

## ПРО ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ПЛАЗМОВИХ РОЗРЯДІВ НАД ПОВЕРХНЕЮ ВОДИ

В.Б. ЮФЕРОВ, Є.В. МУФЕЛЬ, В.І. ТКАЧОВ, С.В. ШАРИЙ,  
А.М. ШАПОВАЛ

УДК 533.9.07: 533.98  
©2010

Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут  
(Вул. Академічна, 1, Харків 61108; e-mail: v.yuferov@kift.kharkov.ua)

На експериментальній установці, що дозволяє створювати автономні сферичні плазмові утворення, досліджено процеси, які відбуваються в початковій стадії розряду. Описано два можливі сценарії їх розвитку. Наведено вольт-амперні і спектральні характеристики плазмоїдів, а також фотографії розвитку розряду в часі.

Плазмові розряди над поверхнею води викликають інтерес з погляду можливих прикладних застосувань, зокрема, для знезараження виробів, об'єктів і приміщень. Проте деякі явища, що спостерігалися в експериментах, не мали переконливого фізичного трактування. Перш за все, отримані величини пробійної напруги на зазорах, що передували розряду, були набагато менші від раніше описаних у літературі. Інтенсивності світіння, що спостерігалися, слабо корелювали з умовами розряду. Для пояснення отриманих ефектів використовувалося поняття "гідратовані іони". Такі іони за механізмом утворення нагадували газо-водо-сольові зародки, що спостерігалися при імпульсній акустичній дії на водні розчини. Тому комплексне вивчення таких об'єктів могло пролити додаткове світло на досліджувані явища.

У роботах [1–3] було представлено експерименти по створенню автономних плазмових утворень або плазмоїдів, що імітують кулясті блискавки. Ці роботи також містять теоретичні дослідження можливої ролі гідратованих іонів. Проте залишилися нез'ясованими питання щодо початкової стадії розряду, що не висвітлені в [1]. Наша експериментальна система (див. рис. 1) повторює описану в [1] і доповнена шун-

том для вимірювання струмів. Проводився відеозапис розрядів зверху і збоку зі швидкістю до 1000 кадр/с. За допомогою фотодіодів вимірювали світіння плазмових утворень. У більшості експериментів розрядна напруга була на рівні 3–4 кВ. Центральний електрод був залізним у фарфоровому ізоляторі, схематично його вигляд наведено на рис. 2. Діаметр діелектричної розрядної камери змінювався від 10 до 50 см, глибина від 4 до 30 см, проте істотного впливу розмірів камери на параметри розряду не виявлено.

На рис. 3 наведено фото стаціонарної фази розряду – протікання струму по ізолятору (напруга 1 кВ, струм близько 0,1 А). Підвищення розрядного струму до 0,2 А приводить до збільшення кількості паралельних плазмових каналів. Можливо, що при підвищенні струму до 100 А і вище розряд по ізолятору може стати майже суцільним.

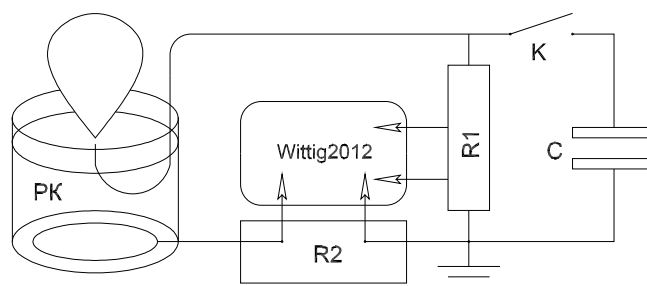


Рис. 1. Схема експерименту. Конденсаторна батарея  $C = 1200$  мкф,  $K$  – розмикач,  $R1$  – вимірювач напруги,  $R2$  – шунт для струмових вимірювань,  $PK$  – діелектрична розрядна камера – посудина з двома електродами – кільцевим заземленим і центральним під негативним потенціалом, з електроізольованими струмоводами

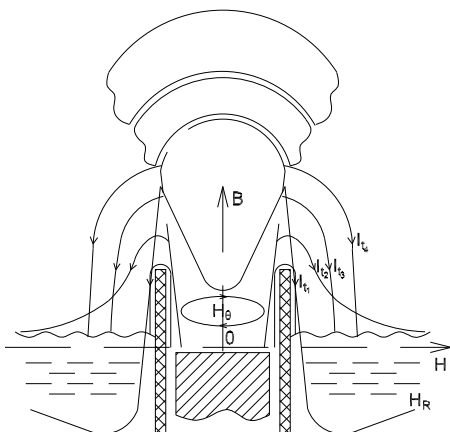


Рис. 2. Центральний електрод. Залізний струмовід у фарфоровому ізоляторі. Ізолятор на 1–5 мм виступає над рівнем електрода і води. Струмopовідний плазмoвий стовп і струмові канали – функції часу та відокремлені плазмoди. Радіальне магнітне поле та магнітні силові лінії усередині ізолятора



Рис. 3. Стационарна фаза розряду

На рис. 4 та 5 показано часовий розвиток розряду, отриманий при швидкості зйомки – 210 і 420 кадр/с відповідно. На кадрі 1 видно плазмoвий канал, що йде від електрода і досягає ізоляційної стінки розрядної камери. Цей канал виникає на місці первинного стримера, який є видимим не на всіх кадрах, що пояснюється величиною інтервалу часу між кадрами при даній швидкості зйомки. Крім того, на поверхні рідини його яскравість незначна, проте можна бачити світіння на ізоляторі центрального електрода і світлову пляму на стінці діелектричної розрядної камери. На кадрі 2, через 5 мс, видно вже систему плазмoвих каналів розряду, що доходить до ізоляційної стінки, а також закорочується на поверхню води. У центрі над електродом вже виник плазмoвий стовп. Прямолінійний відрізок, що світиться у правій частині кадру – це струмовід центрального

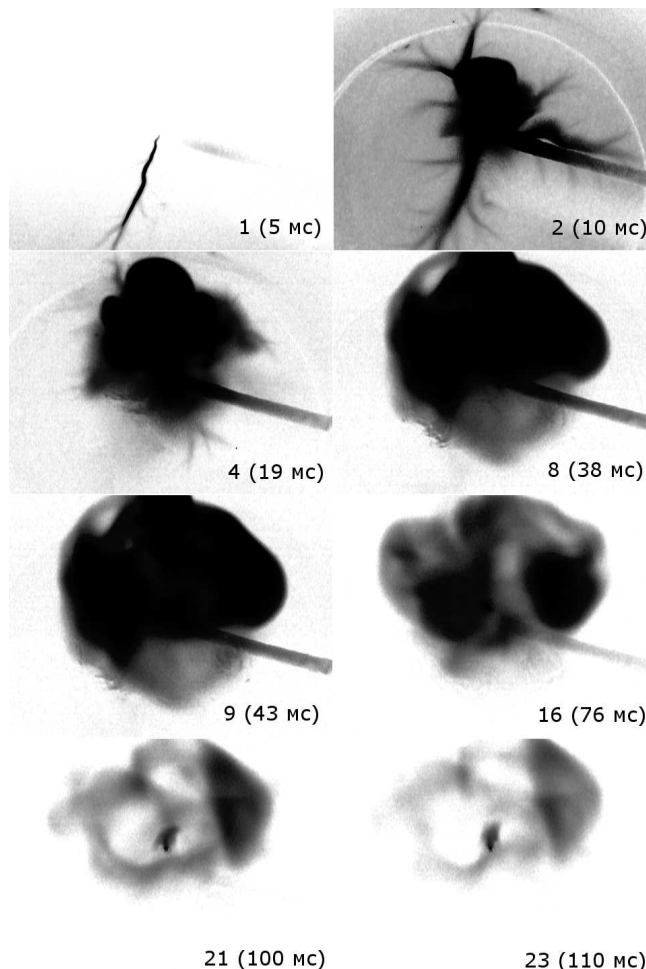


Рис. 4. Динаміка розряду (вигляд зверху під кутом 45°). 210 кадрів на секунду

ного електрода в ізоляції. Він знаходиться усередині рідини і є видимим на всіх кадрах. На кадрі 4, через 20 мс, струмові канали розряду погано видно на тлі основного розряду, частина з них прийшла під плазмoвий факел, який все більше розширюється в радіальному напрямку. Ці канали, шнури блакитного кольору, що світяться – струмопроводи. Вони починаються з-під верхньої частини плазмoвого факела, приблизно в 5–10 см над електродом. Можливо, тут спостерігається ефект магнітної ізоляції плазмoвого стовпа, що виявляється в тому, що плазмoві струмові канали починають поширюватися в радіальному напрямку тільки з цієї висоти.

На фотографіях видно, що змінюється не тільки яскравість світіння. Форма плазмoвого утворення на-

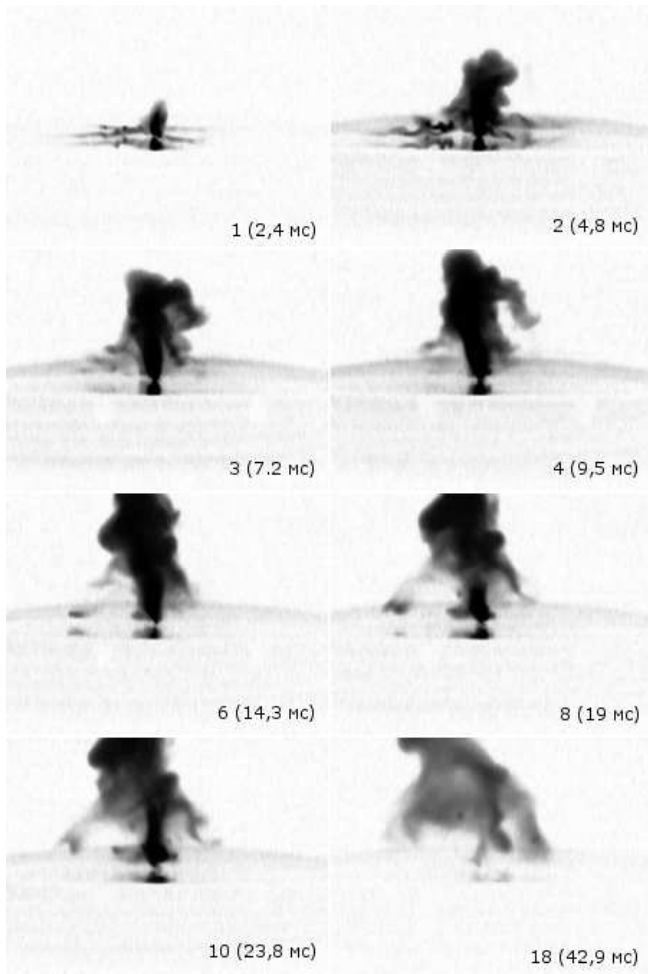


Рис. 5. Динаміка розряду (вигляд збоку). 420 кадрів на секунду

ближається до кулястої, проте далі з'являються області з більш-менш помітним світінням. У центрі видно область схожу на свічку. Це плазмовий стовп, що виходить із центрального електрода, яскравість світіння якого зменшується. Далі розряд вироджується, з'являються дві темні області, оточені шарами, що світяться – свого роду струмовими каналами, що мають замкнутий характер. Величини розрядних струмів у цей час малі, відповідно малі і магнітні поля, що їх оточують. Проте вони формують та утримують низькотемпературну плазму, яка містить, на нашу думку, гідратовані іони, що реагують на слабкі магнітні поля на рівні 0,2 ерс (див. кадри 21 і 23).

На рис. 5 зображено вертикальну картину розвитку розряду. (Слід зазначити віддзеркалення розряду поверхнею води). Видно струмові канали, що

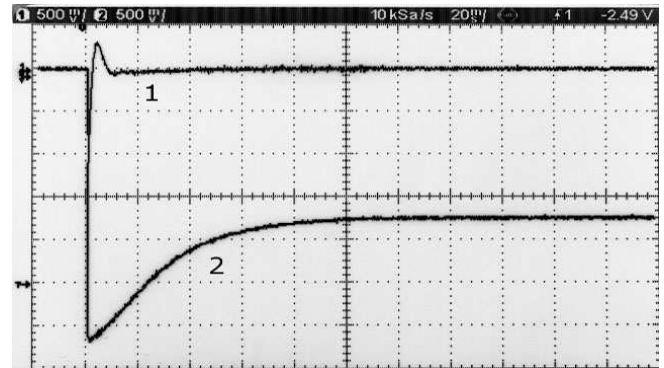


Рис. 6. Вольт-амперна характеристика (20 мс/дел): 1 – струмова характеристика; 2 – залежність напруги від часу

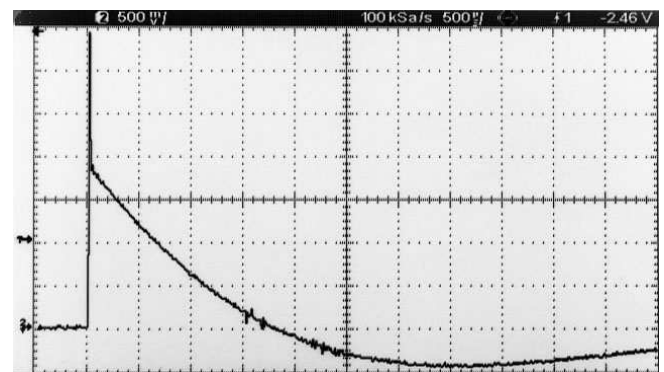


Рис. 7. Залежність струму розряду від часу (500 мкс/дел)

йдуть над поверхнею рідини. Висота плазмового стовпа на першому кадрі близько 2,5 см, на другому – 12 см (у деяких серіях експериментів вона сягала 5 см в початковий момент часу). На кадрі 3 його висота дорівнює 15 см і потім поволі зростає.

До 25 мс видно досить яскравий плазмовий стовп-канал, що йде від центрального електрода. До 45 мс плазмовий канал не проглядається, проте існують три струмопровідні канали, що йдуть до води і стінок.

На осцилограмах на рис. 6 та 7 наведено вольт-амперні характеристики розвитку розряду. Максимальна амплітуда зарядної напруги батареї становить 4 кВ. На рис. 7 струмову характеристику подано в розгортці, що дозволяє побачити початкову стадію розряду, що відбувається за наносекунди, і розрахувати імпульсне підвищення напруги на проміжках, які не можуть бути пробиті початковою напругою. Як видно, струмовий сигнал на обох кадрах має достатньо високі характеристики тільки в пер-

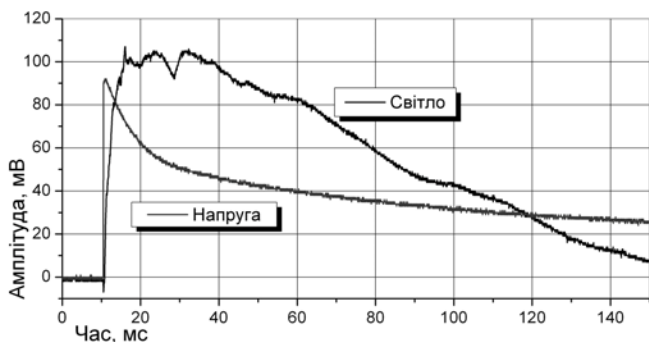


Рис. 8. Залежність інтенсивності світіння від часу (верхня крива) та напруга на батареї (нижня крива)

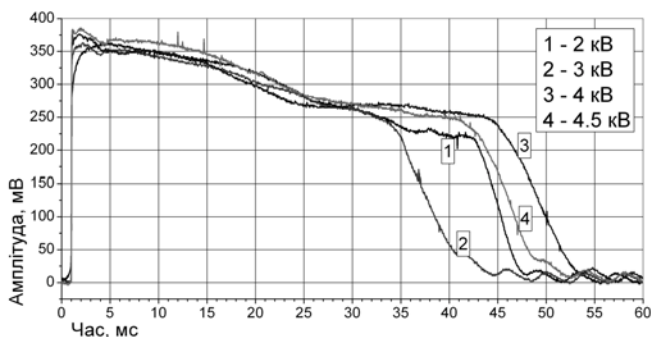


Рис. 9. Інтенсивність загального світіння від часу для різної напруги на батареї

пі 10 мс. Короткий сплеск у перший момент – 1 кА та подальший спад зі зміною знака. Тут струм менший, максимальна амплітуда досягає 270 А і далі – тривалий спад. Оцінка струму розряду з кривої напруги на рис. 6 дає величини струму: 36 А за проміжок 0–20 мс, 28 А за період 20–40 мс, 17 А за 40–60 мс, 7 А за 60–80 мс і так далі. Як видно, відносно сильнострумний розряд становить не більше 1/10 загального часу розряду. Існування автономного плазмоїда супроводжується малими розрядними струмами.

Інтенсивності світіння плазмового утворення наведено на рис. 8: нижня крива – залежність напруги на розряді від часу, верхня крива – світіння плазми отримане з фотодіода, що приймає повне інтегральне (широка апертура) випромінювання розряду. Як видно, інтегральна інтенсивність світіння слабо залежить від напруги зарядки батареї і, відповідно, початкових струмів розряду, хоча і дещо збільшується із збільшенням зарядної напруги. Крім того, інтенсивність світіння вже не пов'язана із високими струмами розряду. На рис. 10 зо-

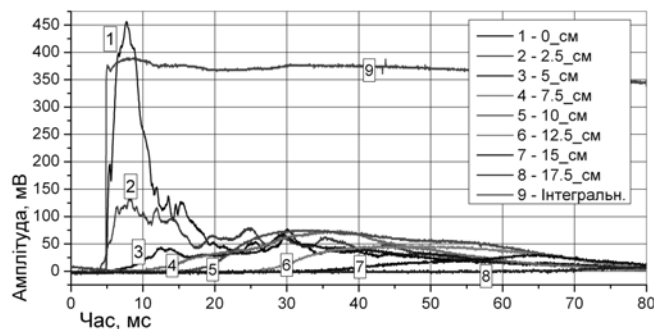


Рис. 10. Інтегральна світимість плазмового утворення (верхня крива); інтенсивності світіння плазмового струменя на різних висотах залежно від часу (нижня крива)

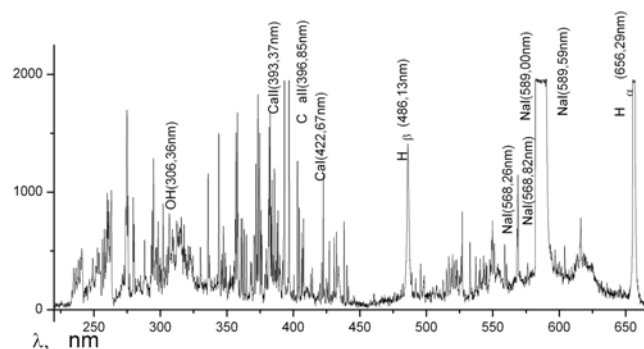


Рис. 11. Спектральні характеристики розряду

ображено два типи характеристик. Верхня крива – інтегральна світимість плазмового утворення. Нижня система кривих – інтенсивності світіння плазмового струменя-стовпа на різних висотах залежно від часу (отримано при сильній колімації фотодіода). Оскільки плазмовий струмінь витікає з центрального електрода, його яскравість визначається розрядами по ізолятору та їх струмом, що йде по струмових каналах на ізоляторі. Ці канали не залишаються постійними. Вони рухаються в просторі і змінюються з часом, що відбивається на яскравості плазмового стовпа. Яскравість факела загалом корелює із струмовою характеристикою, але тільки поблизу електрода. При віддаленні на 3–4 см вже виявляється тривале післясвітіння. Тобто все вказує на тривале існування збуджених станів молекул або їх кластерів, які локалізовані в периферійних областях розряду, тобто там, де температура нижча.

На рис. 11 зображено оптичний спектр, виміряний на відстані 3–5 мм вище центрального електрода. При віддаленні від електрода, як показано на рис. 10,

яскравість ліній спадає, а їх кількість зменшується. Зникають лінії  $H_{\beta}$  і  $H_{\alpha}$ , що свідчить про охолодження плазми. Зникають лінії кальцію, але лінії натрію залишаються на відстані до 30 см.

Ми також проводили експерименти із солоною водою (вміст солі до 10 г/л). Розряд супроводжувався інтенсивним хлопком і мав велику яскравість.

Можливі два сценарії початкової стадії розвитку розряду.

1. На початковій стадії розряду спостерігаються короткочасні високі розрядні струми. Вони пов'язані із зарядкою водної ємності, утвореної електродами в розрядній камері, від основної батареї. Для перевірки гіпотези про зарядку водної ємності було зібрано еквівалентну схему, де розрядна камера замінювалася ємністю і опором. При  $C = 10$  пФ і  $R = 3$  Ом початкова ділянка струмової кривої виявилася подібною ділянці, отриманій на робочій схемі.

При розрядженні водної ємності на електродах з'являється значна різниця потенціалів  $U = L \cdot di/dt$ , що перевищує напругу зарядки конденсаторної батареї. (Саме ця напруга і приводить до пробією великих повітряних проміжків). Для кільцевої системи, наведеної на рис. 1, довжина проміжку дорівнює 20 см. Для лінійної системи це 50 см. Для таких довжин величина пробійної напруги дорівнює 50–60 кВ. З'являється стример і далі плазмовий канал. Одночасно розвивається пробій по ізолятору. При таких струмах і появі такої різниці потенціалів на центральному електроді, можлива вибухова емісія і виникнення електронного пучка, який гальмується в атмосфері. Висота факела плазмового стовпа на кадрі 1, рис. 3, близько 2,5–5 см, що відповідає шляху гальмування електронного пучка з енергією приблизно 60 кВ у повітрі за атмосферного тиску. У процесі гальмування пучка, що супроводжується процесами іонізації і збудження молекул повітря, відбувається “ультрафіолетове підсвічування” всього простору, що оточує центральний електрод. Тривалість існування пучка відповідає часу розрядки водної ємності, далі йде газовий розряд над поверхнею води.

2. При пробіє ізолятора центрального електрода спостерігаються великі струми, і струмові канали заповнюють майже весь простір ізолятора. Кожен струмовий канал на ізоляторі є еквівалентним плазмовому джерелу відомого типу – “рельсотрон”, де прискорюється плазмова перемичка між двома протилежно направленими струмами. У нашому випадку плазмова перемичка знаходиться на верхньому торці ізолятора. Із самого початку прямий і зворотний

струми розділені, спочатку ізолятором, а далі, по мірі пересування вгору плазмової перемички – магнітним полем  $H_{\theta}$  навколо струмопровідного плазмового стовпа, що йде вгору. Зворотні плазмові струмопроводи починаються на плазмовому стовпі на висоті приблизно 10 см. Вони закорочуються на воду і ізоляційну стінку, що світиться. Плазма, що поширюється вгору, за рахунок гальмування на атмосферному повітрі охолоджується, розширюється і утворює в цій області велику кількість гідратованих повільних іонів та іонів, що існують тривалий час. За подальшого поширення розряду над водою, стає важливим співвідношення опору повітряної плазми і опору води. У випадку із солоною водою, це невеликий опір, тому такі розряди більше локалізуються на поверхні води та центрального електрода. Це не дає розряду сильно розширитися і піти в автономний політ, оскільки вища температура в таких розрядах “спляче” гідратовані іони – швидше знімаючи збудження.

Поняття гідратовані іони є широким і охоплює комплексні іони, до складу яких входять молекули води і її складові  $H^+$  і  $OH^-$ . Крім того, до них входять іони натрію, заліза, хлору та інші компоненти, присутні у водопровідній воді. Енергозапас гідратованих іонів порівняно невеликий, внутрішня енергія гідратованих іонів може знаходитися в межах величин енергії хімічних реакцій з максимального боку і, з іншого, на рівні енергій зв'язку комплексних іонів, тобто  $q \approx 0,01 - 5$  еВ. Для розуміння можливостей гідратованих іонів, необхідно мати дані про реальну величину цих утворень, їх структуру, енергію зв'язків та повну енергію. У макроскопічному плані необхідно знати розподіл за масами та концентраціями. У роботі [4] спостерігали водо-газо-сольові комплекси, що включають  $3 \cdot 10^6$  молекул. Їх концентрація становила  $10^{11}$  см $^{-3}$ , а час життя – десятки секунд. Слід відзначити, що гідратовані іони не беруть участі в газових розрядах високого тиску.

1. А.И. Егоров, С.И. Степанов, ЖТФ **78**, № 6, 15 (2008).
2. С.В. Шевкунов, ЖЭТФ **119**, 485 (2001).
3. С.В. Шевкунов, Докл. РАН **379**, 181 (2001).
4. В.Б. Юферов, А.Н. Пономарев, Е.В. Муфель, А.Н. Озеров, И.В. Буравиллов, В.Н. Ищенко, ЖТФ **79**, № 5, 124 (2009).

Одержано 29.10.09

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПЛАЗМЕННЫХ  
РАЗРЯДОВ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ  
ВОДЫ

*В.Б. Юферов, Е.В. Муфель, В.И. Ткачев, С.В. Шарый,  
А.Н. Шаповал*

Р е з ю м е

Создана экспериментальная установка, позволяющая получать автономные сферические плазменные образования. Исследованы процессы, происходящие в начальной стадии разряда. Описаны два возможных сценария их развития. Приведены вольт-амперные и спектральные характеристики плазмодов, а также фотографии развития разряда во времени.

ON SOME FEATURES OF PLASMA DISCHARGE  
ABOVE WATER SURFACE

*V.B. Yuferov, E.V. Mufel, V.I. Tkachov, S.V. Sharyi,  
A.N. Shapoval*

National Science Center  
“Kharkov Institute of Physics and Technology”,  
Nat. Acad. of Sci. of Ukraine  
(1, Akademicheskaya Str., Kharkov 61108, Ukraine;  
e-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua)

S u m m a r y

We have created an experimental installation which allows one to produce autonomous spherical plasma formations. The processes that occur at the initial discharge stage have been studied, and two possible scenarios of their development have been described. The current-voltage and spectral characteristics of plasmoids, as well as photos of the discharge development in time, are presented.