



V МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ПЛАЗМА  
И СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР

Г. КАЗАНЬ, 20 - 24 НОЯБРЯ 2024

# СБОРНИК ТРУДОВ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН  
КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А. Н. ТУПОЛЕВА — КАИ  
КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО ФИЗИКЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ  
КАЗАНСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ Е. К. ЗАВОЙСКОГО  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН»  
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

# **V МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

## **«ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ПЛАЗМА И СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУР»**

*Сборник трудов (г. Казань, 20–24 ноября 2024)*

Казань  
Издательство «Бук»  
2025

УДК 533.9+620.3(063)  
ББК 22.333+22.353.2я431  
П99

**Редакционная коллегия:**

Борис Ахунович Тимеркаев, член-корр. Академии наук РТ, профессор,  
доктор физико-математических наук;  
Ильназ Изайлович Файрушин, кандидат технических наук;  
Артем Олегович Софроницкий, кандидат технических наук;  
Алмаз Ильгизович Сайфутдинов, доктор физико-математических наук.

П99 **V Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур»** : сборник трудов (г. Казань, 20–24 ноября 2024) / М-во высшего образования и науки Российской Федерации, М-во образования и науки Республики Татарстан, Казанский нац. исследовательский технический ун-т им. А. Н. Туполева — КАИ и др. — Казань : Бук, 2025. — 424 с. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-00254-179-9.

Материалы конференции предназначены для специалистов в области физики газоразрядной плазмы, наноматериалов и нанотехнологий. Могут быть полезны студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

УДК 533.9+620.3(063)  
ББК 22.333+22.353.2я431

ISBN 978-5-00254-179-9

# ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ ГАЗОВ НА СВОЙСТВА ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ С ВОДНОРАСТВОРНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

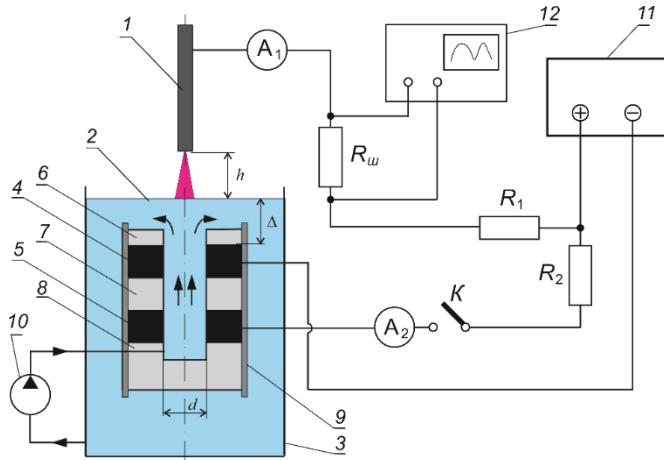
Г. Х. Тазмеев<sup>1</sup>, А. Х. Тазмеев<sup>1</sup>, Х. К. Тазмеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ", НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ, РОССИЯ

Газовые разряды с жидкими электролитными (воднорастворными) электродами обладают уникальными свойствами, благодаря которым они могут найти применение в различных областях народного хозяйства. К примеру, они успешно используются в обеззараживания воды [1] и предпосевной обработке семян агрокультур [2]. Расширяется их применение в медицинской практике для заживления ран [3]. Сам газовый разряд сопровождается электролизными процессами в водном растворе. В связи с этим на ранних стадиях исследований использовался термин «glow-discharge electrolysis», который в переводе означает «электролиз с тлеющим разрядом». К твердотельному электроду, который служит для создания электрического контакта с водным раствором, притягиваются ионы. При нейтрализации ионов могут быть образованы газообразные вещества (электролизные газы). Естественно, силы Архимеда выносят газы из водного раствора. В случае выхода электролизных газов через зону контакта разряда с водным раствором существенно меняются условия на границе «жидкость–плазма». Поэтому можно ожидать изменение физических свойств разряда под влиянием электролизных газов. Целью данной работы явилось исследование влияния электролизных газов на разрядный ток и пространственную структуру разрядной области.

На рис. 1 представлена принципиальная схема экспериментальной установки. Разряд горел между металлическим анодом 1 и поверхностью водного раствора, налитого в стеклянную емкость 3. Анод представлял собой медный стержень с диаметром 25 мм. Твердотельные электроды 4 и 5, выполненные в виде шайб из графита, служили для создания электрических контактов с водным раствором. Они вместе с диэлектрическими элементами 6, 7 и 8 образовали вертикальный цилиндрический канал с диаметром d. Вся эта конструкция была изолирована с внешней стороны диэлектрическим

корпусом 9. Гидронасос 10 прокачивал водный раствор через упомянутый канал, обеспечивая перемешивание верхних нагретых слоев с остальной массой. Массовая скорость прокачки составила около 2 мл/с.

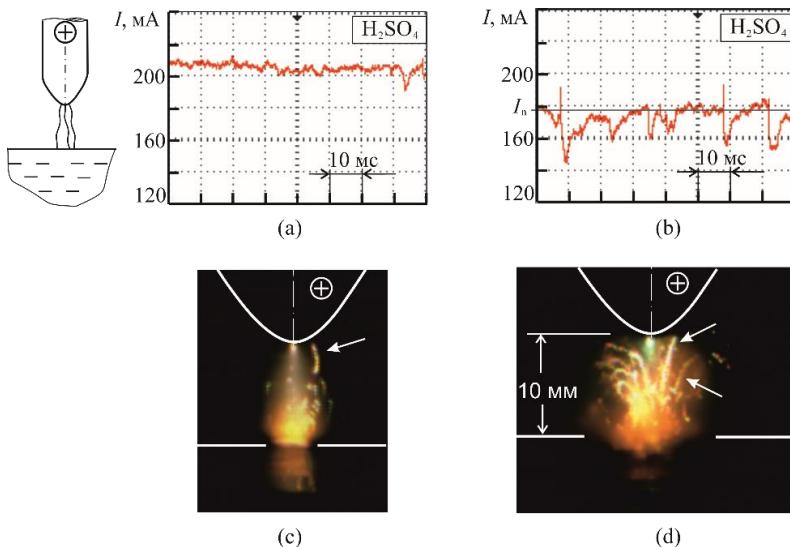


**Рисунок 1.** Принципиальная схема экспериментальной установки

Источником питания 11 служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель с П-образным индукционно-емкостным фильтром. Твердотельный электрод 4 напрямую подключался к выходной клемме источника питания. На рис. 1 изображено подключение к отрицательной клемме. В этом случае водный раствор является катодом газового разряда. При смене полярности подключения водный раствор становится анодом. Разрядный ток регулировался изменением балластного сопротивления  $R_1$ . Замыкаюю ключ  $K$  можно было создать электролиз между графитовыми электродами 4 и 5. Ток в цепи электролиза регулировался изменением балластного сопротивления  $R_2$ . Осциллограммы тока регистрировались цифровым осциллографом 12 марки АКИП-15/1 (полоса пропускания 25 МГц). Использовался шунт  $R_w$  с сопротивлением 10 Ом. Исследования были проведены в диапазоне токов 100–200 мА. В качестве жидкого электролитного катода были использованы водные растворы  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CuSO}_4$ , и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  с концентрациями 0,10–0,5 моль/л.

На рис. 2 приведены результаты, полученные при использовании водного раствора  $\text{H}_2\text{SO}_4$  с концентрацией 0,1 моль/л. На осциллограммах фиксировались пульсации тока. При автономном горении разряда они были

незначительными (рис. 2а). В режиме горения с дополнительным электролизом пульсации тока усиливались (рис. 2б). Они происходили как случайные падения тока от некоторого номинального значения  $I_n$ . По-видимому, из-за появления пузырьков электролизных газов в большом количестве, электрическое сопротивление участка цепи внутри водного раствора увеличивалось.

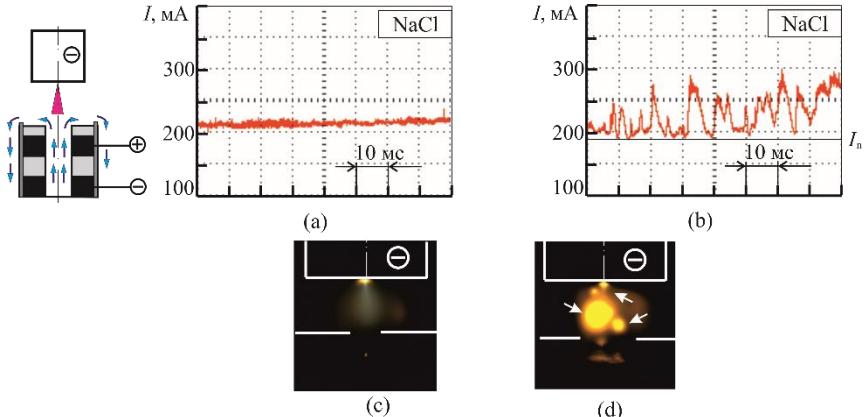


**Рисунок 2.** Осциллографмы тока и мгновенные фотографии разряда. (а) и (с) – при отсутствии дополнительного электролиза; (б) и (д) – с электролизом. Ток электролиза 1 А. Экспозиция 0,2 мс. Торец анода закруглен. Белыми линиями обозначены контуры анода и поверхности водного раствора.

При использовании водных растворов  $\text{NaCl}$  разряд выдувался вверх и обрывался. Такая неустойчивость отпала при использовании медного стержня с плоским торцом в качестве металлического электрода (анода или катода).

На рис. 3 представлены результаты экспериментов в случае металлического катода. При автономном горении разряда осциллограммы получились гладкими (рис. 3а). Добавление электролиза привело к возникновению значительных пульсаций в виде случайных всплесков в сторону увеличения (рис. 3б). По-видимому, причиной этих пульсаций является то, что

электролизные газы приводят к распылению водного раствора. С капельками раствора в разрядную область выносится натрий. Он ионизируется и способствует увеличению электрической проводимости. То, что выносится натрий видно из сравнений фотографий (рис. 3с и 3д). Здесь желтые участки соответствуют излучению натрия.



**Рисунок 3.** Газовый разряд с жидким электролитным анодом:  
осциллограммы тока и мгновенные фотографии. (а) и (с) – при отсутствии  
дополнительного электролиза; (б) и (д) – с электролизом (1 А).

Обобщая результаты исследований можно сделать следующие выводы. При попадании пузырьков электролизных газов в зону контакта разряда с водным раствором возникают взрывные процессы, что отражается на осциллограммах тока в виде мелкомасштабных пульсаций. Взрывные процессы способствуют распылению воднорастворного электрода в виде капелек. В составе распыленных капелек может произойти перенос взвешенных твердых частиц из водного раствора в разрядную область.

#### Литература:

- [1] Locke B. R. et al. // Ind. Eng. Chem. Res. 2006. Vol. 45. № 3. P. 882.
- [2] Сон Э. Е. и др. // ТВТ. 2014. Т. 52. № 4. С. 512.
- [3] Наумова И.К. и др. // Прикладная физика. 2021. № 4. С. 40-46.
- [4] Bruggeman P.J. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. V. 25. P. 053002
- [5] Hickling A., Ingram M.D. // J. Electroanal. Chem. 1964. V. 8. P. 65

tazmeevgh@stud.kai.ru