

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Казанский национальный исследовательский  
технологический университет»  
«Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

*Ал. Ф. Гайсин, И. Ш. Абдуллин*

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ ПОСТОЯННОГО  
И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТОКА С ПРОТОЧНЫМИ  
И НЕПРОТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМИ  
ЭЛЕКТРОДАМИ В ПРОЦЕССАХ МОДИФИКАЦИИ  
МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ПРИ Пониженных  
ДАВЛЕНИЯХ**

Монография

Казань  
Издательство КНИТУ  
2013

УДК 533.9  
ББК 30.3:31.29

Электрические разряды постоянного и высокочастотного тока с проточными и непроточными электролитическими электродами в процессах модификации материалов и изделий при пониженных давлениях : монография / Ал. Ф. Гайсин, И. Ш. Абдуллин; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2013. – 188 с.

ISBN 978-5-7882-1582-2

В монографии систематизированы и обобщены результаты экспериментальных и теоретических исследований электрических разрядов постоянного и высокочастотного тока со струйными электролитическими электродами в процессах модификации материалов и изделий при пониженных давлениях. Рассмотрены особенности электрического пробоя вдоль струйного электролитического катода, формы многоканального разряда и аномального тлеющего разряда между струйным, капельным и пористым электролитическим катодом и твердым анодом, а также между струйным электролитическим анодом и струйным электролитическим катодом. Особое внимание уделено изучению механизма горения многоканального разряда при пониженных давлениях и разработке на его основе новых технологий модификации поверхности материалов и изделий.

Впервые представлены результаты экспериментального исследования высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) между электролитическим и металлическим электродами со струей электролита в широком диапазоне давления. Приведена математическая модель высокочастотной плазменной обработки твердых тел при пониженном давлении.

Предназначена для широкого круга научных работников и специалистов, занимающихся вопросами физики и техники низкотемпературной плазмы, преподавателей, инженеров-технологов, аспирантов, магистров и бакалавров вузов.

Рецензенты: д-р. техн. наук, проф. *В.В. Кудинов*  
(Институт материаловедения и металлургии  
им. А.А. Байкова);  
д-р. техн. наук, проф. *Р.Р. Зиганшин*  
(зам. ген. директора по научно-техническому развитию  
ОАО «Вакууммаш»)

ISBN 978-5-7882-1582-2

© Гайсин Ал. Ф., Абдуллин И. Ш., 2013  
© Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, 2013

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрические разряды в газе между металлическими электродами изучены достаточно хорошо [1-17 и др.]. Одним из новых способов получения низкотемпературной плазмы является использование электрического разряда между металлическим и электролитическим электродами [18-107 и др.]. В настоящее время такие разряды используются в плазменной технологии. Большое внимание уделяется разработке новых эффективных методов очистки, полировки, а также нагрева металлов, нанесения покрытий с данными свойствами на поверхности различных материалов.

Развитие современной техники предъявляет все более высокие требования к качеству металлов и сплавов. В настоящее время возможности очистки металлов и сплавов с использованием традиционных методов обработки: механических, химических – практически исчерпаны. Эти методы имеют ряд недостатков: низкая производительность, плохое качество и точность обработки поверхности; повышенная энергоемкость и экологическая вредность технологии; необходимость применения специальных мер для удаления отходов; высокая стоимость расходного материала, что приводит к снижению конкурентоспособности продукции. В связи с этим возникает задача разработки новых технологических процессов очистки поверхности металлов и сплавов. Перспективное направление – это использование высокоэнергетических методов: лазерных, плазменных и электронно-лучевых, позволяющих экономить сырье и реактивы, повышающих производительность труда, улучшающих качество поверхности обрабатываемого материала и дающих возможность получать материалы с новыми физико-механическими свойствами. Одной из перспективных технологий в области очистки поверхности металлов и сплавов является ее обработка низкотемпературной плазмой электрического разряда. Интерес к плазменным разрядам с жидким электродом для использования в технологических целях заключается в том, что в нем сочетаются свойства двух технологий: химической и плазменной.

Использование неравновесной плазмы многоканального разряда (МР) часто обеспечивает повышение эффективности многих технологических процессов, таких как плазмохимическое формирование поверхностей с заданными свойствами на различных материалах.

Однако возможности технологического применения генераторов плазмы со струйными электролитическими электродами еще мало изучены. Актуальность исследований в этом направлении обуславливается целым рядом причин, среди которых дешевизна, высокая степень чистоты технологических процессов с применением неравновесной плазмы парогазового разряда с электролитными электродами и др.

В настоящее время практически отсутствуют экспериментальные исследования электрического разряда постоянного и ВЧЕ-тока между струйным электролитическим катодом и твердым анодом при пониженных давлениях. Существующие устройства и способы получения парогазового разряда с электролитическими электродами имеют ограниченные возможности. Не изучены физические процессы, протекающие на границе раздела струйного электролитического катода и твердого анода при пониженных давлениях, и характеристики разряда. Взаимодействие плазмы струйного электролитического катода с поверхностью твердого тела при пониженных давлениях остается практически неисследованным. Все это задерживает разработку генераторов электрического разряда с электролитическими электродами для практического применения. В связи с вышеизложенным экспериментальное исследование электрического постоянного и ВЧЕ-тока разряда между струйным электролитическим катодом и твердым анодом при пониженных давлениях является актуальной задачей. Данное исследование посвящено решению этих задач.

В первой главе работы проведен анализ известных экспериментальных и теоретических исследований электрических разрядов, горящих между электролитическим и твердым электродами, а также обсуждены области их практического применения.

Во второй главе описываются экспериментальные установки для получения и исследования электрического разряда постоянного и высокочастотного тока между струйным электролитическим и твердым электродами. Система электрического питания предназначена для обеспечения электролитической ячейки и вспомогательного оборудования электролитической энергией. Вакуумная система состоит из вакуумной камеры, вакуумного насоса и вакуумной арматуры. Электролитическая ячейка заполняется исследуемыми электролитами необходимой концентрации. В этой же

главе рассматривается измерительная аппаратура, методика проведения экспериментов и приводится оценка точности измерений.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик и особенности электрического разряда между струйным электролитическим катодом и твердым анодом при пониженных давлениях. Приведены результаты электрического пробоя вдоль струйного электролитического катода при пониженных давлениях. Представлены формы электрического разряда между струйным электролитическим катодом и твердым анодом (металл и диэлектрик). Установлен переход многоканального разряда в тлеющий разряд при пониженных давлениях. Приведены результаты исследования вольтамперных характеристик электрического разряда между струйным электролитическим катодом и твердым анодом в широком диапазоне давления. Представлены распределения потенциала и напряженности электрического поля вдоль струйного электрического катода в многоканальном и тлеющих разрядах при пониженных давлениях. Приведена функция распределения значения плотности вероятности тока АТР. Представлены результаты исследования колебания напряжения и тока многоканального и тлеющего разрядов при пониженных давлениях. Приведены результаты локальной, струйной, одновременной очистки, полировки и повышения твердости меди, стали и алюминия. Выведено уравнение регрессии для нахождения оптимальных режимов локальной, струйной модификации.

В четвертой главе представлены формы электрического разряда между струйным электролитическим анодом и пористым катодом при пониженном давлении. Приведены результаты экспериментального исследования ВАХ электрического разряда между струйным электролитическим анодом и пористым катодом при пониженном давлении. На основе полученных результатов разработаны и созданы устройства для получения электрического разряда между струйным (капельным) электролитическим катодом и твердым анодом и методики локальной, струйной, одновременной очистки и полировки и повышения твердости поверхности твердых тел (медь М1, сталь Х18Н9Т, алюминий АМЦ40, эбонит) при пониженных давлениях. Получена регрессивная зависимость локальной очистки с одновременной полировкой поверхности материалов и изделий от условий технологического процесса при пониженных давлениях. Описаны устройства для получения электрического разряда между

струйным электролитическим анодом и пористым катодом при пониженных давлениях. С помощью этих устройств можно производить упрочнение и очистку поверхности металлов и сплавов.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований электрического разряда между электролитическим катодом и металлическим анодом, погруженным в электролит при пониженных давлениях. Приведены формы аномального тлеющего разряда в электролитическом катоде с турбулентным перемешиванием ВАХ аномального тлеющего разряда в электролите с турбулентным перемешиванием. Рассмотрен механизм очистки и полировки поверхности металлического анода, погруженного в электролит, при пониженных давлениях.

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований электрического разряда с металлическим анодом, погруженным в электролитический катод, в диапазоне давления  $P = 0,9 \cdot 10^4 - 9,8 \cdot 10^4$  Па,  $U = 200 - 600$  В и  $I = 0,25 - 200$  А для различного состава (растворы NaCl,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  в технической воде) и концентрации электролита (от 0,5% раствора солей в технической воде и до насыщения). В качестве анода использованы образцы из углеродистых и инструментальных сталей, латуни, меди, титана, цинка, алюминия различных геометрических форм и размеров.

Описаны устройства для получения электрического разряда с металлическим анодом, погруженным в электролитический катод. С помощью данных устройств можно осуществлять нагрев, очистку и полировку поверхностей металлических изделий. Также в данной главе описаны методики очистки поверхности металлических изделий с помощью многоканального разряда между электролитическим катодом и металлическим анодом.

Работа авторов в области физики низкотемпературной плазмы электрических разрядов с жидкими электродами была стимулирована членом-корреспондентом РАН, профессором, доктором физико-математических наук Э.Е. Соном. Авторы выражают ему благодарность. Нам также хотелось отметить внимание к работе рецензентов-профессоров Р.А. Кайдрикова и Р.Р. Зиганшина, замечания которых способствовали улучшению материала. В монографии использованы результаты расчетно-теоретических экспериментальных работ, выполненных в соавторстве с В. С. Желтухиным, Н. А. Логиновым, Р. М. Хазиевым, Л. Р. Саримовым и Л.Н. Багаутдиновой. Большую помощь в оформлении оказала Л.Ш. Гасимова. Авторы выражают им благодарность.

# **Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ГАЗЕ МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОДАМИ**

## **1.1. Зажигание электрического разряда между твердым и электролитическим электродами**

Электрический пробой в газе представляет собой сложный быстропротекающий процесс. Исследованию зажигания электролитического разряда при нормальной температуре между твердыми электродами посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ [1-8], 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 электролитическим катодом и металлическим анодом до последнего времени оставались практически не изученными [18, 19, 25, 26, 29 и др.]. Электролитические электроды влияют как на зажигание разряда, так и на характеристики электрического разряда.

Особенности зажигания разряда между металлическим и электролитическим электродами обусловлены действием электрического поля на электролит, влиянием поверхностного натяжения и силы тяжести электролита. В [19] эти особенности исследовались экспериментально на установке, показанной на рис. 1.1.

До сих пор не существует теории электрического пробоя между электролитическим катодом и твердым анодом, что объясняется чрезвычайной сложностью этого явления, характеризующегося протеканием процессов ионизации электронным ударом, фотоионизации, рекомбинации при тройных столкновениях, фоторекомбинации, вторичной эмиссии, диффузии заряженных частиц в электрическом поле и т. д. Механизм эмиссии электронов из электролитического катода неизвестен. В связи с этим расчеты пробоя базируются на экспериментальных данных и полуэмпирических формулах, справедливых в определенных узких диапазонах параметров. Обычно экспериментальные данные при нормальной температуре обобщаются в критериальной форме [19].

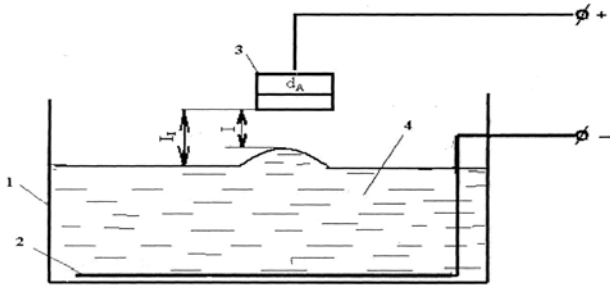


Рис. 1.1. Принципиальная схема электролитической ячейки. 1 – электролитическая ванна; 2 – металлическая пластинка; 3 – твердый электрод; 4 – электролит (насыщенный раствор NaCl)

Экспериментальные точки 1, 2, 3 и 4 (рис. 1.2) получены при диаметрах анода  $d_a$  соответственно  $2 \cdot 10^3$ ,  $4 \cdot 10^3$ ,  $1,2 \cdot 10^2$  и  $5 \cdot 10^2$  м. Точки 5 соответствуют случаю, когда электролит служит анодом, а точки 6 – значениям напряжения пробоя [47]. Из графиков видно, что при больших  $d_a$  в указанном диапазоне изменения  $l$  напряжение пробоя не зависит от того, является ли электролит катодом или анодом. Это объясняют тем, что в обоих случаях процессом, определяющим пробой, является фотоионизация газа, а  $\gamma$  – процессы на катоде не играют существенной роли. Этот результат согласуется с выводами из [6] о том, что искровой пробой происходит при полном отсутствии каких бы то ни было  $\gamma$  – процессов на катоде. Штриховые линии на рис. 1.1 и 1.2 соответствуют напряжению пробоя при появлении коронного разряда.

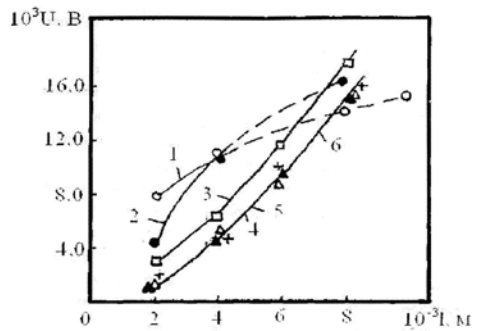


Рис. 1.2. Зависимость напряжения пробоя от межэлектродного расстояния для различных диаметров твердого анода

В работе [48] приведены результаты экспериментального исследования напряжений зажигания разряда постоянного тока, который возбуждали в воздухе при атмосферном давлении между



жидким катодом (дистиллированная вода) и металлическим анодом (медь) в диапазоне  $pl = 10^3$ - $10^5$  Па·см. Интерес к подобного рода исследованию вызван предположением, что пробой носит таунсендовский характер. Предоставляется возможность оценить величину коэффициента вторичной электронной эмиссии  $\gamma$  из электролитического катода, а не из парогазового слоя над его поверхностью. Поджиг разряда производился непосредственно электрическим пробоем разрядного промежутка. Параллельно электродам через делитель напряжения подключался регистратор, включенный в режиме вольтметра. При этом напряжению зажигания разряда соответствовал максимум на временной зависимости напряжения при плавном его увеличении во времени. Напряжение зажигания определялось не менее пяти раз для каждого набора условий, и рассчитывался доверительный интервал с вероятностью 0,95. Установлено, что рост давления при фиксированном межэлектродном расстоянии приводит к монотонному увеличению напряжения зажигания разряда. Изучение записей процесса зажигания показало, что моменту пробоя и зажиганию тлеющего разряда предшествует возникновение слабосветящейся, малозаметной невооруженным глазом области у анода. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к усилению и линейному разрастанию области свечения. Не исключено, что зажигание тлеющего разряда с жидким катодом происходит в две стадии: 1 – возникновение коронного разряда и разрастание катодонаправленного стримера(ов); 2 – переход стримеров в тлеющий разряд по не понятному до конца механизму.

## **1.2. Особенности горения электрического разряда между электролитическим катодом и твердым анодом**

Впервые разряд между электролитическим катодом и твердым анодом был получен Планте [50]. В его опытах анодом служил заостренный уголь, а катодом – раствор хлористого натрия. Ученый предполагал связь наблюдаемого явления с разрядами типа шаровой молнии. В работе [51] описаны условия, при которых наблюдается указанное явление в процессе нагрева металлов в электролите. В [52, 53] изучалось влияние состава электролита на шаровой слой в разряде.

В [53] представлены результаты качественных спектрографических исследований свечений на аноде, возникающих

при контактном электролизе тлеющим разрядом. Для снятия спектров свечения была использована электролитическая ячейка, являющаяся 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.

В [54] приведено описание визуальных наблюдений разрядов в воздухе при атмосферном давлении, возникающих между металлическим острием и поверхностью электролита. Авторы работы [54] полагают, что дуговой разряд возможен только при металлическом катоде и только 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, показали, что существенной разницы в процессах, протекающих между «горячим» и «холодным» анодами, не обнаруживается [55]. Разряд имел вид слабосветящегося 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 [56] отмечен различный характер свечения и химических реакций в зависимости от полярности электрода, представляющего собой раствор йодистого калия. Эти явления объяснили механическим действием летящих от катода и врывающихся в электролит электронов. Обширные исследования химических реакций в зоне разряда между металлическим и жидким электродами проведены в [57, 58]. В результате исследований отмечено влияние концентрации электролита и полярности электродов на химические реакции. Когда металл служил анодом, содержание окисленных продуктов во много раз превосходило то количество, которое получалось, когда металл был катодом. Автор работы [59, 60] считает возможным проникновение газовых ионов внутрь электролита и образование там новых молекул. Разряд между металлом-анодом и электролитом-катодом назван «присосавшейся искрой».

В работе [61] 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. Промежуточный раствор может образовываться не в любом электролите, а только в концентрированных растворах солей щелочных металлов и щелочах, т.е. тогда, когда концентрация ионов ОН значительна. Поэтому можно считать, что образование промежуточного раствора обуславливается протеканием окислительного процесса ионов ОН 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 в основном растворе происходят микроразряды, которые сопровождаются выделением тепла, нагревающего каплю. Температура промежуточных растворов во время горения разрядов равна 343 К. 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. Электрические разряды между основным и промежуточным растворами переносят некоторую долю основного раствора в промежуточный слой за счет механического катодного распыления электролита.

В [62] изучено поведение метана в газовом разряде с жидким электродом. Явление перебрасывания электролита на металлический анод объясняется закономерностями переноса вещества в дуговом разряде, 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 жидким

катодом (электролит) имеет место дуговая форма разряда. Причину незначительного нагрева анода автор видел в специфичности влияния жидкого 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. В [63] отмечается, что одной из причин снижения температуры анода является интенсивное испарение электролита и связанное с этим значительное поглощение тепла. В подобных исследованиях [64, 65] получены ВАХ для стационарного разряда между никелевым диском и растворами KCl, NaCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COOH различных концентраций при различных температурах и разрядных промежутках.

В [66] приведены результаты экспериментального исследования характеристик разряда постоянного тока  $I = 20-100$  мА, который возбуждали в воздухе в диапазоне давлений  $P = 0,1-1$  атм. между жидким катодом (дистиллированная вода) и металлическим анодом. Установлено, что суммарная мощность, вкладывая в систему, растет с ростом давления и тока разряда. В обоих случаях зависимость мощности от параметра близка к линейной. Плотность тока разряда, рассчитанная по известным значениям тока и площади катодного пятна, растет с ростом давления, меняется в диапазоне от 100 до 700 мА/см<sup>2</sup>. Установлено, что увеличение тока разряда приводит к изменению способа организации разряда на катоде, а именно к превращению (при токах разряда более 60 мА) сплошного катодного пятна в набор областей привязки разряда к катоду.

Методом перемещающегося анода определяли распределение потенциала в разряде. На основе этих данных находили напряженность электрического поля в плазме при фиксированном токе разряда, а также падение потенциала на катоде  $U_k$ . Напряженность поля в плазме при фиксированном токе разряда растет с увеличением давления в диапазоне  $(0,1-0,7) \cdot 10^3$  В/см, что превышает среднее значение градиента потенциала в свободно горящих дугах при токах в несколько ампер. Рост тока разряда приводит к слабому уменьшению напряженности поля в плазме. Величина катодного падения потенциала существенно превышает значения, характерные для тлеющих разрядов с металлическими катодами и тем более для дуговых разрядов во всем диапазоне исследованных параметров разряда. В диапазоне давлений 0,2-1 атм. катодное падение потенциала меняется слабо и находится в диапазоне 300-550 В.

Величина катодного падения потенциала уменьшается с ростом тока разряда и стремится к некоторому постоянному значению. Однако при токах разряда выше 80 мА на зависимости катодного падения наблюдается перегиб, и катодное падение потенциала начинает резко уменьшаться. По известным значениям  $U_k$  рассчитаны величины вторичной электронной эмиссии  $\gamma$ . Величина  $\gamma$ , рассчитанная для случая атмосферного давления, составляет  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ , что хорошо согласуется с литературными данными. Обращает на себя внимание то, что при токах выше 40 мА и в диапазоне давлений 0,4÷0,7 атм. величина коэффициента вторичной электронной эмиссии достигает значений  $10^{-2}$ - $10^{-1}$ , что, вообще говоря, характерно, скорее, для металлических катодов.

В спектрах излучения зарегистрированы полосы  $1^+$  и  $2^+$  систем  $N_2$ , линии атомарного кислорода, полосы  $\gamma$ -системы NO, OH ( $A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$ ) и линии атомарного водорода ( $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ). Увеличение тока разряда свыше 50-60 мА приводит к появлению в спектре излучения линий Cu, что связано, по-видимому, с эмиссией меди из анода. Заселенности нижних колебательных уровней  $N_2(C^3\Pi_u)$  достаточно хорошо описываются распределением Больцмана. Эффективная колебательная температура при атмосферном давлении лежит в диапазоне 5500-6500 К и снижается с уменьшением давления до величины  $\sim 3000$  К.

В работе [67] показано, что с увеличением логарифма концентрации водного раствора  $ZiCl$ , 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.

Разряды с водными растворами, используемыми в качестве катода, изучены в [68]. Отмечено, что процессы в разрядах с водными капельками или частичками льда, являющимися катодами, имеют существенное значение для понимания механизма образования молнии в грозовых тучах. Цель работы [68] состоит в выяснении механизма электронной эмиссии диэлектрического катода. Излагаются результаты экспериментального исследования спектра шумов разряда при использовании в качестве катода растворов  $Na_2SO_4$  различной концентрации. При увеличении концентрации раствора обнаружены возрастание шума и возникновение неустойчивости

разряда. Исследование спектра светового излучения слоя жидкости, 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 жидкости связано с фотоионизацией молекул воды. При достаточно высокой плотности тока электрическое поле, проникающее в электролит, вытягивает электроны из микропузырьков плазмы, находящихся внутри жидкости.

В [70] в результате визуального наблюдения за структурой разрядного промежутка разряда с электролитным катодом обнаружены зоны, характерные именно для тлеющего разряда, – катодный слой и область отрицательного тлеющего свечения. Вплоть до предельно высоких токов разряда ( $10^4$  А) на электролитном катоде устойчив тлеющий режим разряда. В [69] также приводятся результаты исследований разряда между жидким неметаллическим катодом и металлическим анодом в диапазоне  $P = (5,32-10^4)$  Па,  $I = (1-15) \cdot 10^4$  мА и  $l = (1-15)$  мм для различного состава и концентрации жидкого катода. При атмосферном давлении плазменный столб  $l$  (рис. 1.3а) от твердого анода до жидкого неметаллического катода принимает вид усеченного конуса. Вершина конуса – пятно 2 малого размера на поверхности металлического анода. Основание конуса – почти точечные пятна 3 на поверхности жидкого катода. В теории тлеющего разряда его опорные пятна не принято называть катодными и анодными пятнами. Эти термины применяются для краткости. Непосредственно у поверхности катода имеется ярко светящийся слой фиолетового цвета с резкими границами. В исследованном диапазоне параметров цвет этого слоя не зависит от концентрации соли и величины тока. 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 красный цвет, который затем переходит в фиолетовый. В прианодной области цвет свечения зависит от материала твердого анода. Если в качестве анода используется медь, то в прианодной области имеет место зеленое свечение. Это объясняется проникновением паров меди в положительный столб из анодного пятна. Анодное пятно имеет ярко-красный цвет. Его диаметр увеличивается с ростом тока. При атмосферном давлении (рис. 1.3б)  $l = 9,5$  мм и  $I = 100$  мА, разряд

состоит из центрального токопроводящего плазменного столба (ПС) фиолетового цвета 1 и ореола 2. Цвет ореола зависит от состава жидкого катода. Плазменный столб на расстоянии 5 мм от анода имеет почти цилиндрическую форму диаметром 2 мм и опирается на контрагированное пятно. На расстоянии 4,5 мм от катода он постепенно расширяется и приобретает форму усеченного конуса. Вблизи поверхности жидкого катода ПС распадается на множество микроразрядов, опирающихся на точечные пятна 4. При малых  $I$  от каждого точечного пятна формируются отдельные микроразряды. На рис. 1.3а они направлены к твердому аноду. С ростом тока число микроразрядов увеличивается.

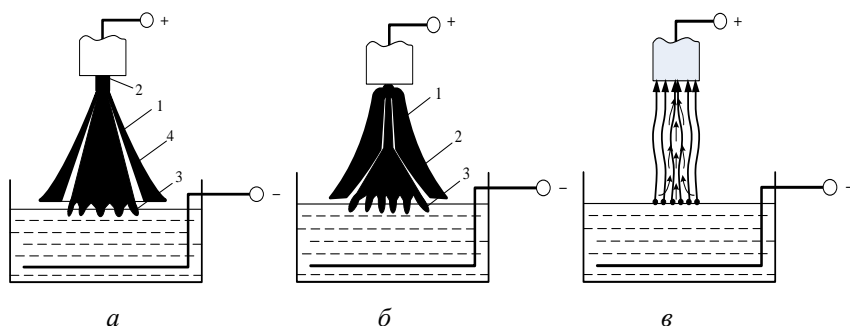


Рис. 1.3. Плазменный столб разряда при атмосферном давлении

Плазменный столб расширяется до тех пор, пока не заполнится пятном вся поверхность анода. Если увеличивать поверхность твердого анода, то ПС разряда постепенно начинает принимать форму объемного усеченного конуса. Число точечных пятен на жидком катоде продолжает расти. Формируется высоковольтный разряд, состоящий из множества микроразрядов.

Наиболее важной интегральной характеристикой разряда является его вольт-амперная характеристика (ВАХ). По ней можно узнать о процессах, происходящих внутри разряда, и о свойствах плазмы. На рис. 1.4 представлены ВАХ разряда, когда электролитом служит техническая вода [70]. Как видно, ВАХ объемного разряда в некоторой степени зависит от диаметра анода и практически не зависит от его материала. При диаметре анода 5 мм (рис. 1.4, линия 1) вольтамперная характеристика является возрастающей. Одной из возможных причин такой зависимости является то, что разряд

оказывает давление на поверхность электролита, вследствие чего поверхность электролита прогибается вовнутрь, и межэлектродное расстояние увеличивается. С увеличением диаметра анода крутизна вольтамперной характеристики уменьшается (рис. 1.4, линии 5, 4 и 2), и в конечном итоге напряжение горения разряда перестает меняться при изменении тока (рис. 1.4, линии 3 и 6). В работах [71, 72] получены падающие вольтамперные характеристики (рис. 1.4, линии 7 и 8).

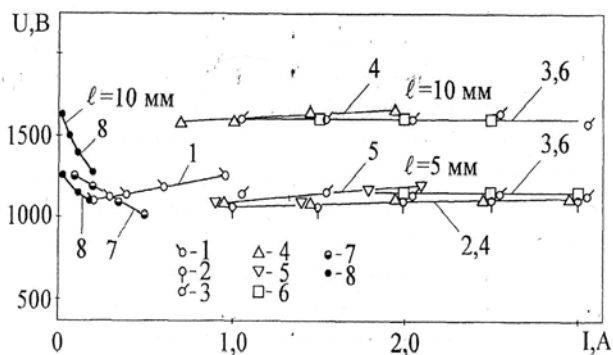


Рис. 1.4. Вольт-амперные характеристики разряда с электролитным катодом в виде электролитической ванны

В работе [73] впервые приведены результаты исследований низковольтного разряда в электролите, проведенных еще в конце прошлого века [74].

В [75] 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 [76], в котором 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<sub>1</sub> выше 100 А. Авторы [75] считают, 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 [76]. Плотность тока на катоде при атмосферном давлении меняется от  $3 \cdot 10^4$  до  $4 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup> при токах соответственно 0,1 и 300 А.

В [77] представлены результаты экспериментального исследования электрического разряда в воздухе при атмосферном давлении между твердым анодом и жидким катодом в виде электролита, который смачивает пористый диэлектрик. Электролитом служили техническая вода и водные растворы NaCl различной концентрации. Исследования проводились в следующих диапазонах изменения параметров: ток  $I = 0,2 \dots 3,5$  А, межэлектродное расстояние  $l = 5 \dots 50$  мм, диаметр пористого диэлектрика  $d = 40 \dots 90$  мм. Разряд зажигался взрывом тонкой медной проволоки.

Расположение электродов: верхний – анод, нижний – катод. Диаметр пористого тела 90 мм. Электролит – техническая вода. Анод: 1 – сталь 30 мм, 2 – медь 38 мм, 3 – чугун 65 мм.

На рис. 1.5 представлены ВАХ разряда, когда электролитом служит техническая вода [77]. При малых межэлектродных расстояниях диапазон тока, соответствующий объемному разряду, смещается в сторону малых токов. Например, при  $l = 5$  мм объемный разряд реализуется в диапазоне токов от 0,7 до 2,2 А. Максимальное межэлектродное расстояние, при котором формируется объемный разряд, зависит от геометрического объема разряда и соотношения диаметров анода и пористого тела катода. При одном и том же диаметре пористого тела катода, равном 90 мм, увеличение диаметра анода от 30 до 65 мм приводит к увеличению максимального межэлектродного расстояния от 15 до 25 мм.

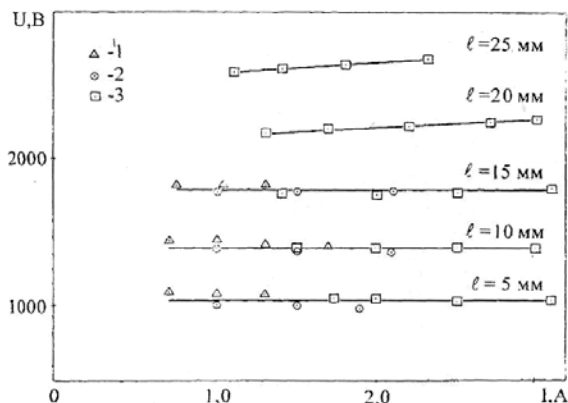


Рис. 1.5. Вольтамперная характеристика разряда с пористым электролитным катодом

В [78] 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 [79], имеет место пробой «слабых» мест диэлектрического слоя на аноде. В [80] 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 анодом. Показано, что все прикладываемое на электролитическую ячейку напряжение падает на прианодном участке. Аналогичные результаты были получены в работе [79]. В [81-83] 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,