Самитова, Гульнара Торекульевна. Электрические разряды постоянного тока в движущихся пузырьках воздуха в электролите с образованием плазменной струи вне диэлектрической трубки : диссертация ... кандидата технических наук : 01.02.05 / Самитова Гульнара Торекульевна; [Место защиты: Казан. нац. исслед. технол. ун-т].- Казань, 2013.- 124 с.: ил. РГБ ОД, 61 14-5/810

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. А.Н. ТУПОЛЕВА-КАИ»**

**04201455333**

**САМИТОВА ГУЛЬНАРА ТОРЕКУЛЬЕВНА**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ДВИЖУЩИХСЯ ПУЗЫРЬКАХ ВОЗДУХА В ЭЛЕКТРОЛИТЕ С ОБРАЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ВНЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРУБКИ**

**01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы**

**Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель:**

**доктор физико-математических наук,**

**профессор Гайсин Ф. М.**

**Казань 2013**

**Глава 1**

**Содержание**

**Принятые обозначения. Введение**

**Анализ известных экспериментальных и теоретических исследований электрических разрядов между твердым и электролитическим электродами, а также практических**

**10**

**10**

**13**

**22**

**31**

**47**

**52**

**56**

**56**

**59**

**61**

**62**

**применений**

1.1.

**1**.**2**.

**1.3.**

**1.4.**

**1.5.**

**1**.**6**.

**Глава 2** 2.1.

2.2.

**2.3.**

**2.4.**

**Глава 3**

**Электрические разряды между твердыми электродами в**

**электролите**

**Электрические разряды в пузырьках и парах жидкости**

**Стримерные разряды в жидкости**

**Разряды в газах с одним или *двумя* жидкими электродами .. Перспективы применения электрического разряда с**

**электролитическими электродами**

**Постановка задачи диссертации**

**Экспериментальная установка и методика измерений**

**Высоковольтная экспериментальная установка (выходное**

**напряжение до 1500 В и при токе 2 А)**

**Вакуумная система экспериментальной установки**

**Разрядное устройство**

**Измерительная аппаратура и методика проведения экспериментов, и оценка точности измерений**

**Результаты экспериментальных исследований**

**экспериментального разряда постоянного тока в движущихся пузырьках воздуха в электролите с образованием плазменной струи вне диэлектрической трубки**

**з**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **3.1.** | **Электрический пробой и колебания тока разряда** | **64** |
| **3.2.** | **Формы многоканального разряда и переход в объемный** |  |
|  | **разряд** | **70** |
|  | **..... ....** |  |
| **3.3.** | **Развитие многоканального разряда внутри длинных** |  |
|  | **пузырьков воздуха в электролите** | **75** |
| **3.4.** | **Вольтамперные характеристики МР и ОР** | **79** |
| **3.5.** | **Электрический разряд вокруг металлического электрода** |  |
|  | **погруженного в электролит через диэлектрическую трубку .** | **81** |
| **3.6.** | **Распределение температуры вдоль диэлектрической трубки** | **84** |
| **Глава 4.** | **Устройства для получения МР, ОР и вихревого разряда в** |  |
|  | **диэлектрической трубке с движущимися пузырьками** |  |
|  | **воздуха в электролите при атмосферном и пониженных** |  |
|  | **давлениях, а также паровоздушной струи плазмы и** |  |
|  | **методика обработки электролита и повышение класса** |  |
|  | **шероховатости стальной проволоки** | **86** |
| **4.1.** | **Устройство для получения многоканального и объемного** |  |
|  | **разряда в диэлектрической трубке с движущимися** |  |
|  | **пузырьками воздуха в электролите** | **86** |
| **4.2.** | **Устройство и методика обработки электролита МР, ОР и** |  |
|  | **вихревым разрядом в движущихся пузырьках воздуха** | **87** |
| **4.3.** | **Устройство для получения паровоздушной струи плазмы** |  |
|  | **вне диэлектрической трубки** | **92** |
| **4.4.** | **Устройство повышения класса шероховатости стальной** |  |
|  | **проволоки марки сталь 3 объемного разряда внутри** |  |
|  | **диэлектрической трубки с движущимися пузырьками** |  |
|  | **воздуха в электролите** | **94** |
| **4.5.** | **Получение уравнения регрессии для нахождения** |  |
|  | **оптимальных режимов обработки поверхности стальной** |  |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **проволоки** | **96** |
| **Выводы**  **Список использованной литературы**  **Примечание** | | **98**  **101**  **124** |

**Принятые обозначения**

**/- сила тока разряда;**

***U*- напряжение разряда;**

***G* - расход электролита;**

***d, -* диаметр диэлектрической трубки;**

***dn* - диаметр пузырьков;**

***1Т -* длина струи;**

**/п - длина пузырьков;**

***h„-* расстояние на которое погружены стальные проволоки в электролит через диэлектрическую трубку; *v* - скорость движения пузырьков;**

***Р* - давление;**

***Т* - температура электролита в трубке.**

**Сокращения**

**ВАХ - вольтамперная характеристика;**

**ЭР - электрический разряд;**

**МР - многоканальный разряд;**

**ОР - объемный разряд;**

**АТР - аномальный тлеющий разряд.**

**ВВЕДЕНИЕ**

**Неравновесная низкотемпературная плазма электрического разряда (ЭР) с жидкими электродами привлекла внимание исследователей в виду их довольно широких применений для защиты окружающей среды, медицины и новых технологий в промышленности [1-17 и др.].**

**Электрические разряды с использованием жидких электродов создают УФ излучение, ударные волны и активные радикалы (ОН, атомарный кислород, пероксид водорода и т.д.) каждый из них является эффективным средством против биологических и химических загрязнений. В связи с этим электрические разряды с жидкими электродами становятся особенно полезными для целей стерилизации и очистки растворов. Однако существенная сложность плазмы ЭР с жидкими электродами не позволяет полное понимание физических процессов, происходящих в указанных разрядах и это остается не достигнутым. Например, электрический пробой в жидкостях является более сложным явлением, чем в твердых телах и газах. Это связано с формированием микропузырьков воздуха в жидкости. Анализ литературных данных показал, что наряду с изучением ЭР с жидкими электродами большой интерес, как научной точки зрения, так и практической представляют электрические разряды в движущихся пузырьках воздуха в электролите с образованием струи плазмы вне диэлектрической трубки.**

**В настоящее время электрические разряды постоянного тока в движущихся пузырьках воздуха в электролите с образованием струи плазмы вне диэлектрической трубки практически не изучены. Не исследованы влияния размеров и форм воздушных пузырьков воздуха на развитие электрического пробоя и разряда в диэлектрической трубке с электролитом. Не изучены особенности перехода многоканального разряда (МР) в объемный разряд (ОР) в электролите с движущимися пузырьками воздуха. Практически не исследованы развитие МР внутри длинных пузырьков воздуха, образование плазменной струи вне диэлектрической трубки и**

**горение электрического разряда вихревой формы в электролите при атмосферном давлении.**

**Все это сдерживает разработку и создание новых плазменных установок и технологий с использованием электрических разрядов постоянного тока в движущихся пузырьках воздуха в электролите с образованием струи плазмы вне диэлектрической трубки. В связи с вышеизложенным, экспериментальное исследование электрического разряда в движущихся пузырьках воздуха в электролите с образованием плазмы вне диэлектрической трубки при атмосферном и пониженных давлениях является актуальной задачей.**

**Данная диссертационная работа, состоящая из четырех глав, посвящена решению этих задач.**

**В первой главе проведен анализ известных экспериментальных и теоретических исследований ЭР в электролите, там же обсуждаются области их практических применений, сформулированы задачи диссертационной работы.**

**Во второй главе приведено описание экспериментальной установки, предназначенной для исследования многоканального и объемного разряда, разряда вихревой формы постоянного тока в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите. Представлена функциональная схема установки для получения электрического разряда постоянного тока в движущихся пузырьках воздуха в электролите с образованием плазменной струи вне диэлектрической трубки. Здесь же приводится измерительная аппаратура, методика проведения экспериментов и оценка точности измерений.**

**В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований ЭР постоянного тока в диэлектрической трубке в электролите с движущимися пузырьками воздуха в электролите. Приведены результаты исследования: электрического пробоя и колебания тока разряда; формы многоканального разряда; переход многоканального разряда в ОР; развитие многоканального разряда внутри длинных пузырьков в электролите; вольтамперные характеристики МР и ОР; спектральные характеристики МР кольцевой формы; электрического разряда вокруг металлического электрода, погруженного в электролит через диэлектрическую трубку; распределения температуры на поверхности диэлектрической трубки.**

**В четвертой главе разработаны и созданы устройства для обработки электролита с использованием МР, ОР и разряда вихревой формы в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите. Устройство для получения паровоздушной струи плазмы с использованием ОР в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите при атмосферном давлении.**

**Разработаны методики обработки электролита МР, ОР и разрядом вихревой формы в диэлектрической трубке в движущихся пузырьках воздуха в электролите: очистки и повышения класса шероховатости стальной проволоки (марки сталь 3) с использованием МР и ОР в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха.**

**Научная новизна исследований:**

**В результате экспериментального исследования электрического разряда постоянного тока в движущихся пузырьках воздуха в электролите с образованием плазменной струи вне диэлектрической трубки в диапазоне *Р* = 103-105 Па установлено:**

* **горение МР, ОР и вихревой формы в диэлектрической трубке с электролитом;**
* **переход многоканального разряда в объемный форме в электролите с ростом / от 800 до 900 мА;**
* **развитие многоканального разряда внутри длинных пузырьков воздуха;**
* **образование плазменной струи вне диэлектрической трубки с диаметром отверстия *dc* ~ 1,5-2,5 мм на поверхности трубки;**
* **образование низкочастотных и высокочастотных колебаний тока многоканального разряда;**
* **переход МР в аномальный тлеющий разряд (АТР) при пониженных давлениях *(Р <* 6-104 Па);**
* **уменьшение отрицательных ионов хлора (СГ) и наибольшая**

**интенсивность линии Na 5760А после обработки электролита МР.**

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. **Результаты экспериментального исследования особенности**

**развития электрического пробоя и многоканального разряда в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите при атмосферном давлении.**

1. **Результаты экспериментального исследования особенности**

**развития многоканального разряда в диэлектрической трубке с электролитом**

**внутри длинных пузырьков воздуха при атмосферном давлении.**

1. **Результаты экспериментального исследования развития объемного разряда и разряда вихревой формы в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите при атмосферном давлении, а также электрические, температурные, спектральные и хроматографические характеристики в диапазоне давлений 103-105 Па.**
2. **Методика очистки и повышения класса шероховатости стальной проволоки (марки сталь 3) с использованием многоканального и объемного разряда в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите при атмосферном давлении.**

Методика обработки электролита многоканальным, объемным и разрядом вихревой формы в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите при атмосферном давлении.

**Выводы**

1. **Разработаны и созданы разрядные камеры экспериментальной установки для исследования ЭР постоянного тока в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите с образованием плазменной струи вне диэлектрической трубки при *Р* = 103-105 Па, *U =* 200-1500 В, /= 0,02-2,5 A, *G =* 1,4-8,3 г/с, г» = 0,15-0,98 м/с, *1Т=* 100-400 мм и dT= 5-20 мм для насыщенного и 10% раствора NaCl в технической воде. Установка позволяет проводить экспериментальные исследования электрического пробоя, структуры и формы МР, ОР и разряда вихревой формы, электрических, температурных, спектральных и хроматографических характеристик, а также колебания напряжения и тока разряда.**
2. **Изучено развитие электрического пробоя между медной проволокой, для подвода положительного потенциала и электролитом с пузырьками. Выявлено возникновение ударной волны после пробоя. Установлено, что до и после электрического пробоя наблюдаются многоканальные разряды полукольцевой, кольцевой и S-образной формы в электролите. Показано образование низкочастотных и высокочастотных колебаний тока МР.**
3. **Изучен переход многоканального разряда полукольцевой, кольцевой и S-образной формы в объемный разряд в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите при атмосферном давлении. Показано, что цвет в ОР меняется как вдоль, так и поперек диэлектрической трубки от белого до красного. Установлен спектр многоканального разряда кольцевой формы внутри стеклянной трубки. Обнаружено, что линии Na 5760 А является наиболее интенсивной. Установлено уменьшение отрицательных ионов (СГ) в электролите из насыщенного раствора NaCl после обработки МР в течение времени 500 с на 20,8%. Выявлено образование коагулированных структур в электролите после воздействия МР, ОР разрядом вихревой формы.**
4. **Изучено развитие многоканального разряда внутри длинных пузырьков воздуха. Установлено, что с ростом времени от 0,04 до 0,2 с длина пузырька воздуха в электролите увеличивается под воздействием МР в три раза от первоначального, а диаметр пузырька почти не меняется. Выявлены особенности развития МР внутри длинных пузырьков воздуха.**
5. **Обнаружено, что вокруг металлического провода, погруженного в электролит через диэлектрическую трубку для подвода положительного потенциала горит многоканальный разряд и разряд вихревой формы. Выявлены особенности горения МР и разряда вихревой формы на поверхности металлического провода. Представлены ВАХ и температурные характеристики многоканального и объемного разряда при атмосферном и пониженных давлениях. Показано, что ВАХ становятся возрастающими. Установлено, что с понижением давления от 6-Ю4 до 103 Па многоканальный разряд переходит в аномальный тлеющий разряд. Выявлено неоднородное распределение температуры вдоль диэлектрической трубки.**
6. **Разработаны и созданы устройства:**

* **разработано и создано устройство для получения электрического разряда в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите при атмосферном и пониженных давлениях.**
* **разработаны и созданы устройства для обработки электролита с использованием многоканального, объемного и разряда вихревой формы в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите при атмосферном и пониженных давлениях.**
* **разработано и создано устройство для получения паровоздушной струи плазмы с использованием ОР в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите при атмосферном давлении.**

1. **Разработаны методики:**

* **обработки электролита многоканальным, объемным и разрядом вихревой формы в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите;**

**- очистки и повышения класса шероховатости стальной проволоки (марки сталь 3) с использованием МР и ОР в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите.**

1. **Выведено уравнение регрессии для нахождения оптимальных режимов повышения класса шероховатости стальной проволоки (марки сталь 3) в диэлектрической трубке с движущимися пузырьками воздуха в электролите.**

**Список использованной литературы**

1. **Энгель А., Штеенбек М. Физика и техника электрического разряда в газах, т.П; Пер. с нем. /Под ред. Капцова Н.А. -М.: —JL: ОНТИ. 1936.**
2. **Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах: Пер. с англ. /Под ред. Капцова Н.А. -М.: -Л.: Гостехиздатель, 1950. -672 с.**
3. **Капцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. -Изд. 2-е. -М.: - Л.: Гостехиздат, 1950. -836 с.**
4. **Капцов Н.А. Электроника. -М.: Гостехиздат, 1956. -459 с.**
5. **Энгель А. Ионизированные газы. -М.: Физматгиз, 1959. -332 с.**
6. **Мик Дж., Крег Дж. Электрический пробой в газах. -М.: ИЛ, 1960. -601 с.**
7. **Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. -М.: Госатомиздат, 1961.-323 с.**
8. **Ретер Г. Электронные лавины и прибой в газах. -М.: Мир, 1968. -390 с.**
9. **Грановский В.Л. Электрический ток в газе /установившийся ток/. -М.: Наука, 1971. -544 с.**
10. **Смирнов Б.М. Физика слабоионизированного газа. -М.: Наука, 1972.**
11. **Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. - М.: Наука, 1980. -416 с.**
12. **Райзер Ю.П. Физика газового разряда. -М.: Наука, 1987. -591 с.**
13. **Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда: Пер. с англ. ИванчикаИ.И. -М.: Атомиздат, 1980.**
14. **Велихов Е.П., Голубев B.C., Пашкин С.В. Тлеющий разряд в потоке газа. Успехи физ.наук, 1982. Т.137, вып. I. С 117-150.**
15. **Баранов В.Ю., Напартович А.П., Старостин А.И. Тлеющий разряд в газах повышенного давления. - В кН.: Итоги науки и техники. Физика плазмы. -М.: ВИНИТИ. Т.5. 1984. С. 90-171.**
16. **Велихов Е.П., Ковалев А.С., Рахимов А.Т. Физические явления в газоразрядной плазме. -М.: Наука, 1987. С. 160.**
17. **Словецкий Д.И, Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. -М.: Наука, 1980. -130.**
18. **Sunka Р 2001 Pulse electrical discharges in water and their applications Phys. Plasmas 8 2587-94.**
19. **Locke В R, Sato M, Sunka P, Hoffmann M R and Chang J S 2006 Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment Indust. Eng. Chem. Res. 45 882-905.**
20. **Akiyama H 2000 Streamer discharges in liquids and their applications IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.7 646-53.**
21. **An W, Baumung К and Bluhm H 2007 Underwater streamer propagation analyzed from detailed measurements of pressure release J. Appl. Phys. 101 053302.**
22. **Schoenbach K, Kolb J, Xiao S, Katsuki S, Minamitani Y and Joshi R 2008 Electrical breakdown of water in microgaps Plasma Sources Sci. Technol. 17 024010.**
23. **Bluhm H 2006 Pulsed Power Systems: Principles and Applications (Berlin: Springer).**
24. **Chen Y S, Zhang X S, Dai Y С and Yuan W К 2004 Pulsed high-voltage discharge plasma for degradation of phenol in aqueous solution Separation Purification Technol. 34 5-12.**
25. **Shin W T, Yiacoumi S, Tsouris С and Dai S 2000 A pulseless corona- discharge process for the oxidation of organic compounds in water Indust. Eng. Chem. Res. 39 4408-14.**
26. **Kostyuk P V, Park J Y, Han S В and Park S H 2008 Effect of Ni and Ti02 on hydrogen generation from aqueous solution with non-thermal plasma J. Phys. D: Appl. Phys. 41 095202.**
27. **Miichi T, Ihara S, Satoh S and Yamabe С 2000 Spectroscopic measurements of discharges inside bubbles in water Vacuum 59 236-43.**
28. **Akishev Y S et al 2006 Generation of a nonequlibrium plasma in heterophase atmospheric-pressure gas-liquid media and demonstration of its sterilization ability Plasma Phys. Rep. 32 1052-61.**
29. **Anpilov A M et al 2001 Electric discharge in water as a source of UV radiation, ozone and hydrogen peroxide J. Phys. D: Appl. Phys. 34 993-9.**
30. **Bruggeman P, Degroote J, Vierendeels J and Leys С 2008 Dc-excited discharges in vapour bubbles in capillaries Plasma Sources Sci. Technol. 17 025008 (7pp).**
31. **Bruggeman P J, Leys С A and Vierendeels J A 2006 Electrical breakdown of a bubble in a water-filled capillary J. Appl. Phys. 99 116101.**
32. **Bruggeman P, Leys С and Vierendeels J 2007 Experimental investigation of dc electrical breakdown of long vapour bubbles in capillaries J. Phys. D: Appl. Phys. 40 1937-43.**
33. **Bruggeman P, Degroote J, Vierendeels J and Leys С 2007 Plasma characteristics in air and vapor bubbles in water Proc. 28th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (Prague, Czech Republik) pp 859-62.**
34. **Bruggeman P, Degroote J, Leys С and Vierendeels J 2008 Electrical discharges in the vapor phase in liquid-filled capillaries J. Phys. D: Appl. Phys. 41 194007 (4pp).**
35. **Evju J K, Howell P B, Locascio L E, Tarlov M J and Hickman J J 2004 Atmospheric pressure microplasmas for modifying sealed microfluidic devices Appl. Phys. Lett. 84 1668-70.**