

Keywords

Authors

volume (year)

page

DOI

Search

## Меню

[О журнале](#)[Учредитель](#)[Контакты](#)[Редакционная коллегия](#)[Политика журнала](#)[Информация для авторов](#)[Договор о передаче авторского права](#)

## Архив журнала

[Выпуски 2014 - 2021 гг.](#)[Том 57 \(2021\)](#)[Том 56 \(2020\)](#)[Том 55 \(2019\)](#)[Том 53 \(2017\)](#)[Номер 6](#)[Номер 5](#)[Номер 4](#)[Номер 3](#)[Номер 2](#)[Номер 1](#)[Том 52 \(2016\)](#)[Том 51 \(2015\)](#)[Том 50 \(2014\)](#)[Выпуски 2004 - 2013 гг.](#)[Выпуски 1994 - 2003 гг.](#)[Подписка на журнал](#)

## Том 53 (2017), Номер 3

- <https://doi.org/10.5281/zenodo.1053473> стр. 1-5

**Влияние коронного разряда на морфологию и интенсивности фотолюминесценции нанокompозитов на основе полипропилена (ПП) и наночастиц диоксида циркония (ZrO<sub>2</sub>)**  
Рамазанов М.А., Гаджиева Ф.В., Магеррамов А.М., Гасанова У.А.

Скачать полнотекстовый PDF. 746 скачиваний
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.1053481> стр. 6-11

**Влияние гамма-облучения на электретные свойства полиэтилена**  
Гужова А.А., Галиханов М.Ф.

Скачать полнотекстовый PDF. 834 скачиваний
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.1053487> стр. 12-18

**Электропроводность и диэлектрическая проницаемость  $\gamma$ -облученных нанокompозитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с наполнителем  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>**  
Исмайлова П.С., Магеррамов А.М., Кулиев М.М., Ахундова Г.А.
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.1053495> стр. 19-24

**Повышение электретных свойств полистирола при введении диоксида титана**  
Галиханов М.Ф.

Скачать полнотекстовый PDF. 761 скачиваний
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.1053511> стр. 25-32

**Исследование процесса электролитного борирования стальных деталей**  
Буйлов В.Н., Люляков И.В.

Скачать полнотекстовый PDF. 815 скачиваний
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.1053519> стр. 33-40

**Асимптотический анализ электромагнитного излучения незаряженной сферической капли, осциллирующей в электростатическом поле**  
Ширяева С.О., Григорьев А.И., Колбнева Н.Ю.

Скачать полнотекстовый PDF. 751 скачиваний
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.1053521> стр. 41-46

**Электрические характеристики тлеющего разряда в воздухе над поверхностью раствора сульфата алюминия в воде**  
Шуаибов А.К., Чучман М.П., Месарош Л.В.


Скачать полнотекстовый PDF. 838 скачиваний
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.1053527> стр. 47-54

**Контактное вытеснение меди в процессах меднения деталей из углеродистой стали**  
Майзелис А.А., Байрачный Б.И., Тульский Г.Г.

**Menu**[О журнале](#)[Учредитель](#)[Контакты](#)[Редакционная коллегия](#)[Политика журнала](#)[Информация для авторов](#)[Договор о передаче авторского права](#)[Архив журнала](#)[Подписка на журнал](#)

## О журнале

Журнал «*Электронная обработка материалов*» основан в 1965 г. академиком Б. Р. Лазаренко, выдающимся ученым в области электроискровой обработки материалов.

Журнал «*Электронная обработка материалов*» - это некоммерческий научный журнал, в котором публикуются статьи в открытом доступе в рамках лицензии  [Creative Commons Attribution 4.0 International License](#).

Журнал публикует работы, содержащие результаты оригинальных исследований и обзоры по актуальным направлениям теоретических основ и практических применений электроэрозионных и электрохимических методов обработки материалов, физико-химических методов получения макро-, микро- и наноматериалов, исследования их свойств, электрических процессов в технике, химии, при обработке биологических и пищевых объектов, электромагнитных полей в биосистемах.

Страницы истории журнала можно проследить в следующих публикациях:

1. Болога, М.К., Журналу настоящего и будущего – “Электронная Обработка Материалов” – 55 лет, ЭОМ, 2020, т. 56, № 1, сс. 1-13. doi:10.5281/zenodo.3669595.
2. Конунова, Г.А., Дикусар, А.И., Журнал “Электронная обработка материалов”, Новый этап развития. ЭОМ, 2011, т. 47, № 4, сс. 56-59.

По рекомендации Редколлегии ЭОМ отдельные статьи из «Электронной обработки материалов» публикуются в журнале “*Surface Engineering and Applied Electrochemistry*” (<https://www.pleiadesonline.ru/journal/surfeng/main/>) который издается компанией Pleiades Publishing (США), на английском языке и распространяется компанией Springer <https://www.springer.com/journal/11987>.

Периодичность выхода в свет - 6 номеров в год.

Keywords

Authors

volume (year)

page

DOI

Search

**Меню**

[О журнале](#)

[Учредитель](#)

[Контакты](#)

**[Редакционная коллегия](#)**

[Политика журнала](#)

[Информация для авторов](#)

[Договор о передаче авторского права](#)

[Архив журнала](#)

[Подписка на журнал](#)

## Редакционная коллегия

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Мирча К. Болога**, Доктор технических наук, профессор, Академик АН Молдовы, Институт прикладной физики, Кишинев, Молдова, ORCID ID 0000-0002-6282-9666

### ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**Александр И. Дикусар**, Доктор химических наук, профессор, Член-Корреспондент АН Молдовы, Институт прикладной физики, Кишинев, Молдова, ORCID ID 0000-0003-0402-3122

### ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

**Татьяна Дмитриевна Шемякова**, Канд. физ.-мат. наук, Институт прикладной физики, Кишинев, Молдова

## РЕДКОЛЛЕГИЯ

<b>Андрей М. Болога</b>	Доктор технических наук	Технологический институт Карлсруэ, Карлсруэ, Германия	ORCID 0000-0002-8312-0475
<b>Владимир М. Волгин</b>	Доктор технических наук, профессор	Тульский государственный университет, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Тула, Россия	ORCID 0000-0001-5029-4316
<b>Дарья З. Грабко</b>	Доктор физико-математических наук	Институт прикладной физики, Кишинев, Молдова	ORCID 0000-0002-4319-367X
<b>Анатолий И. Жакин</b>	Доктор физико-математических наук, профессор	Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия	ORCID 0000-0001-5635-814
<b>Али Захид</b>	Доктор	Консалтиговая компания Qu & Co BV, Амстердам, Нидерланды	ORCID 0000-0001-5211-5289
<b>Геннадий С. Коротченков</b>	Доктор физико-математических наук	Молдавский Государственный университет, Кишинев, Молдова	ORCID 0000-0002-3973-9051
<b>Николай Д. Кошель</b>	Доктор химических наук, профессор	Украинский государственный университет химической технологии, Днепр, Украина	ORCID 0000-0001-6979-7546
<b>Борис Л. Крит</b>	Доктор технических наук, профессор	Московский авиационный института, Москва, Россия	ORCID 0000-0001-9664-3008
<b>Уэнбин Ксю</b>	Профессор	Пекинский педагогический университет, Пекин, Китай	ORCID 0000-0003-1876-8539

<b>Вячеслав С. Проценко</b>	Доктор химических наук, профессор	Украинский государственный химико-технологический университет, Днепр, Украина	ORCID 0000-0002-5959-0426
<b>Борис П. Саушкин</b>	Доктор технических наук, профессор	Авиационный институт, Москва, Россия	ORCID 0000-0002-3273-6042
<b>Хенрикас Цесиулис</b>	Доктор химических наук, профессор	Вильнюсский Университет, Вильнюс, Литва	ORCID 0000-0002-5077-7884
<b>Вячеслав В. Ураски</b>	Доктор физико-математических наук	Технический Университет, Кишинев, Молдова	ORCID 0000-0003-4488-850X
<b>А. Китхаранджан Хегде</b>	Доктор химических наук, профессор	Национальный Технологический институт, Карнатака, Суратхал, Индия	ORCID 0000-0002-0225-208X
<b>Михаил Л. Хейфец</b>	Доктор технических наук, профессор	Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь	ORCID 0000-0002-6942-3605
<b>Витенис Янкаускас</b>	Доктор физико-математических наук, профессор	Университет имени Александра Стульгинского, Каунас, Литва	ORCID 0000-0003-4791-7097
<b>Виталий В. Янилкин</b>	Доктор химических наук, профессор	Институт органической и физической химии им. А. Арбузова РАН, Казань, Россия	ORCID ID 0000-0002-5087-9901

#### КОНСУЛЬТАТИВНЫЙ КОМИТЕТ

<b>Жан-Пьер Целис</b>	Др. наук, профессор	Католический Университет, Левен, Бельгия ORCID ID 0000-0002-2086-1452
<b>Анатолий П. Достанко</b>	Доктор технических наук, профессор. Академик НАН Беларуси	Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь
<b>Александр И. Григорьев</b>	Доктор физ.мат. наук, профессор.	Ярославский государственный университет, Ярославль, Россия
<b>Ариф М. Гашимов</b>	Доктор технических наук, профессор Академик НАН Азербайджана	Институт физики, Национальная Академия наук Азербайджана Баку, Азербайджан
<b>Дигби Д. Макдоналд</b>	Др. наук, профессор	Пенсильванский Университет, Пенсильвания, США ORCID ID 0000-0002-4749-9035
<b>Ион М. Тигиняну</b>	Доктор физ.-мат. наук, профессор, Академик АН Молдовы	АН Молдовы, Кишинев, Молдова ORCID ID 0000-0003-0893-0854
<b>Юрий К. Стишков</b>	Доктор технических наук, профессор	Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия ORCID ID 0000-0003-2159-0057

# Электрические характеристики тлеющего разряда в воздухе над поверхностью раствора сульфата алюминия в воде

\* А. К. Шуаибов, М. П. Чучман, Л. В. Месарош

*Ужгородский национальный университет,*

*ул. Народная, 3, г. Ужгород, 88000, Закарпатская область, Украина, \*e-mail: alexsander shuaibov@uzhnu.edu.ua*

Приведены вольт-амперные характеристики, величины катодного падения потенциала, зависимости полной и удельной мощности тлеющего разряда, которая вкладывалась в плазму от величины тока разряда, а также плотность электронов в тлеющем разряде в воздухе атмосферного давления с катодом на основе 1–10-процентных растворов сульфата алюминия в дистиллированной воде. Расстояние от жидкого электролитического катода до металлического анода варьировалось в диапазоне 1–10 мм при среднем токе разряда 8–36 мА. Разряд перспективный для синтеза наноструктур из алюминия и его оксида, которые образуются вследствие обработки растворов тлеющим разрядом.

*Ключевые слова: тлеющий разряд с жидким катодом, водный раствор сульфата алюминия, электрические характеристики.*

УДК 537.525

## ВВЕДЕНИЕ

Тлеющий разряд в воздухе атмосферного давления между металлическим анодом и водяным или жидким электролитическим катодом отличается простотой реализации и управления параметрами плазмы, дешевизной используемых материалов, большим количеством различных практических применений в плазмохимии, а также конверсией химических соединений в объеме разряда и на поверхности жидкости. В экологии применяется для очистки воздуха и воды, утилизации вредных отходов, в медицине, сельском хозяйстве, для модификации поверхностей различных материалов, а также для синтеза наночастиц из металлов и их оксидов [1–8]. Плазма такого тлеющего разряда является сильно неравновесной и служит источником радикалов гидроксила, перекиси водорода, окиси азота, а также атомов водорода и кислорода, которые могут использоваться для синтеза наноструктур оксидов металлов. Поскольку основная часть излучения такой плазмы сосредоточена в УФ-области спектра, то на основе полос радикалов гидроксила и второй положительной системы молекулы азота в [9] предложено создать простую безоконную лампу неканцерогенного УФ-излучения с высоким ресурсом работы. Для плазмохимических реакторов открытого типа важное значение имеет то, что разряд устойчиво горит в воздухе атмосферного давления в виде диффузного плазмообразования, поэтому не требуется применение дорогостоящей вакуумной техники.

В работах [10, 11] сообщалось об успешном синтезе наночастиц меди и никеля небольшого

размера (до 10–30 нм) в искровом разряде в воздухе атмосферного давления над поверхностью растворов сульфатов меди и никеля в воде. Размеры и выход наночастиц в этих экспериментах сильно зависели от схемы разрядного устройства, свойств электролитического катода, а также характеристик и параметров плазмы, которая формируется над электролитом.

В настоящее время отсутствуют характеристики и параметры тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления над поверхностью растворов сульфата алюминия в дистиллированной воде, который перспективен для синтеза наноструктур оксида алюминия –  $Al_2O_3$  – в макроскопическом количестве. По сравнению с синтезом наноструктур оксидов металлов в наносекундном разряде в дистиллированной воде тлеющий разряд над поверхностью раствора металлосодержащей соли имеет ряд преимуществ: более низкое рабочее напряжение, простой источник зажигания разряда и отсутствие автоматизированной системы поддержания межэлектродного расстояния [12]. Наноструктуры на основе оксида алюминия находят широкое применение в современной микро-наноэлектронике [13].

В данной статье приводятся результаты исследования электрических характеристик и параметров тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления с катодом на основе растворов сульфата алюминия в дистиллированной воде. Такой разряд является перспективным для использования в открытых плазмохимических газоразрядных реакторах, где возможен синтез

наноструктур на основе оксида алюминия в макроскопическом количестве.

## ТЕХНИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Тлеющий разряд в воздухе атмосферного давления зажигался над поверхностью раствора сульфата алюминия –  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  – в дистиллированной воде, находившегося в кювете из оргстекла. Схема экспериментального стенда приведена в [9, 14]. Металлический анод, который устанавливался над поверхностью электролита в воздухе, был изготовлен в виде иголки из меди диаметром 2 мм. Медный анод крепился в специальном передвижном устройстве, позволявшем варьировать расстояние между кончиком иголки и поверхностью электролита в диапазоне 1–12 мм. В электролите устанавливался второй медный электрод в виде пластины. Расстояние от верхней поверхности металлической пластины до поверхности электролита могло изменяться в диапазоне 1–10 мм. Объем кюветы с раствором составлял примерно  $10^3 \text{ см}^3$ . Основные эксперименты проводились при расстоянии между кончиком анода и поверхностью электролита 7 мм и толщине раствора над поверхностью металлического катода 5 мм. Для зажигания тлеющего разряда использовался высоковольтный выпрямитель с максимальными выходными характеристиками: напряжение  $U = 1\text{--}25 \text{ кВ}$ ; ток  $I = 1\text{--}100 \text{ мА}$ . Для стабилизации горения тлеющего разряда применялось балластное сопротивление  $R = 434 \text{ кОм}$ .

Геометрические размеры тлеющего разряда определялись путем фотографирования (Digital camera Olympus FE-25/X-20) соответствующего плазмообразования при разных токах. Электрическая мощность тлеющего разряда определялась на основании вольт–амперных характеристик, измеренных киловольтметром С-196 и миллиамперметром М 906.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Пространственные характеристики тлеющего разряда атмосферного давления в воздухе над поверхностью раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  в дистиллированной воде (содержание соли в воде 1–10%) для разных расстояний между металлическим анодом, поверхностью электролита и разной глубиной установки металлического катода в растворе при токах  $I = (8\text{--}34) \text{ мА}$  были близки к соответствующим данным для тлеющего разряда с катодом на основе раствора медного купороса в воде [15]. Наибольшая интенсивность излучения плазмы достигалась при токах разряда  $I = (20\text{--}34) \text{ мА}$ , межэлектродном расстоянии  $d = 7 \text{ мм}$  и при глубине установки металли-

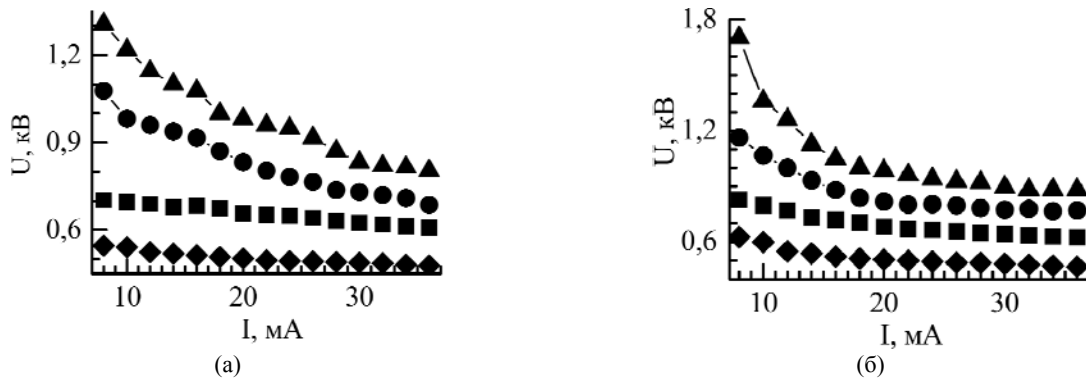
ческого катода в растворе  $h \approx 5 \text{ мм}$ . Диаметр катодного пятна для катодов на основе (1–10)% растворов сульфата алюминия не выходил за пределы 3–4,5 мм.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) тлеющего разряда в воздухе с жидким электролитическим катодом приведены на рис. 1. ВАХ тлеющего разряда с электролитическим катодом были подобны ВАХ тлеющего разряда над поверхностью катода из дистиллированной воды, полученным на той же установке [16], и ВАХ продольного разряда в газах низкого давления с металлическими электродами, которые имели выраженную поднормальную и нормальную стадии [17]. С увеличением концентрации раствора и межэлектродного расстояния ( $d > 3 \text{ мм}$ ) спад напряжения на разрядном промежутке при увеличении тока становился более резким, что указывает на увеличение роли поднормальной стадии разряда. Независимость спада напряжения на промежутке от величины тока (нормальный режим горения) для тлеющего разряда с электролитическим катодом наиболее сильно проявлялась в диапазоне токов 24–36 мА для 10% раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  в дистиллированной воде при  $d = 7 \text{ мм}$ .

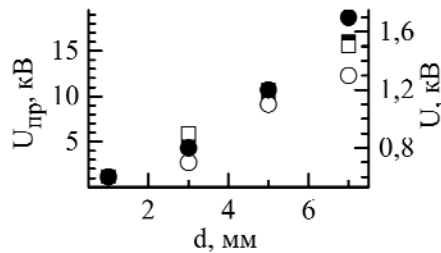
Изменение потенциала зажигания в зависимости от межэлектродного расстояния исследовалось в работе [18]. Корреляция потенциала зажигания разряда [18] и напряжения при токе 8 мА при межэлектродных расстояниях 1–7 мм показана на рис. 2 для воды, 1 и 10% растворов  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Напряжение пробоя при уменьшении межэлектродного промежутка существенно снижается. Подобным образом ведет себя и напряжение при малых токах разряда. Оно существенно повышается при увеличении межэлектродного расстояния. При межэлектродном расстоянии 1 мм и токе 8 мА напряжение на разрядном промежутке во всех случаях было очень сходным ( $\sim 0,6 \text{ кВ}$ ). Напряжение пробоя при межэлектродном расстоянии 1 мм составляет величину 1,2 кВ, а при межэлектродном расстоянии 3 мм – 5,2 кВ в случае воды [18].

С ростом содержания сульфата алюминия в дистиллированной воде от нуля до 10% изменение напряжения на разрядном промежутке не является монотонным. Так, например, при  $d = 7 \text{ мм}$ ,  $I = 8 \text{ мА}$  для катода на основе 1% раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  оно составляет примерно 1,3 кВ, а для катода на основе 10% раствора  $\approx 1,75 \text{ кВ}$ . При тех же условиях напряжение для тлеющего разряда над поверхностью дистиллированной воды составляло  $\approx 1,5 \text{ кВ}$  [16]. Это указывает на взаимосвязь свойств электролита и характеристик разряда.

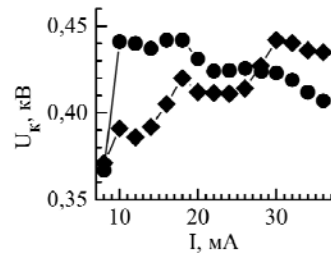
На основе измеренных ВАХ, по методике, приведенной в работе [16], определена величина катодного падения потенциала ( $U_K$ ) в тлеющем



**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда с электролитическим катодом на основании водного раствора сульфата алюминия в дистиллированной воде (1% (а); 10% (б)) при разных расстояниях между поверхностью раствора (♦ – 1 мм; ■ – 3 мм; ● – 5 мм; ▲ – 7 мм) и металлическим анодом.



**Рис. 2.** Корреляция напряжения пробоя ( $U_{пр}$ ) для воды – ■ и напряжения при токе разряда 8 мА для воды – □, 1% – ○ и 10% – ● растворов сульфата алюминия.



**Рис. 3.** Зависимости катодного падения потенциала в тлеющем разряде с жидким катодом от величины разрядного тока при разном содержании сульфата алюминия в воде: ♦ – 1%; ● – 10%.

разряде с электролитическими катодами при разной концентрации соли  $Al_2(SO_4)_3$  в дистиллированной воде (рис. 3). Для 10% раствора  $Al_2(SO_4)_3$  катодное падение потенциала меньше примерно на 40 В, чем для катода на основе дистиллированной воды, хотя форма зависимости  $U_K$  от тока разряда была подобной. Наибольшие отличия величин  $U_K$  для катодов с 1 и 10% концентрации соли в воде наблюдались при токах разряда в диапазоне 10–20 мА. Величина  $U_K$  для катода с 10% концентрацией соли при малых токах (< 30 мА) была большей, чем для катода на основе 1% раствора. Для катода на основе дистиллированной воды максимальная величина  $U_K = 495$  В достигалась при токе разряда 12 мА, а с ростом тока она уменьшалась до 440 В [15].

Электрическая мощность тлеющего разряда была максимальной для катода на основе дистиллированной воды (рис. 4). С увеличением концентрации раствора в тлеющий разряд вкладывается меньшая мощность и наблюдается уменьшение его объема. При увеличении тока тлеющего разряда от 12 до 32 мА электрическая мощность разряда увеличивалась от 16 до 31 Вт и в диапазоне 14–26 Вт для катода на основе дистиллированной воды и 10% раствора  $Al_2(SO_4)_3$ , соответственно. При этом объем разряда составлял 64–80 и 49–63 мм<sup>3</sup>, соответственно.

В настоящее время физические механизмы и процессы в плазме тлеющего разряда с жидкими

неметаллическими электродами изучены недостаточно полно, что задерживает разработку и оптимизацию режимов работы различных плазмохимических реакторов. Для продвижения в этом направлении необходимо знание основных параметров такой плазмы (плотности  $n_e$  и температуры электронов  $T_e$ ) в воздухе атмосферного давления, а также их зависимостей от характеристик реактора (межэлектродного расстояния, концентрации раствора, величины тока и т.д.).

В работах [19, 20] путем зондирования плазмы СВЧ-излучением и зондовой методикой выполнены оценки плотности и температуры электронов для тлеющего разряда в воздухе между двумя электродами на основе технической воды. В середине межэлектродного промежутка ( $d = 6$  мм) величина плотности электронов составляла примерно  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> (при токах 60–100 мА), а температура электронов – 0,4 эВ.

Параметры тлеющего разряда в воздухе атмосферного давления над поверхностью растворов алюминийсодержащих солей в дистиллированной воде ранее не исследовались. Методика оценки плотности электронов в тлеющем разряде над поверхностью электролита описана в [12], а результаты докладывались на международной конференции [21].

Оценки величины плотности электронов в разных частях тлеющего разряда проведены по величине измеряемого тока ( $I$ ), который пропорционален величине электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника площадью  $S$ :

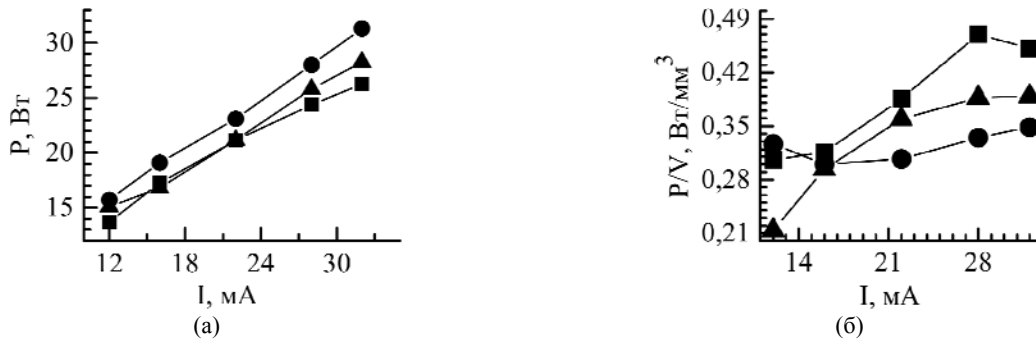


Рис. 4. Зависимость полной электрической (а) и удельной электрической мощностей (б), которые вкладывались в плазму тлеющего разряда, от величины тока для электролитического катода: ▲ – 1% раствор  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ; ■ – 10% раствор  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ; ● – дистиллированная вода.

$$I = en_e v_{dp} S, \quad (1)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $n_e$  – плотность электронов;  $v_{dp}$  – скорость дрейфа электронов [17]. В формуле (1) учтено, что ток в разряде формируется преимущественно электронами, поскольку их подвижность примерно на три порядка больше подвижности ионов. Плотность электронов оценивалась по формуле:

$$n_e = (I/S)(1/ev_{dp}). \quad (2)$$

Скорость дрейфа электронов в разряде может быть представлена в виде произведения напряженности электрического поля ( $E$ ) и подвижности электронов ( $\mu$ )  $v_{dp} = \mu E$ , где  $\mu = (2el/mE)^{0,5}$  (здесь  $l$  – длина свободного пробега электрона;  $m$  – масса электрона). Оценку напряженности электрического поля в катодной области возможно провести по формуле  $E = E_i/el$ , где  $E_i$  – энергия ионизации молекулы азота. Длину свободного пробега электронов возможно оценить через диаметр –  $D$  и плотность молекул азота  $n_{N_2}$  ( $n_{N_2} = p/kT$ ):  $l = 1/(2^{0,5} \pi D^2 n_{N_2})$ .

В любом газе при небольших токах анодное падение потенциала ( $U_A$ ) значительно меньше катодного падения потенциала:  $U_A \ll U_K$  [12, 17]. Из измеренных экспериментально ВАХ тлеющего разряда были определены катодное падение потенциала и спад напряжения на разрядном промежутке:  $U = U_K + U_A + U_{ПС}$ , где  $U_{ПС}$  – спад напряжения в положительном столбе тлеющего разряда.

Катодное падение потенциала определялось при фиксированном токе разряда на промежутке «анод-электролит» как функция расстояния «катод-анод». Экстраполяция полученной зависимости к нулевому расстоянию давала величину катодного падения потенциала  $U_K$ .

В области положительного столба величина плотности электронов минимальная. Для оценки напряженности электрического поля в положительном столбе тлеющего разряда использовались формулы:

$$U_A \ll U_K, \quad U_{ПС} = U - U_K. \quad (3)$$

Зная, что, согласно теории столкновений, размер катодного и анодного слоя составляет примерно  $10^{-6}$  м [17], то напряженность электрического поля в положительном столбе возможно оценить из отношения  $(U - U_K)/d$ ,  $d$  – расстояние между электродами. Погрешность вычислений концентрации электронов в рамках приведенной модели составит 30%.

Величина площади поперечного сечения тлеющего разряда в области катодного пятна и положительного столба оценивалась нами с помощью фотографий плазмообразования.

Предварительный эксперимент с катодом на основании дистиллированной воды позволил оценить плотность электронов в катодной части и положительном столбе тлеющего разряда для токов в диапазоне 10–32 мА [22]. При этом величина  $n_e$  в катодной части разряда с ростом тока увеличивалась (от 2 до 10)  $\cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ . Плотность электронов для положительного столба в диапазоне токов 10–20 мА также увеличивалась (от 1 до 2)  $\cdot 10^{11}$  см $^{-3}$ . При токах больше 20 мА величина  $n_e$  стабилизировалась на уровне 2  $\cdot 10^{11}$  см $^{-3}$ .

Увеличение плотности электронов в катодной части тлеющего разряда на фоне незначительного изменения диаметра катодного пятна указывает на образование в катодном слое молекул с малыми потенциалами ионизации. В нашем случае такими могут быть радикалы NO.

Зависимости плотности электронов в разных частях разряда от тока для 10% раствора сульфата алюминия приведены на рис. 5. При увеличении тока разряда в диапазоне 12–36 мА величина  $n_e$  росла в диапазоне (1–4)  $\cdot 10^{12}$  см $^{-3}$  (положительный столб разряда) и (3–10)  $\cdot 10^{12}$  см $^{-3}$  (катодный слой) для токов 12–27 мА. Для токов  $I > 27$  мА величина  $n_e$  в катодном слое приходила в насыщение на уровне  $10^{13}$  см $^{-3}$ . Увеличение плотности электронов в тлеющем разряде над поверхностью раствора соли по сравнению с разрядом с водяным катодом связано с увеличением проводимости раствора и появлением молекул с низким потенциалом ионизации вследствие процессов электролитической диссоциации в растворе



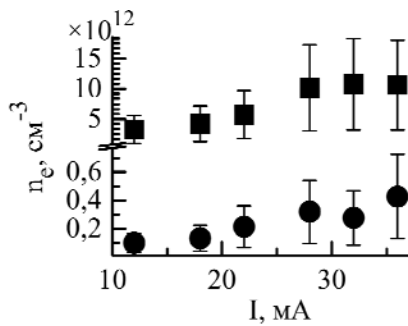


Рис. 5. Зависимость плотности электронов в положительном столбе (●) и катодной части (■) тлеющего разряда над поверхностью 10% раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  от величины тока.

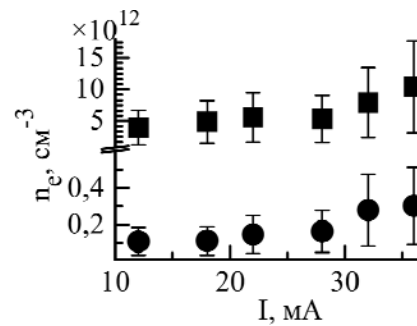


Рис. 6. Плотность электронов в плазме положительного столба (●) и катодной области (■) тлеющего разряда над поверхностью 1% раствора  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  в зависимости от тока разряда.

(может выделяться газ SO) и плазмохимических реакций (синтез NO).

Полученные результаты возможно сравнить с данными работы [23], где в центральной части разрядной плазмы атмосферного давления в тлеющем разряде с электролитическим катодом  $n_e = 7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Для разряда с катодом на основании 1% раствора соли зависимости плотности электронов в катодном слое и положительном столбе от тока приведены на рис. 6. Величины  $n_e$  для этого разряда (1% раствор) для катодного слоя и положительного столба тлеющего разряда с ростом тока увеличивались в пределах  $4 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $1,1 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  соответственно.

Как видно из рис. 5 и 6, для тлеющего разряда с катодами на основании раствора значительное увеличение плотности электронов наблюдается при токах  $I > 25-28 \text{ мА}$ . После 25 мА начинают эффективно проявляться плазмохимические реакции и электролитическая диссоциация, которая приводит к изменению цвета разряда.

Электролитическую диссоциацию можно представить следующими уравнениями:  $\text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{OH}^-$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 2\text{Al}^{3+} + 3\text{SO}_4^{2-}$ . Отрицательные ионы, образовавшиеся в результате электролитической диссоциации ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) и вторичных процессов в электролите ( $\text{AlO}_2^-$ ), будут обогащать его поверхностный слой. Реакции составляющих плазмы и электролита с перечисленными радикалами, их окисление и распад будут определять изменение состава как электролита, так и плазмы. Как следствие, в разрядном промежутке появятся молекулы SO, которые делают свой взнос в специфику горения разряда, его характеристики и параметры.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, исследования тлеющего разряда с электролитическим жидким катодом показали: в воздухе атмосферного давления при токах 8–36 мА разряд существует в форме одного диффузного канала; напряжение пробоя

при уменьшении межэлектродного промежутка существенно снижается, как и напряжение при малых токах разряда; потенциал горения тлеющего разряда при малых токах немонотонно зависит от концентрации сульфата алюминия в растворе и находится в диапазоне 1,3 (1% раствор) – 1,75 кВ (10% раствор), хотя потенциал горения разряда над поверхностью дистиллированной воды составлял в этих же условиях 1,5 кВ; катодный спад потенциала при токах 8–36 мА находился в диапазоне 370–450 В и был большим для более концентрированного раствора до тока 30 мА; при увеличении концентрации раствора в разряд при максимальном токе вкладывалась меньшая мощность (с 31 до 26 Вт) и наблюдалось уменьшение его объема (с 80 до 63 мм<sup>3</sup>); для растворов величина  $n_e$  увеличивалась при увеличении тока и достигала  $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (положительный столб разряда) и  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  (катодный слой); для увеличения выхода наноструктур перспективным является увеличение тока и площади разряда, изучение влияния интенсивности УФ-излучения плазмы на их образование.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*. М.: Наука, 2000, Т. 2, с. 241–246.
2. Гайсин А.Ф., Абдуллин И.Ш., Гайсин Ф.М. *Струйный многоканальный разряд с электролитическими электродами в процессах обработки твердых тел*. Казань: Издательство Казанского государственного технического университета, 2006. 446 с.
3. Валиев Р.И., Шакиров Б.Ю., Шакиров Ю.И. *Вектор науки Тольятинского Государственного Университета*. 2012, 1(19), 54–57.
4. Жилинский В.В., Дроздович В.Б., Иванова Н.П., Жданок С.А. *Известия национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. 2010, (1), 12–15.
5. Richmonds C., Sankaran R.M. *Appl Phys Lett*. 2008, 93, 132501.

6. Кузьмичева Л.А., Титова Ю.В., Максимов А.И. *ЭОМ*. 2006, (3), 148–152.
7. Орлов А.М., Явтушенко И.О., Боднарский Д.С. *ЖТФ*. 2012, **82**(3), 75–81.
8. Kulentsan A., Rybkin V., Titov V., Smirnov S. *Proc. of the 28 International Conference on Phenomena in Ionized Gases (28th ICPIG)*. Prague, Czech Republic. 2007. P. 2282–2284.
9. Шуаибов А.К., Чучман М.П., Месарош Л.В., Грабовая И.А. *Приборы и техника эксперимента*. 2013, (6), 90–94.
10. Орлов А.М., Явтушенко И.О., Боднарский Д.С., Уфаркина Н.В. *ЖТФ*. 2013, **83**(9), 24–30.
11. Орлов А.М., Явтушенко И.О., Боднарский Д.С. *ЖТФ*. 2015, **85**(5), 82–87.
12. Месарош Л.В., Шуаибов О.К. *Актуальні проблеми квантової фізики. Практикум з лабораторних робіт*. Ужгород: Видавництво ДВНЗ УжНУ: Говерла, 2015. 84 с.
13. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. *УФН*. 2007, **177** (6), 619–638.
14. Месарош Л.В., Шуаибов О.К., Чучман М.П. *Науковий Вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. 2012, (32), 82–88.
15. Шуаибов А.К., Чучман М.П., Козак Я.Ю. *Успехи прикладной физики*. 2014, **2**(1), 41–44.
16. Шуаибов А.К., Чучман М.П., Месарош Л.В. *ЖТФ*. 2014, **84**(6), 60–64.
17. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987. 592 с.
18. Bruggeman P., Graham L., Degroote J., Vierendeels J., et al. *J Phys D: Appl Phys*. 2007, **40**, 4779–4786.
19. Баринов Ю.А., Каплан В.Б., Рождественский В.В., Школьник С.М. *Письма в ЖТФ*. 1998, **24**(23), 52–57.
20. Баринов Ю.А., Школьник С.М. *ЖТФ*. 2002, **72**(3), 31–37.
21. Месарош Л.В., Шуаибов О.К., Чучман М.П. *Матеріали міжнародної наукової конференції молодих вчених і аспірантів "ІЕФ-2015"*. Ужгород, Україна. 2015. С. 81–82.
22. Шуаибов О.К., Месарош Л.В., Чучман М.П. *Технічна електродинаміка*. 2016, (2), 25–28.
23. Mezei P., Cserfalvi T. *Appl Spectr Rev*. 2007, **42**(6), 573–604.

Поступила 18.05.16

После доработки 03.02.17

### Summary

The paper presents the current-voltage characteristics of the magnitude of the cathode potential drop, the dependencies of the full and specific power pumped into plasma on the density of electrons depending on the current for the glow discharge in air at atmospheric pressure with the cathode on the base of 1–10% solution of aluminum sulfate in distilled water. The distance from the electrolytic liquid cathode to the metal anode varied in the range of 1–10 mm, at an average discharge current of 8–36 mA. The discharge is promising for the synthesis of nanostructures of aluminum and aluminum oxide which are formed due to processing of the solutions by glow discharge.

*Keywords:* glow discharge with liquid cathode, aluminum sulfate water solution, electrical characteristics.