электрохимия, 1965. Т.1, № 9. С.1157-1161.

11 Gubkin J. Electrolytische Metallabscheidung an der fruen Oberffluache einer Salzlosung// Ann. Phys. 1887. BD 32. S. 114-115.

12 Stark J., Guassuto L.// Zeit. Phys. 1904. Bd 5. 1110. S. 1212-1213.

13 Macovetski A.// Zeit. Electroch.1911. Bd 17. №6. S. 565-569.

14 Rodebush W.H., Walnl M.H.// J.Ghem.Phys. 1933. Vol.1. S. 111-114.

15 Barret P.// Bull. Soc. Chem. 1956. N8-9. S.1243-1253.

16 Гайсин Ф.М. Сон Э.Е. Электрофизические процессы в разрядах с твёрдыми и жидкими электродами. Свердловск. Изд-во Уральского университета, 1989. 432 с.

17 Мик Дж. Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. -М.: ИЛ, 1960. - 601 с.

18 Гайсин Ф.М. Дисс. на соискание уч. степени д.ф.м.н. «Физические процессы в газовых разрядах с твёрдыми, жидкими и плазменными электродами". - М: 1992.

19 Frochlich H., Platzman R.L. Energy loss electrous to dipolar relaxation//Phys. Rev. 1953. Vol 92 S. 1152-1154.

20 Сапрыкин В.Д. Некоторые вопросы, связанные с электролизом в присутствии низкотемпературной плазмы//Химия и Физика низкотемпературной плазмы. - МГУ. 1971. С.77-60.

21 Haber P., Klemene A.//Zeit. Phys. Chem. 1914. Bd 27. S. 82-98.

22 Klemene A., Kantor T.//Zeit. Phys. Ghem. 1934. 86. S.127-134.

23 Bragg J.K., Sharbaugh A.H., Growe R.W.// Appl. Phys. Cathode Effects in the Dielectric Breakdron of Liquids. 1954. Vol. 25. №3.

24 Benegl - Nia A.//Comp. Rend. 1957. T. 246. N21/10. S. 6-76.

25 Benegl - Nia A.//Comp. Rend. 1958. T. 246. N27/1. S. 122-141.

26 Павлов В.И. Проведение химических реакций газовыми ионами в электролитах//Докл. АН СССР, 1944. Т.43, № 9. С. 403-404.

27 Павлов В.И. Получение H_2O_2 при безэлектродном электролизе воды в кислороде//Докл. АН СССР, 1944. Т.43, № 9. С. 405-406.

28 Sternberg Z.W. Discharges with aqualous solutios as cathode//X11 Jugoslav Summer Sch. and Int. Symp. Phys. Ionized. Cases 84, Sibenik. Contrib. Pap. and Abstr. invit. Lect. and Progr. Repft. Belgrade, 1984 Sept. 3-7. S. 392-395.

29 Шапошникова Н.А. Исследование метана в газовом разряде: Автореф. дис. канд.хим.наук. - Казань, 1951. - 15 с.

30 Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. О структуре и сопротивлении приэлектродной зоны при нагреве металлов в электролитной плазме //Электронная обработка материалов, 1979. №1. С. 5-11.

31 Bragg J.K., Sharbaugh A.H. , Growe R.W.//Appl. Phys. Cathode Effects in the Dielectric Breakdron of Liquids. 1954. Vol. 25. №3/

32 Кесаев И.Г. Катодные процессы ртутной дуги и вопросы ее устойчивости. - М., Л.: Госэнергоиздат, 1961. - 320 с.

33 Davies R.A. and Hickling A. // J. of chemical Society, 1952. №9. P. 3595-3602.

34 Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Наука, 1987. - 591 с.

35 Гайсин Ф.М., Гиззатуллина Ф.А. Исследование электрического пробоя воздуха между электролитом и металлическим электродом//Низкотемпературная плазма. Казань, 1983. С. 43-51.

36 Taylor G.S., McEwan A.D. The stability of horizontal fluid interface in a vertical electric field.//J.Fluid Mech. 1965. Vol. 22, pt. 1. S. 1-16.

37 Капцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. – М.: Гостехиздат, 1950. – 836 с.

38 Sternberg Z.W. Int. Conf. Gas.Discharges London 1970. P. 68.

39 Sternberg Z.W. Rend. Confr. Int. Fenomeni d Ionizzazione nei bas. Benezia 1957. P.1061.

40 Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 270 с.

41 Факторович А.А., Галанина Е.К. Электрические разряды в электролитах //Электрохимическая обработка металлов/ под общей ред. Ю.Н.Петрова. Кишинев, 1971. С. 122-130.

42 Гюнтершульце А., Бетц Г. Электролитические конденсаторы. - М.: Оборонгиз, 1938. - 264 с.

43 Van T.B., Brawn S.D., Wirtz S.P. - Mechanism of Anodic Spark Depositron. Amor. Ceraun Soc. Bull. 1977. V. 56 №1.

44 Жуков М.Ф., Замбалаев Ж.Ж., Дандарон Н.Н. и др.. Исследование поверхностных разрядов в электролите //Изв. Сиб. отд-ия АН СССР. Сер. техн. наук. 1984. №4, вып.1. - С. 100-104.

45 Поляков О.В., Баковец В.В. Тез. 4-го Всесоюзного совещания «Воздействие ионизирующего излучения и света на гетерогенные системы». - Кемерово, 1986. - С. 196-197.

46 Поляков О.В., Баковец В.В. Тез. 4-го Всесоюзного совещания «Воздействие ионизирующего излучения и света на гетерогенные системы». - Кемерово. 1986. - С.197-199.

47 Поляков О.В., Баковец В.В. /Химия высоких энергий, 1983, т.17, № 4. С. 291-295.

48 Словецкий Д.И., Терентьев С.Д., Плеханов В.Г. Механизм плазменно-электролитного нагрева металлов //Теплофизика высоких температур. 1986. Т.24, № 2. С. 353-363.

49 Дураджи В.Н., Форня Г.А. Закалка стали в электролите при нагреве в электролитное плазме. //Электронная обработка материалов, 1989. № 4. С. 43-46.

50 Лазаренко Б.Р. Коммутация тока на границе метан-электролит. – Кишинев: Штиинца, 1971. 75 с.

51 Лазаренко Б.Р., Дураджи В.Н., Факторович А.А. Вольт-амперные характеристики электрического разряда между металлическим и электролитным электродами // Электронная обработка материалов, 1972. №3 (45). С. 29-33.

52 Chang T.C. A model for voltage drops during dc discharges on moist surfaces. 7 th International conference Discharges and Appl., 1982/ - London 1982. P. 458-459.

53 Гайсин Ф.М., Гизатуллина Ф.М., Камалов Р.Р. Исследование электрических характеристик самостоятельного разряда с жидким катодом. Деп. ВИНТИ, №1153-83. – Казань. 1983. 20 с.

54 Гайсин Ф.М., Гизатуллина Ф.М., Камалов Р.Р. Исследование электрических и тепловых характеристик самостоятельного разряда с жидким катодом. Деп. ВИНТИ 4.03.83. №1151-83.

55 Гайсин Ф.М., Гизатуллина Ф.А., Даутов Г.Ю. Характеристики самостоятельного тлеющего разряда в воздухе при атмосферном давлении // Тезисы докладов Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы, сентябрь, 1983. – Л., 1983. С. 33-35.

56 Гайсин Ф.М., Гизатуллина Ф.А. Тепловые и электрические характеристики разряда между электролитом и медным анодом//Тепло- и массообмен в химической технологий: Межвуз. сб. Казань, 1983. С. 55-58.

57 Гайсин Ф.М., Гизатуллина Ф.А., Камалов Р.Р. Энергетические характеристики разряда в атмосфере между электролитом и медным анодом. //Физика и Химия обработки материалов, 1985. №54. С. 58-64.

58 Поляков О.В. Дисс. на соискание уч. степени к.т.н. «Физико-химические процессы в водных растворах, инициируемые анодными микроразрядами». – Кемерово. 1989. 201 с.

59 Баринов Ю.А., Блинов И.О., Дюжев Г.А., Школьник С.М. Экспериментальное исследование разряда с жидкими электродами в воздухе

при атмосферном давлении // Материалы конф. «Физика и техника плазмы». Т. 1. Минск. Беларусь. 1994. С. 123-126.

60 Гизатуллина Ф.А., Залялов Н.Г. Спектроскопическое исследование плазмы высоковольтного разряда с жидким катодом // Тезисы докладов Всесоюзного семинара по атомной спектроскопии. Черноголовка Моск. обл., декабрь 1992. С. 87.

61 Абдуллин И.Ш., Гизатуллина Ф.А., Залялов Н.Г. и др. Спектроскопическое исследование плазмы с жидким катодом // Тезисы III семинара по атомной спектроскопии. Черноголовка Моск. обл., декабрь 1992. С. 87.

62 Абдуллин И.Ш., Гизатуллина Ф.А., Залялов Н.Г. и др. Спектроскопическое исследование высоковольтного разряда с жидким катодом // Тезисы VI конференции по физике газового разряда. 23-25 июня 1992. – Казань, 1992. С. 233-234.

63 Абдуллин И.Ш., Гизатуллина Ф.А., Залялов Н.Г. Феноменологическое описание разряда с жидким катодом и его характеристики. Деп. В ВИНТИ 4.11.93, № 2763-B93. 34 с.

64 Гизатуллина Ф.М. Разряд с жидким катодом в процессах обработки поверхностей. Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. – Санкт-Петербург. 1995. 249 с.

65 Csepfalvit T., Mezei P., Apai P. Emission studies on a glow discharge in atmospheric pressure air using as a cathode // J. Phys. D.: Appl. Phys. 26 (1993) 2184-2188. Printed in the UK.

66 Галимова Р.К., Хазиев Р.М., Гайсин Ф.М., Савельев В.А., Гайсин А.Ф. Исследование взаимодействия многоканального разряда с веществом и разработка новых технологических процессов модификации поверхности изделия. Тезисы докладов. Международный научно-технический семинар «Новые технологии-96», Казань, ВАТУ, АНТ, 1996. С. 49-50.

67 Гайсин Ф.М., Галимова Р.К., Афанасьева Н.А., Савельев В.А. Парогазовый разряд с жидким катодом. Статья. Вестник КГТУ им А.Н. Туполева №1 1997. С. 107-111.

68 Тазмеев Б.Х. Электрический разряд с электролитным катодом и его электрические характеристики // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. Казань. 1999. №4. С. 71-76.

69 Гайсин Ф.М., Сон Э.Е, Шакиров Ю.И. Объемный разряд в парогазовой среде между твердым и жидким электродами. М., Изд-во ВЗПИ. 1990. 92 с.

70 Гайсин Ф.М., Гизатуллина Ф.А., Даутов Г.Ю. Устройство для получения тлеющего разряда при атмосферном давлении, 1983. А.с. Л 1088086 (СССР).

71 Блохин В.И., Пашкин С.В. Исследование анодного падения в высоковольтном диффузном разряде в конкретном потоке воздуха//Теплофизика высоких температур, 1976. Т.14, № 2. С. 378-379.

72 Грановский В.Л. Электрический ток в газе (установившийся ток). – М.: Наука, 1971. – 544 с.

73 Гайсин Ф.М., Галимова Р.К., Хакимов Р.Г. Электрический разряд, горящий между струей электролита и твердым электродом в технологических процессах // Тезисы докладов VII научно-технической конференции «Физика газового разряда». – Самара, 1994 г. – СГАУ. Часть 2. С. 247-248.

74 Гайсин Ф.М., Хакимов Р.Г. и др. Возникновение разряда между струей электролита и твердым электродом // Тез. докл. 6-ой научно-технической конференции по физике газового разряда. Казань. 1992 . С 154-156.

75 Гайсин Ф.М., Шакиров Ю.И., Хакимов Р.Г. и др. Исследование газового разряда между твердым и жидким электродами.//Тезисы докл.

Республ. Научно-техн. Конференции 27-29 марта 1990. Наб. Челны, 1990. С. 161.

76 Хакимов Р.Г. Характеристики плазменной электротермической установки с жидкими электродами. Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. Санкт-Петербург 1993. 186 с.

77 Гайсин Ф.М., Хакимов Р.Г., Шакиров Ю.И. Газовый разряд между неметаллическими электродами//Тезисы докладов научно-технической конференции «Проблемы и прикладные вопросы физики», - Саранск, 18-20 мая 1993. МГПИ – С. 12.

78 Савельев В.А. Устройство для создания паровоздушного разряда между металлическим катодом и электролитическим анодом (непроточные и проточные электролиты) и его характеристики при атмосферном и пониженных давлениях. Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. Казань, 2003. 120 с.

79 Тазмеев Б.Х. Электрические и тепловые характеристики генераторов неравновесной газоразрядной плазмы с жидкими электродами. Дисс. на уч. степени к.т.н. Казань. 2000. 170 с.

80 Стройкова И.К., Максимов А.И. окисление красителей в водном растворе под действием тлеющего и диафрагменного разряда // материалы 9 Школы по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ. – Иваново: ИГХТУ, 1999, С. 128-129.

81 А.С. № 1088086 (СССР) // Гайсин Ф.М., Гизатуллина Ф.А., Даутов Г.Ю. Устройство для получения тлеющего разряда при атмосферном давлении. 1983.

82 А.С. 1367769 СССР. Устройство для получения стабилизированного разряда при атмосферном давлении // Гизатуллина Ф.А., Гайсин Ф.М., Даутов Г.Ю., Мухамедзянова Р.Ф., Басыров Р.Ш. Заявл. 15.09.87.

83 Мак-ассарт Ф. Плазмохимические реакции в электрических разрядах. – М.: Атомиздат, 1972. – 256 с.

84 Ясногородский И.З. В сб. «Электрохимическая и электрохимическая обработка металлов». – М.: Машиностроение, 1971. – С. 117-121.

85 Bellog E.N. J. Electrochem. Soc., 1950. V. 97. – P. 133.

86 Лазаренко Б.Р., Дураджи В.Н., Факторович А.А. Об особенностях электролитного нагрева при анодном процессе.//Электронная обработка материалов, 1974. № 3. – С. 37-40.

87 Аверьянов Е.Е. О возможных механизмах образования анодных окисных пленок на алюминии, полученных плазменно-электролитическим методом. Деп. ВИНТИ, № 1613 – 76, - Казань, 1976, - 10 с.

88 Аверьянов Е.Е. Изучение кинетики формирования и электрофизических параметров анодных окисных пленок на алюминии, полученных плазменно-электролитическим методом. Деп. ВИНТИ, № 1615–76, - Казань, 1976, - 15 с.

89 Аверьянов Е.Е. Некоторые особенности плазменно-электролитического анодного окисления металлов. Деп. ВИНТИ, № 2388-76, - Казань, 1976, - 14 с.

90 Аверьянов Е.Е., Файзуллин Ф.Ф. Исследование процесса анодного плазменно-электролитического окисления алюминия.//Электронная обработка материалов, 1978. №4. – С. 23-235.

91 Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита.//Под ред. Францевича И.И. – Киев: Наука думка, 1985. – 134 с.

92 Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. Изд. Химия, 1991. – 128 с.

93 Аверьянов Е.Е. Плазменное анодирование в радиоэлектронике. М.: Радио и связь, 1983. 80 с.

94 Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита. // Под. Ред. Франкевича И.И. – Киев: Наукова думка, 1985. 278 с.

95 Шакиров Ю.И. Дисс. на соискание уч. степени к. т. н. «Характеристики плазменной электротермической установки с жидким катодом». – Ленинград. 1990. – 132 с.

96 Валеев Р.А., Гайсин Ф.М., Шакиров Ю.И. и др. Свойства мелкодисперсного порошка окислов железа, получаемого плазмохимическим методом // Тезисы докладов научно-технической конференции «Прикладная мессбауэровская спектроскопия». – Казань. 1990. С. 53.

97 А. С. № 11966419 СССР. Анодное устройство для получения металлического порошка//Бондаренко А.В., Хаустов В.Л., Базалей В.П., Бруслицвен С.А. Бюл. № 45, 07.12.85.

98 А. С. № 1177397 СССР. Устройство для получения металлического порошка//Волосюк Ю.М., Черных С.Н. Бюл. № 33, 07.09.85.

99 Гайсин Ф.М., Валиев Р.А., Шакиров Ю.И. Особенности порошка, полученного в разряде между стальным электродом и электролитов // Порошковая металлургия. 1991. № 6. С. 4-7.

100 Электроразрядная очистка катанки // Теплотехнические вопросы применения низкотемпературной плазмы в металлургии. Свердловск, 1985.

101 Абдуллин И.Ш., Гизатуллина Ф.М., Бедретдинова З.М., Залялов Н.Г. Применение разряда с жидким катодом для поверхностной обработки металлов // Тезисы отраслевого научно-технического семинара «Технология нанесения износостойких покрытий на режущие кромки кольцевого и хирургического инструментов» НПО «Мединструмент». – Казань, 9-11 октября 1991. С. 43.

102 Гайсин А.Ф. Характеристики парогазового разряда между металлическим и жидки (непроточные и проточные электролиты) электродами. Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. Казань. 2003. 120 с.

103 Капцов Н.А. Электроника. - М.: Гостехтеориздат, 1956. - 459 с.

104 Гайсин Ф.М., Хакимов Р.Г., Шакиров Ю.И. Разряд в газе между струей жидкости и твердым электродом // Тезисы докладов научно-

технической конференции «Проблемы и прикладные вопросы физики». – Саранск, 18-20 мая 1993. МГПИ. С. 34.

105 Гайсин Ф.М., Ильясов Р.Ш., Хакимов Р.Г. и др. Очистка металлов плазменной электротермической установкой с жидким катодом // Тезисы докладов научно-технической конференции «Проблемы и прикладные вопросы физики». – Саранск, 18-20 мая, 1993 МГПИ. С. 35.

106 Орлов В.Ф., Чугунов Б.И. Электрохимическое формообразование. – М.: Машиностроение, 1990. 240 с.

107 Попилов Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. 400 с.

108 Аверьянов Е.Е. Справочник по анодированию. – М.: Машиностроение. 1988. 224 с.

109 Румянцев Е.М., Давыдов А.Д. Технология электрохимической обработки металлов. – М.: ВШ, 1984. – 159 с.

110 Тельнов Н.А. Очистка и мойка деталей машин//В кн. «Механизация сельскохозяйственного производства». Тр. Челябинского института механизации и электрофикации с/х-тва, 1980. В. 30. – С. 113-120.

111 Морозов А.П. и др. Электроразрядная очистка катанки//В сб. «Теплотехнические вопросы применения НТП в металлургии». Свердловск, 1985. – С. 102-104.

112 А.с. № 1441991 СССР. Способ очистки поверхности изделия / Гайсин Ф.М. Заявл. 18.07.86.

113 А. с. № 2310086 СССР. Способ очистки длинномерных стальных изделий//Словецкий Д.И., Терентьев С.Д., Плеханов В.Г. Бюл. № 18, 15.05.86.

114 Горелик А.А. Промышленная электроника. – М. – Л. Госэнергоиздат, 1958. -463 с.

115 A. Gunterschulze. Z. Physik, 11, 71, 1922.

116 *Гайсин А.Ф., Гумеров А.З., Нуриев И.М., Шакиров Ю.И.* Вольт-амперные характеристики плазменной электротермической установки с жидким анодом. //3-й Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии. 10-я Школа по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ (16 – 21 сентября 2002 г., Плётс, Россия): Сборник материалов, Т. 2. – Иваново: Ивановский гос. хим-техн. университет, 2002. – С. 390-391. ISBN-5-230-01566-7.

117 *Ахметсагиров Р.И., Гайсин А.Ф., Гумеров А.З., Нуриев И.М., Хайруллин А.Х., Шакиров Ю.И.* Исследование газового разряда между твердыми и жидким электродами. //Проблемы выживания и экологические механизмы хозяйствования в регионе Прикамья: Материалы симпозиума. – Наб. Челны: изд-во КамПИ. – 2002. - С.21-23.

118 *Гумеров А.З.* Имитационное моделирование разряда плазмотрона. //Межвузовская научно-методическая конференция «Научно-исследовательская деятельность студентов – первый шаг в науку». – Наб. Челны: изд-во КамПИ. – 2004. – С.249-251.

119 *Гайсин А.Ф., Гумеров А.З., Нуриев И.М.* Электрический пробой в газах между металлическим катодом и электролитным анодом. //Межвузовская научно-практическая конференция «Вузовская наука – России». – Наб. Челны: изд-во КамПИ. – 2005. – С.60-62.

120 *Ахатов М.Ф., Гайсин А.Ф., Гумеров А.З., Шайдуллина А.Р.* Некоторые особенности паровоздушного разряда между проточным электролитическим анодом и металлическим катодом. //Туполевские чтения: Международная молодежная научная конференция, посвященная 1000-летию города Казани, Казань, 10-11 ноября 2005 года: Материалы конференции. Том II: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2005. с. 9-10.

121 Даутов Г.Ю., Жуков М.Ф. некоторые обобщения исследований электрических дуг. // Прикладная механика и техническая физика, 1965. № 2. С. 97-105.

122 Даутов Г.Ю. Об одной критерии подобия электрических разрядов в газах. // прикладная механика и техническая физика, 1968. № 1. С. 137-139.

123 Даутов Г.Ю., Дзюба В.Х., Карп И.А. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами. – Киев.: Наукова думка, 1984. – 168 с.

124 Нуриев И.М. Характеристики многоканального разряда между проточным электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении. Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. Казань. 2005. 120 с.

125 Гумеров А.З. Многоканальный разряд между проточным электролитическим анодом и металлическим катодом для получения оксидного порошка./ Гайсин А.Ф.//Вторая международная научно-практическая конференция «Исследование, разработки и применение высоких технологий в промышленности»: Материалы конференции. – Санкт-Петербург, 2006. – С. 235-240.

126 Гумеров А.З. Получение ферромагнитного порошка определенной дисперсности в разряде между твердым и жидким электродами./Ахметсагиров Р.И., Гайсин А.Ф., Нуриев И.М., Хайруллин А.Х., Шакиров Ю.И. //Проблемы выживания и экологические механизмы хозяйствования в регионе Прикамья: Материалы симпозиума. – Наб. Челны: изд-во КамПИ. – 2002. - С.19-21.

127 Гумеров А.З. Определение зависимости для автоматизации установки по получению ферромагнитного порошка./Ахметсагиров Р.И., Гайсин А.Ф., Нуриев И.М., Шакиров Ю.И. //Автоматизация и

информационные технологии: Материалы конференции. – Наб. Челны: изд-во КамПИ. – 2002. - С.40-42.

128 Гумеров А.З. Метод получения ферромагнитного порошка при помощи низкотемпературной плазмы./Тайсин А.Ф., Нуриев И.М.//Межвузовская научно-практическая конференция «Вузовская наука – России». – Наб. Челны: изд-во КамПИ. – 2005. – С.57-60.

129 Гумеров А.З. Получение ферромагнитного порошка при помощи разряда с проточным электролитическим анодом. //Туполевские чтения: Международная молодежная научная конференция, посвященная 1000-летию города Казани, Казань, 10-11 ноября 2005 года: Материалы конференции. Том II: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2005. С. 23-24.

More Books!



yes I want morebooks!

Покупайте Ваши книги быстро и без посредников он-лайн - в одном из самых быстрорастущих книжных он-лайн магазинов!
Мы используем экологически безопасную технологию "Печать-на-Заказ".

Покупайте Ваши книги на
www.morebooks.de

Buy your books fast and straightforward online - at one of the world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at
www.morebooks.de

OmniScriptum Marketing DEU GmbH
Bahnhofstr. 28
D - 66111 Saarbrücken
Telefax: +49 681 93 81 567-9

info@omniscrptum.com
www.omniscrptum.com

OMNIScriptum



