Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Фізико-енергетичний факультет
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка

до дипломної роботи магістра

на тему: **«Особливості високовольтних електричних розрядів у рідких середовищах»**

Виконав: студент 6 курсу,
групи НФ-61
напряму підготовки
6.040204 прикладна фізика
Чуб В.О.
Керівник:доцент,
к.ф.-м.н. Кудрявцев І. М.

Харків - 2017рік

Реферат

Особенности высоковольтных электрических разрядов в жидких средах

Разработана и собрана оригинальная экспериментальная установка для изучения высоковольтных разрядов в жидкостях. С использованием высоковольтного генератора получены высоковольтные импульсы заданной частоты и скважности, а также электрические разряды в водные растворы с выделением водородно-кислородной плазмы и образованием электрогидравлического эффекта. Определены основные физические факторы, влияющие на характер и силу разрядов, найдены резонансные частоты.

Реферат

Особливості високовольтних електричних розрядів в рідких середовищах

Розроблена та зібрана оригінальна експериментальна установка для вивчення високовольтних розрядів у рідинах. З використанням високовольтного генератора отримані високовольтні імпульси заданої частоти і шпаруватості, а також електричні розряди у водному розчини з виділенням воднево-кисневої плазми та утворенням електрогідравлічного ефекту. Визначено основні фізичні фактори, що впливають на характер і силу розрядів, знайдені резонансні частоти.

Abstract

Features of high-voltage electric discharges in liquids

An original experimental installation for the study of high-voltage discharges in liquids was developed and assembled. Using a high-voltage generator, high-voltage pulses with defined frequency and duty cycle were obtained, as well as electric discharges into liquid with the release of hydrogen-oxygen plasma and the formation of an electrohydraulic effect. The main physical factors influencing the character and strength of the discharges are determined, resonance frequencies are found.

Зміст

1. Вступ 6

2. Основні теоретичні відомості.....8

2.1 Електрична дуга 8

2.2 Електрогідравлічний ефект.....11

2.3 Низькотемпературна плазма.....19

2.4 Експерименти Планте 24

2.5 Аналіз дипломної роботи бакалавра 30

3. Постановка експерименту 36

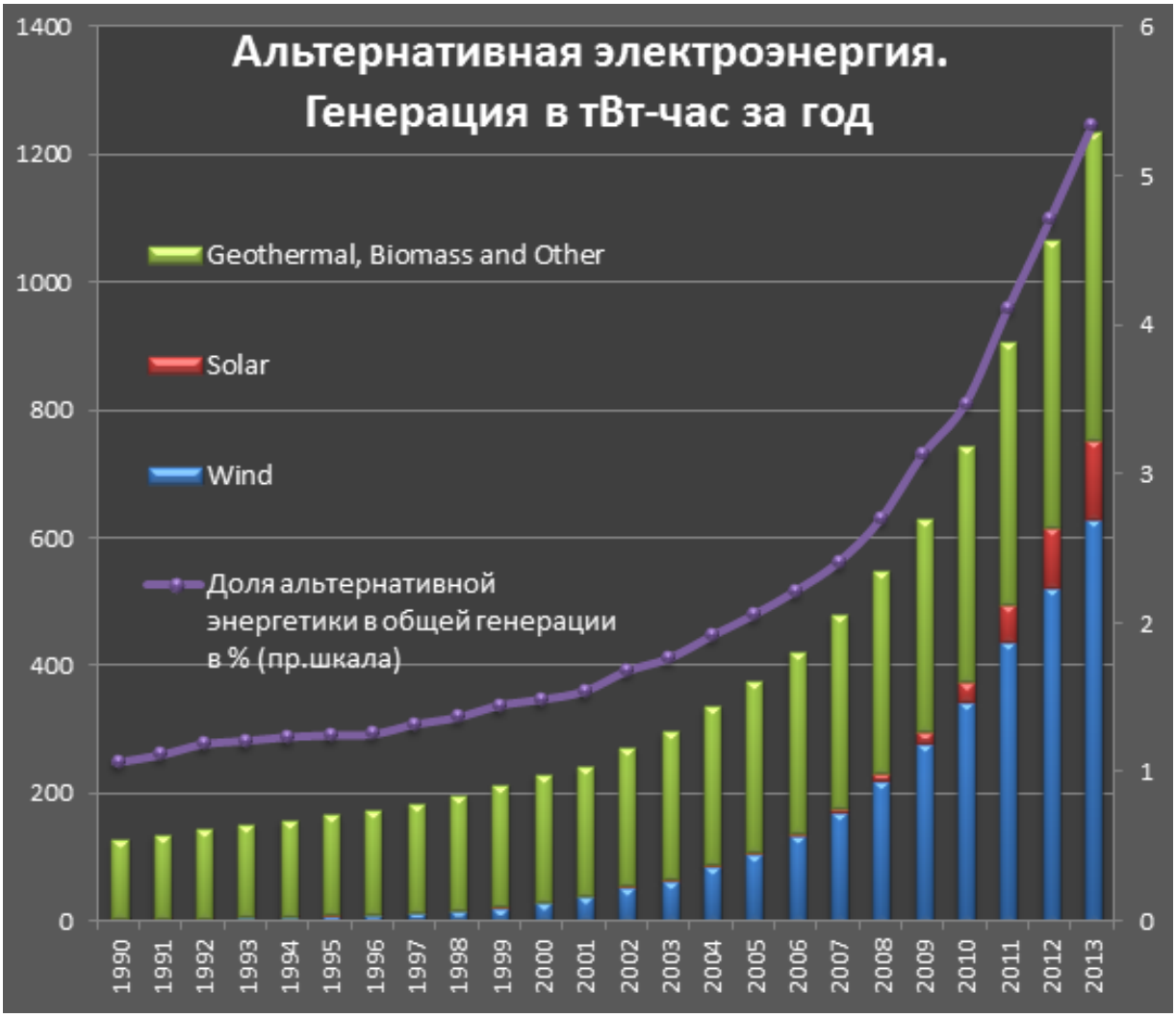
4. Результати експериментів.....44

5. Висновки.....51

6. Список використаних джерел 52

1. Вступ

На сьогоднішній день, незважаючи на розвиток сонячної та вітрової енергетики, ще залишається проблема виснаження викопних видів палива та можливої їх нестачі у близькому майбутньому. С кожним роком доля потужностей відновлюваної енергетики зростає (мал. 1.1).



Мал.1.1. Ріст виробництва відновлюваної енергетики

Проте загальна доля виробництва екологічно чистої енергії все ще залишається низькою. Останні тенденції у зміні клімату потребують комплексних, радикальних та негайних дій. До того ж існуючі способи добутку чистої енергію мають, як відомо, досить багато своїх недоліків, таких

як висока ціна, обмеженість, залежність від погодних умов та інше. Таким чином пошук нових можливих шляхів виробництва екологічно чистої енергії залишаться актуальним і скоріше за все буде таким залишатися ще багато років.

Одним з перспективних напрямків альтернативної енергетики є використання водневих технологій. Водень є одним із найпоширеніших елементів у всесвіті. Водень має високу теплоту згоряння, його можна використовувати як паливо для двигунів або отримання теплової енергії. На Землі в чистому виді водню небагато, але у складі води його безліч, практично нескінченні запаси, тому пошук нових способів отримання водню є дуже актуальним.

Існує досить багато способів отримання водню, але в цілому вони малоефективні. Крім того, водень дуже складно зберігати та транспортувати, він дуже вибухонебезпечний, тому одним із шляхів вирішення цих проблем, може бути виробництво газу прямо на місці споживання, що вирішує проблему перевезення та зберігання.

У даному проекті буде продовжено дослідження високовольтної імпульсної взаємодії розрядів з водним середовищем. Передбачається, що за допомогою високовольтних електродугових розрядів у воду, за умови само-підтримуваних автоколивальних процесів або резонансу, можливо отримання теплової енергії з води. Крім того взаємодія води з високовольтною електрикою, мало досліджений та перспективний напрям, що відкриває шлях до виявлення безлічі нових невідомих науці властивостей.

Метою дипломної роботи є вивчення електродугового розряду в воду, отримання керованої воднево-кисневої плазми і створення ефективного імпульсного електролізера.

2. Основні теоретичні відомості

2.1 Електрична дуга

Електрична дуга - один з видів електричних розрядів в газі або парах, який відбувається при відносно великій силі струму (понад 1 А) і відносно низькій напрузі горіння, зокрема розряд з низьким катодним падінням потенціалу (менше 20 В). Цим дуги відрізняються від тліючого розряду, що володіє високою напругою горіння і високим катодним падінням потенціалу (кілька сотень вольт) при відносно малій силі струму. Для проходження електричного розряду через газ, в останньому повинні з'явитися електрично заряджені частинки - іони і електрони. Характерне для дуг мале катодне падіння потенціалу може здійснюватися лише за умови, що емісія електронів з катода досягає величини 103-107 А/см^2 (в залежності від типу дуги). Ця емісія електронів здійснюється або внаслідок високої температури катода, або непрямим шляхом - завдяки високій температурі шару газу (пару), що примикає до катода. Зазначена висока температура катода і прилеглого шару плазми в самостійному дуговому розряді підтримується елементарними процесами самої дуги. Розряд називають самостійним, якщо поява заряджених частинок в газі пов'язана тільки з наявністю електричного поля, що викликає розряд. В цілому, в самостійній дузі температура електронів, іонів і газу в стовпі практично однакова. Напруга, при якому утворюється самостійний розряд, носить назву напруги запалювання або потенціалу запалювання. Його значення залежить від властивостей газу і твори тиску газу p на відстань між електродами d. При певному значенні p * d потенціал запалювання досягає мінімуму (закон Пашена), що становить, наприклад, для повітря 330 В при p*d = 75,4 Па-см; при великих або менших значеннях p*d потенціал запалювання збільшується. При атмосферному тиску напруга запалювання зазвичай набагато більше мінімального: так, при d = 1 см для повітря воно становить 3x104 В.

Стовп дуги являє собою суміш електронів, позитивних іонів і більш-менш сильно порушених нейтральних атомів, що яскраво світяться і є так званою плазмою.

Для запалювання електричної дуги є три принципово різні способи, а саме:

1) за допомогою контакту і подальшого роз'єднання електродів;

2) за допомогою створення високо іонізованого потоку пару,який перемикає міжелектродний простір, в більшості випадків за допомогою третього електроду, призначеного для запалювання;

3) за допомогою подачі високої напруги (імпульсу високої напруги), достатнього для запалювання дуги.

При запаленні дуги за допомогою контакту і подальшого роз'єднання обидва електроди в точці зустрічі будуть настільки сильно розжарені, що катод стане здатним до електронної емісії, і таким чином буде приведений в дію механізм горіння дуги. Одночасно деяка кількість матеріалу електродів випаровується, утворюючи перемичку між електродами, через яку може проходити струм. Температура цієї перемички настільки велика, що в дузі, яка знаходиться в стадії зародження, виникає плазма, яка проводить струм.

Для запалювання необхідна деяка мінімальна сила струму, яка залежить від матеріалу електродів, а також ланцюг харчування, який при роз'єднанні електродів не повинен допускати зниження сили струму в дузі нижче певного мінімального значення. Замість безпосереднього контакту обох електродів можна, зрозуміло, замикати ланцюг за допомогою введення на короткий час третього електрода, який утворює «перемичку» між електродами.

Вугільні дуги з силою струму порядку декількох сотень ампер можна вмикати і так, щоб при запалюванні аноднопідключений третій електрод у вимкненому стані торкнувся кінця катода, а після подачі напруги був видалений з міжелектродного простору за рахунок електромагнітних сил. При струмі

запалювання в кілька сотень ампер в місці зіткнення катода і електрода включення утворюється високо-іонізована хмара пари вугілля, яке по досягненню анода і запалює дугу.

При обох описаних методах запалювання кінець катода досягає високої температури; одночасно утворюється плазма, що володіє провідністю. Включення дуги за допомогою короткочасної або тривалої подачі досить високої напруги на електроди розкладається на два основних процеси - процес ударної іонізації, що приводить до виникнення самостійного розряду, і процес подальшого переходу цього попереднього розряду в електричну дугу (після розігрівання катода).

Підключення постійної нормальної напруги величиною приблизно 220 В цілком достатньо для запалювання як звичайних розрядів низького тиску, так і ртутних ламп, у яких протягом роботи виникає досить високий тиск, необхідний для термічної дуги. В таких лампах при подачі напруги запалювання виникає електронна лавина, яка при поверненні позитивних зарядів іонів до катода утворює однин з різновидів тліючого розряду при ще холодному катоді. За рахунок іонів цього попереднього розряду починаються елементарні прикатодні процеси дуги - створення позитивного просторового заряду перед катодом, електричне поле якого обумовлює можливість виникнення холодної емісії електронів, або розігрів поверхні катода до температури, достатньої для термічної електронної емісії, необхідної для підтримки розряду. Так як одночасно зі збільшенням щільності струму плазма розряду все більш розігрівається, то при досить високій силі струму в газовому просторі починається термічна іонізація, яка заміщує іонізацію, обумовлену електронами, прискореними до області катодного падіння потенціалу. Таким чином, для розряду великої сили струму необов'язково мати велику величину катодного падіння потенціалу тліючого розряду. Тому при зростанні сили струму відбувається перехід від тліючого розряду,

властивості якого визначаються полем, до дугового розряду, завдяки термоеміссії електронів з катода і термічної іонізацією в стовпі плазми. Саме тому дуговий розряд володіє малим катодним падінням напруги, близько 10 В. [1]

2.2 Електрогідравлічний ефект

Даний ефект дозволяє отримувати високі і надвисокі тиски з високим ККД. Суть ЕГЕ полягає у перетворенні електричної енергії в механічну, без використання проміжних механічних ланок. При протіканні всередині об'єму рідини, яка міститься у відкритому чи закритому сосуді, сформулюваного імпульсного електричного (кистьового, іскрового та інших форм) розряду, близько зони його виникнення, мають місце надвисокі гідравлічні тиски, які можуть виконувати корисну механічну роботу і які супроводжуються набором фізичних і хімічних явищ.

Основою ЕГЕ є раніше не вивчене явище стрімкого підвищення амплітуди ударної дії, гідродинамічного і гідравлічного ефектів при проходженні імпульсного електричного розряду в провідній рідині за умови максимального скорочення тривалості імпульсу і максимально крутій формі імпульсу та фронту імпульсу, близькою до аперіодичної.

ЕГЕ притаманний режим емісії енергії на активному опорі контура, яке близьке до критичного, тобто коли 1 / C <R2 / 4L, де C - ємність конденсатора, R і L - активний опір та індуктивність контуру. Здійснення ЕГЕ пов'язано з повільним накопиченням енергії в джерелі живлення і практично миттєвим її виділенням в рідкому середовищі. Високі і надвисокі імпульсні гідравлічні тиски є головними діючими чинниками ЕГЕ і призводять до виникнення ударних хвиль зі звуковою та надзвуковою швидкістю; значні імпульсні переміщення рідини, які відбуваються зі швидкостями, порядку сотень метрів

в секунду; потужні кавітаційні процеси, які можуть охоплювати досить великі об'єми рідини; інфразвукові та ультразвукові випромінювання; резонансні механічні явища з амплітудами, що дозволяють проводити розподіл і відшаровування багатокомпонентних твердих тіл та об'єктів; електромагнітні поля високої потужності (десятки тисяч Ерстед); імпульсні світлові, ультрафіолетові, теплові, а також рентгенівські випромінювання високої інтенсивності; імпульсні гамма і (при дуже великих енергіях імпульсу) нейтронної випромінювання; багаторазова іонізація елементів і сполук, які є в рідині.

Ці фактори дають можливість впливати на рідину і об'єкти, що знаходяться в ній, виконувати різні фізичні, хімічні та механічні дії. Наприклад, ударні переміщення рідини, які виникають при зростанні та схлипуванні кавітаційних порожнин, можуть руйнувати неметалеві матеріали і здійснювати пластичні деформації об'єктів з металу, поміщених близько зони розряду. Особливо потужні ультра- інфразвукові коливання, що виникають при проходженні ЕГЕ, додатково дисперегують раніше подрібнені матеріали, призводять до резонансного руйнування великих об'єктів на окремі частинки і здійснюють інтенсивні хімічні процеси полімеризації, синтезу і обриву сорбційних та хімічних зв'язків. На розряд та іонні процеси, що відбуваються у навколишній рідині, мають потужний вплив електромагнітні поля. Під їх впливом можуть відбуватися різноманітні фізичні та хімічні зміни в оброблюваному матеріалі.

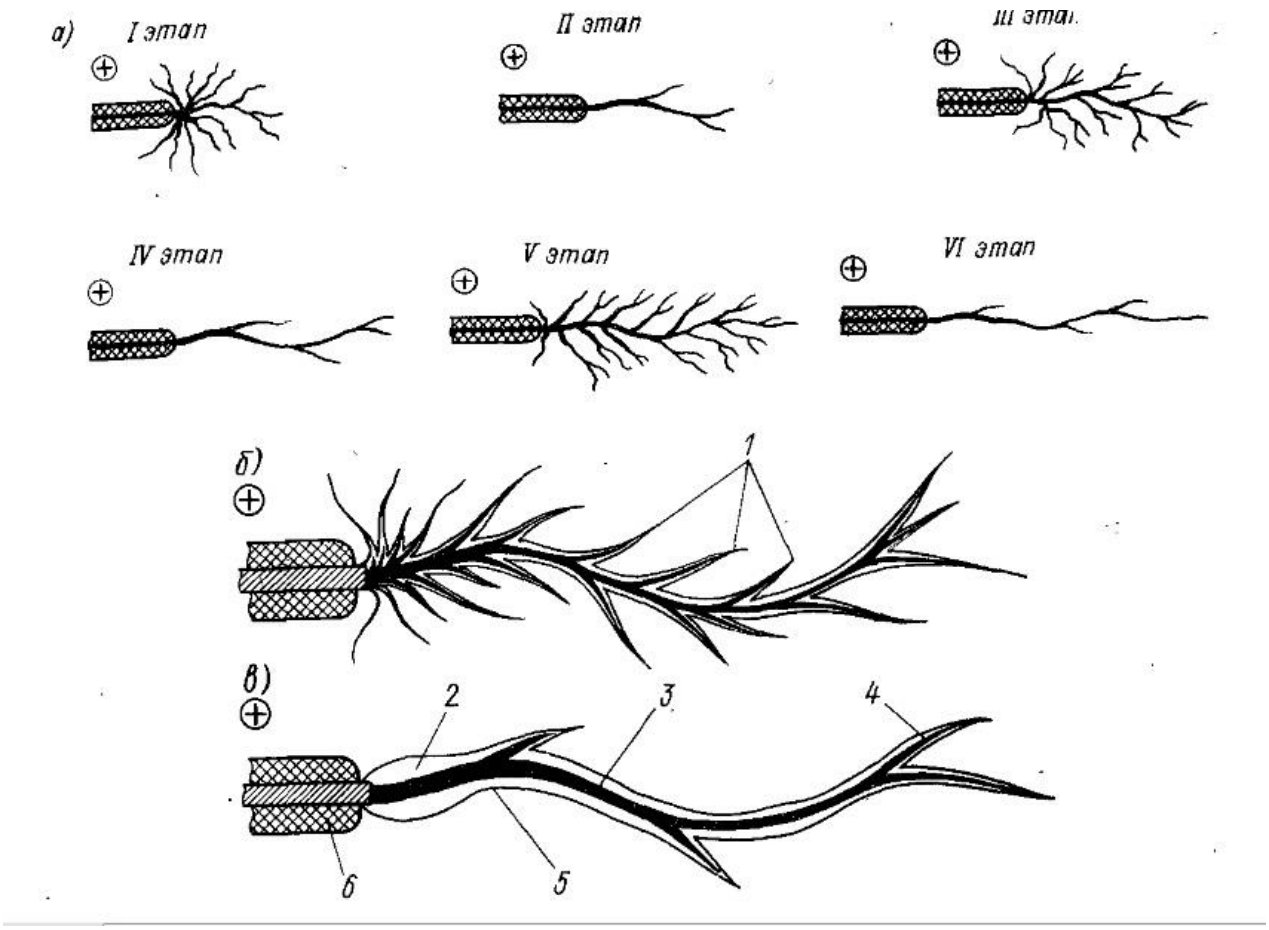
Далі буде розглянуто сам процес виникнення ЕГЕ і розвитку розряду в рідкому середовищі.

Розряд, що викликає надвисокі імпульсні тиски, може мати різну форму: іскрову, кистьову, зовсім без кистей (імпульсний електричний вітер).

У рідини, під час протікання ЕГЕ, утворюється значна за обсягом порожнина, яка викликає перший гідравлічний удар. Потім порожнина змикається з

великою швидкістю, утворюючи другий гідравлічний удар і закінчуючи цикл електрогідравлічного ефекту.

Іскровий розряд зростає в часі шляхом послідовного розростання стримерів в міжелектродному проміжку. Зростаючий стример складається з безлічі каналів з численними відгалуженнями від них. Зростання кожного окремого «вуса» стримера є багатоступеневим процесом (мал.2.2.1).



Мал. 2.2.1. Схема розвитку зростаючого стримера і його газової оболонки

а - етапи ступеневого розвитку проростання стримера (I - IV); б - схема процесу для моменту етапу V; в - схема процесу для етапу VI;

1 - окремі бокові вуса стримера; 2 - оболонка у основі стримеру; 3 головний канал стримеру; 4 - канал вуса стримера; 5 - оболонка; 6 - електрод

Якщо розглядати падіння напруги тільки на одному вусі, то воно має ступінчастий характер, але тому що зростання окремих вусів відбувається не синхронно з іншими, ця східчастість взаємно перекривається, стає слабкою, а для всього процесу в цілому зовсім зникає.

Основна маса газоподібних продуктів виникає в процесі росту стримерів, з них виникає парогазова сорочка каналу іскрового розряду. Бульбашки газів, які утворюються в рідини на вусах стримерів при їх зростанні, існують відносно довго і навіть тоді, коли той чи інший вус вже зникає. Ці бульбашки можуть яскраво світитися жовто-оранжевим або фіолетово-рожевим кольором під впливом власних полів розряду.

При проходженні стримера через рідину, іони рідини, розряджаючись на зростаючий стример як на «висувний» електрод, утворюють на вже сформованій його поверхні тонку газову плівку, що відокремлює вже сформований стовбур або гілку стримера від навколишньої рідини. Таким чином відбувається ефект названий явищем самоізоляції розряду, який сприяє збільшенню ефективності всього процесу. Ізолююча плівка складається з атомарного і молекулярного кисню та водню, газоподібного перекису водню, а також електрично нейтральних вільних радикалів Н і ОН, які існують в парах води. Оскільки, зростання стримера відбувається не тільки в просторі, але і у часі, то його основа у вістря позитивного електрода продовжує збільшувати товщину. Крім того з вістря позитивного електрода при формуванні розряду відходить значна кількість вусів, зникаючих після утворення головного каналу, стягуючись в нього і ще більше збільшуючи його товщину (див мал. 2.2.1).

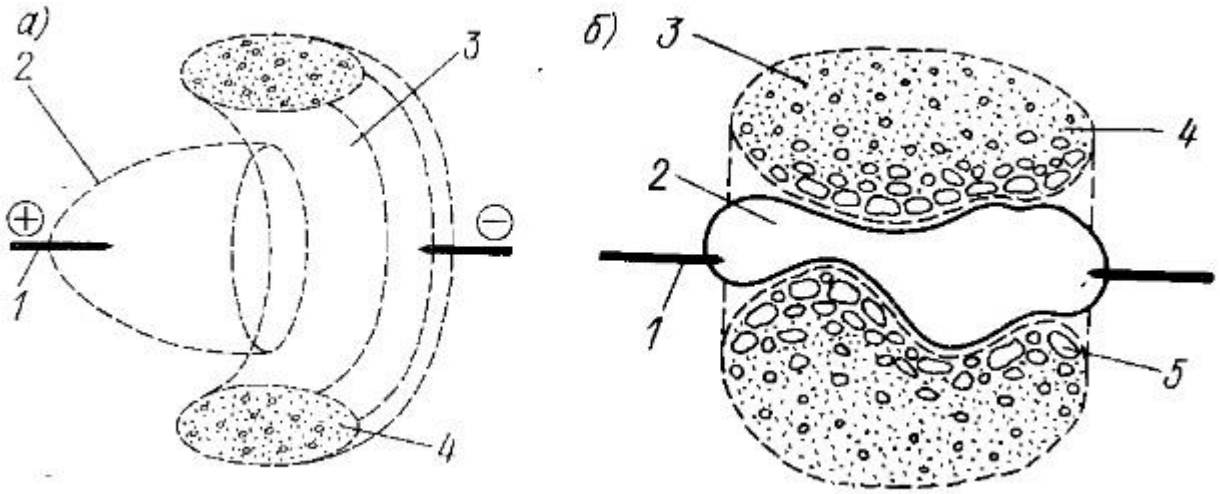
З часу виникнення стримера в рідині між електродами починається перший етап існування кавітаційної порожнини. На даному етапі тиски ще не великі, а порожнина є тонкою трубкою, навкруги каналу стримера. Істотне зростання порожнини починається разом з ростом діаметра каналу розряду при його

переході в іскрову форму і виникненням пробою між електродами. Температура в каналі різко підвищується (до 40 000^{O} С і більше), викликаючи появу додаткової кількості продуктів розпаду рідини і домішок в оболонці каналу, що призводить до різкого стрибка тиску, за рахунок чого процес набуває вибухового характеру. Рідина набуває все більшого прискорення і розлітається в різні боки від каналу, утворюючи порожнину. При цьому оболонка каналу є електричною і тепловою ізоляцією каналу від навколишнього середовища, в тому числі і від втрат тепла при випромінюванні. Однак процес протікає при тисках, значення яких перевищують критичні, тому в оболонці зникає різниця між парою і рідиною, а пар або не з'являється зовсім, або з'являється в тому випадку, коли при деяких параметрах імпульсів його існування стає можливим. Стан речовини в парогазової сорочці неоднорідний і плавно переходить від стану плазми до нормальної рідини при віддаленні від осі каналу.

Передача енергії рідині через тонкий шар еластичної парогазової сорочки відбувається не тільки в той період, коли діаметр каналу зростає, але і через якийсь час, після того як цей ріст припиниться. Зі збільшенням діаметра каналу розряду товщина шару парогазової сорочки його зростає непропорційно цьому збільшенню, по суті вона залишається постійною, а при деяких режимах навіть зменшується. Саме цією обставою забезпечується сталість умов передачі тисків в навколишню рідину не тільки на стадії розширення каналу, а й протягом деякого часу після того, як його зростання припиниться.

Коли межа кавітаційної порожнини закінчує свій рух, порожнина закривається, і енергія стиснутої рідини поступово переходить кордон порожнини. У початковий момент закривання порожнини в рідини навколо неї весь час розширюється сферична межа розділу рухів порожнини, і рідини, що вже почала рухатися до порожнини, що закривається. Тут утворюється

кавітуюче кільце - тисячі бульбашок звичайної кавітації, розташованих у вигляді тороїду, який лежить у площині, перпендикулярній до лінії розділу по її середині (мал.2.2.2 а).



Мал. 2.2.2. Схема кавітаційних явищ при електрогідравлічному ефекті:
а – момент виникнення кавітаційного кільця при закритті порожнини;
б – характер спотворення порожнини під дією кавітуючого кільця;
1 – електроди; 2 – кавітаційна порожнина; 3 – кавітуюче кільце; 4 – кавітаційні бульби; 5 – розтягнуті бульби.

При розширенні верхньої межі цієї області і в міру віддалення її від порожнини, що розриває рідину зусилля поступово слабшають і нарешті, зникають, що і визначає верхню межу існування кавітуючого кільця. Внутрішня (нижня) межа кільця визначається діаметром тієї початкової області, де перш за все виявлялися зусилля, що розривали рідину, однак ця нижня межа виражена менш різко.

Кавітуюче кільце грає дуже велику роль в процесі закривання кавітаційної порожнини. Окремі бульбашки кільця, що знаходяться поблизу порожнини, під впливом розтягуючих зусиль розширюються швидше за інші, і стискаюча

порожнина при цьому як би розтягує їх, в силу чого її, в загальному, правильна сферична поверхня спотворюється і порожнину набуває незвичайні форми. На мал. 2.2.2, б показаний один з можливих випадків такого спотворення порожнини. В результаті при закритті порожнини можуть виникати місцеві зростання тиску, які у багато разів перевищують ті тиски, при яких порожнина виникала.

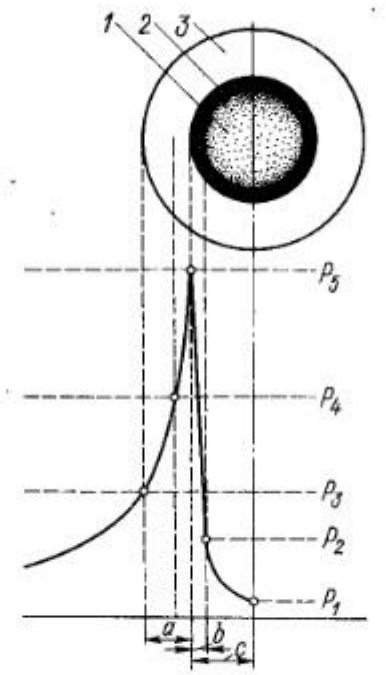
Кавітаційне кільце, що захлопує дуже великий об'єм рідини, є тим основним фактором, який, якщо говорити про вплив кавітації, визначає багато хімічних процесів, що відбуваються при електрогідравлічному ефекті.

При здійсненні послідовного ряду імпульсних розрядів в рідині кожний наступний електрогідравлічний удар може виникнути тільки після того, як кавітаційна порожнина від попереднього розряду встигне закритися, що і визначає можливу максимальну частоту розрядів електрогідравлічної установки.

Електрогідравлічний удар викликає появу тисків в десятки тисяч атмосфер навіть в дуже великих обсягах рідини. Тиски в рідині при здійсненні електрогідравлічних ударів виникають внаслідок передачі рідині енергії від каналу розряду, що розширюється з космічної швидкістю. Розширення відбувається за час трохи більший, ніж тривалість фронту першої напівхвилі імпульсу струму. Цей період характеризується надзвичайно швидким наростанням власного магнітного поля розряду і різко вираженими явищами скін-ефекту, що супроводжуються перекачуванням майже всієї енергії, яку несе канал розряду на його периферію, і утворенням на ньому так званої «скіновой сорочки», матеріально-енергетичної оболонки з тиском в ній, що на один-два порядки перевищує ті, які потім виникнуть і будуть виявлені в рідині. Від оболонки до центру розряду тиск падає настільки швидко, що в деяких випадках в центрі каналу може утворитися вакуум (звідси середні тиски в каналі розряду порівняно невеликі).

Скінова оболонка розряду оточена тонкою парогазової оболонкою, яка є демпфером, що різко знижує механічний ККД розряду. Тому зменшення товщини цієї оболонки є одним з найбільш перспективних шляхів підвищення механічного ККД розряду.

Схема структури розподілу тиску в каналі і в навколишній рідини приведена на мал. 2.2.3.

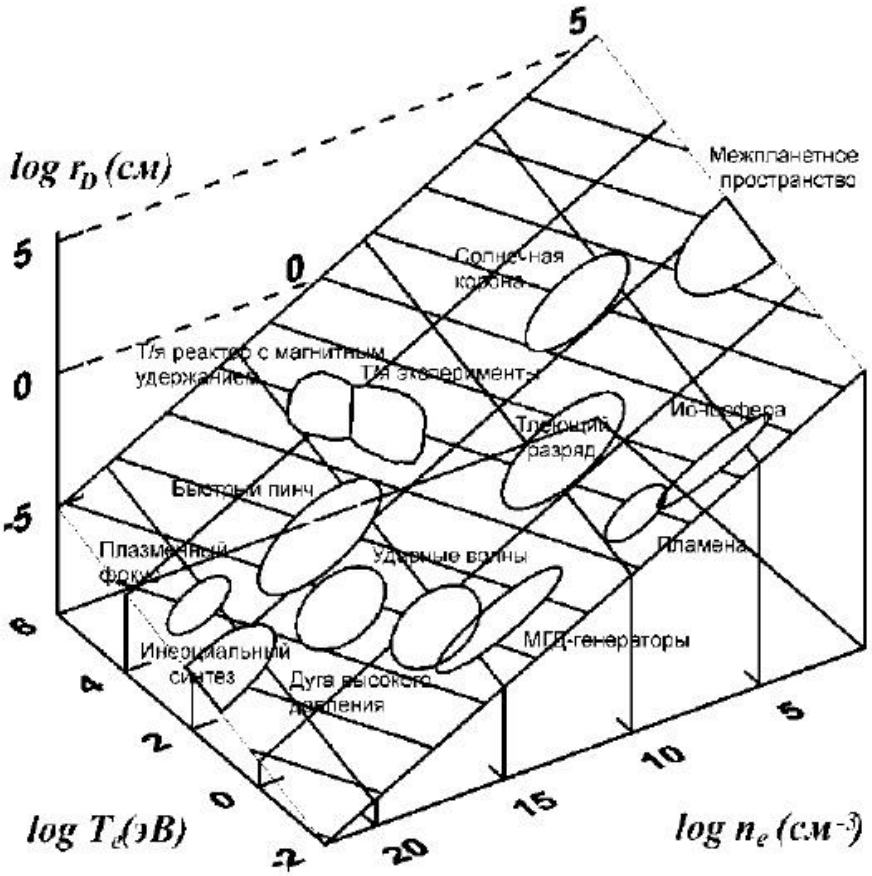


Мал. 2.2.2. Схематичне зображення структури каналу розряду та розподілення тиску в ньому (P_1-P_5 – тиски у відповідних зонах: P_1 – 0-2*10^6 Па, P_2 – до 2*10^8 Па, P_3 – до 5*10^9 Па, P_4 – до 10^{10} Па, P_5 – до 2*10^{10} Па; а – товщина парогазової оболонки, а = 0,001-0,1 мм; б – товщина шарової оболонки, б = 10^{-5}-10^{-3} мм; с – радіус каналу розряду, с = 0,5-5,0 мм) : 1 – центральна частина розряду; 2 – оболонка каналу; 3 – парогазова оболонка

Таким чином, унікальні можливості електрогідравлічного впливу і високий ККД ЕГЕ дозволяють широко застосовувати його в різних сферах народного господарства.[2]

2.3 Низькотемпературна плазма

Плазма, є найбільш поширеним станом речовини у космосі (зірки, міжзоряне середовище, іоносфери планет), на Землі в природних умовах зустрічається лише при грозових розрядах і у полум'ях. У лабораторії і промисловості речовина в плазмовому стані зустрічається досить часто.



Мал. 2.3.1. Характеристики природних та штучних плазмових об’єктів. На поверхні показані ізолінії дебаївського радіусу.

Одним з її найбільш важливих, в перспективі, застосувань, є керований термоядерний синтез, здійснення якого дозволило б людству в значній мірі вирішити енергетичну проблему.

Що ж стосується низькотемпературної плазми, то вона широко застосовується в радіоелектронних приладах, плазмотронах, МГД-генераторах, газових лазерах і багатьох інших пристроях, а в останні роки і в промислових технологіях.

Найбільш важливими характеристиками плазми є температура і щільність заряджених частинок. На мал.2.3.1 наведені типові параметри плазми в різних об'єктах і пристроях. Є цілий ряд природних плазмових космічних об'єктів, температура яких перевищує мільйон градусів (100 еВ). Таку плазму називають високотемпературною. Протягом останніх п'ятдесяти років високотемпературну плазму отримують і досліджують в лабораторії, хоча грандіозні сучасні термоядерні установки типу JET вже важко назвати "лабораторними" пристроями.

Температура більшості земних і ряду космічних об'єктів, як видно з малюнка, не перевищує десяти електрон-вольт. Оскільки потенціали іонізації і дисоціації атомів і молекул лежать між 2 і 20 еВ, таке середовище являє собою, очевидно, не повністю іонізований і дисоційований газ. Якщо щільність заряджених частинок в газі дуже мала, то вони взаємодіють, в основному, з нейтральними частинками. Така взаємодія є короткодіючою, і основну роль в такому іонізованому газі грають парні зіткнення. Коли щільність заряджених частинок зростає, поступово зростає роль взаємодії заряджених частинок один з одним. Найважливішою характеристикою при цьому є величина радіусу дебаївського екранування.

$$r_D = \sqrt{\frac{T}{4\pi e^2 n_e}} = 743\sqrt{\frac{T[\text{эВ}]}{n_e[\text{см}^{-3}]}}\ [\text{см}] \qquad (2.3.1)$$

Саме в тому випадку, коли дебаївський радіус менше характерних розмірів іонізованого об'єкта, середовище прийнято називати плазмою. Якщо прикласти до плазмового об'єкту зовнішнє поле, то воно буде проникати всередину на глибину лише близько дебаївського радіусу. Величина його, яка може змінюватися для різних об'єктів від мікроскопічних до космічних розмірів, наведена на в таблиці 2.3.1.

	T[эВ]		
$n_e[\text{см}^{-3}]$	1	10	100
10^6	0.74	2.3	7.4
10^8	0.074	0.23	0.74
10^{10}	0.0074	0.023	0.074

Таблиця 2.3.1 Дебаївський радіус r_D, см

Цікаво визначити також умови, при яких втрата енергії електроном в електрон-атомних зіткненнях стають менше в порівнянні з втратою енергії в кулонівських зіткненнях з іонами. Частота електрон-атомних зіткнень дорівнює

$$\nu_{ea} = n_a \xi \sigma_{ea} \sqrt{\frac{T_e}{m}}, \qquad (2.3.2)$$

де $\sigma_{ea} \sim \pi a_0^2$, а множник $\xi \geq 1$ залежить від особливостей електронної оболонки атому. Частота електрон-іонних зіткнень дорівнює

$$\nu_{ei} = n_i \sigma_{ei} \sqrt{\frac{T_e}{m}}, \qquad (2.3.3)$$

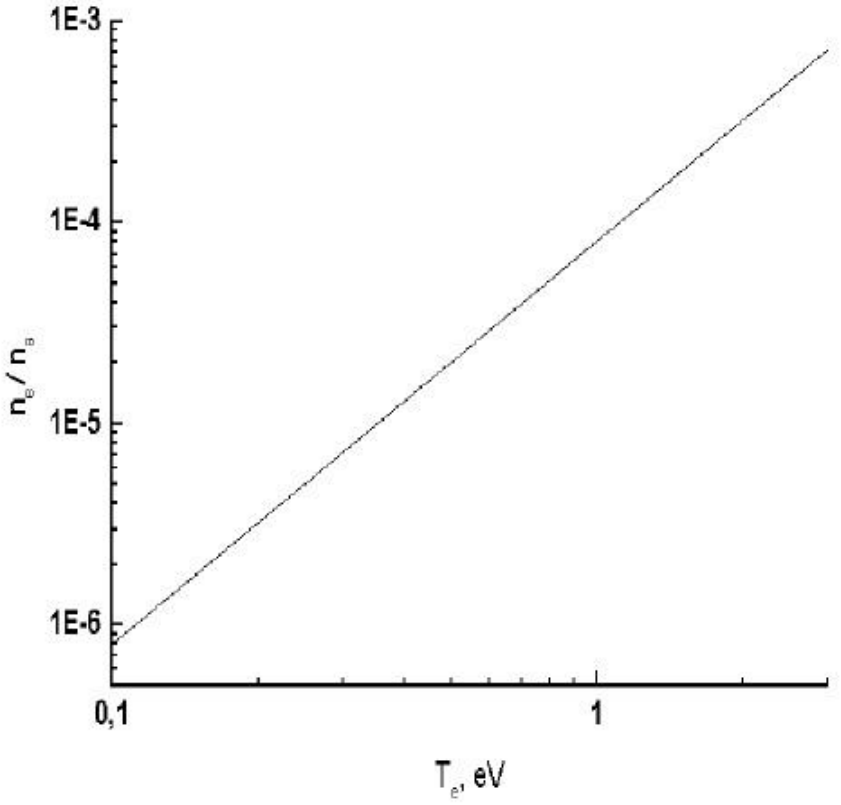
де частота кулонівських зіткнень при А = 15

$$\sigma_{ei} \sim \left(\frac{e^2}{T}\right)^2 \Lambda \approx \frac{10^{-12}}{T^2\,[\text{эВ}]}\,[\text{см}^2]. \qquad (2.3.4)$$

Плазму можна вважати слабо іонізованою, якщо $v_{ea} / v_{ei} > 1$. Підставляючи (2.3.2) та (2.3.3) і враховуючи, що в низькотемпературній плазмі можна з високою точністю прийняти $n_e = n_i$, отримаємо обмеження на ступінь іонізації низькотемпературної плазми

$$\frac{n_e}{n_a} < 8 \cdot 10^{-5} \xi T_e^2\,[\text{эВ}]. \qquad (2.3.5)$$

Враховуючи додаткову умову $T_e << I \sim 10$ еВ, побудуємо для водневої плазми n_e / n_a як функцію T_e (мал.2.3.2) в межах 0.1 - 3 эВ (ξ=1).



Мал. 2.3.2 Межа, вище якої електрон-йонні зіткнення у водневій плазмі домінують над електрон-атомними.

Зона нижче кривої є область, де домінують електрон-атомні зіткнення. Звісно, ця межа дуже умовна. У звичайному, для лабораторної плазми діапазоні 0.1 - 3 еВ, плазма, може вважатися слабоіонізованою, якщо ступінь іонізації нижче 10^{-3}.

Зі сказаного вище ясно, чому знання про іонізованні гази, незважаючи на трьохсотрічну історію його дослідження, все ще далекі від повноти. Неповна іонізація призводить до великої різноманітності в процесах частинок (електронів, іонів, атомів, молекул, радикалів і т.п.). З іншого боку температура середовища досить висока для того, щоб в ній з великою ймовірністю протікали реакції, пов'язані з дисоціацією, перегрупуванням і рекомбінацією молекул і атомів, тобто реакції зазвичай звані хімічними. Наприклад, для адекватного опису електричного розряду в повітрі, необхідно

враховувати більше 200 іонно-молекулярних реакцій. Ця реакційна активність плазми, поряд з її термічним впливом на поверхні, є основою багатьох технологічних застосувань, але істотно ускладнює її дослідження. Проте, за останні два-три десятиліття роботи в області газових лазерів, МГД-генераторів, потужних НВЧ пристроїв, високовольтних розрядників, іскрових і стримерних камер привели до екстенсивного розвитку досліджень процесів в низькотемпературній плазмі, в тому числі і при тиску порядку атмосферного.[3]

2.4 Експерименти Планте

Слід також згадати експерименти Гастона Планте, який хотів створити модель блискавки в своїй лабораторії. На перший погляд це завдання важко назвати новим. Чимало вчених того часу, користуючись електростатичними машинами, отримували іскри до півметра в довжину, які по всьому своїм виглядом нагадували лінійну блискавку. Але в природі є блискавки і інших типів, наприклад, кульові, які Гастон Планте і спробував відтворити.

До відома, сьогодні кульові блискавки для нас загадка. Сотні гіпотез намагаються пояснити їх форму і енергію, спираючись на властивості пилу та оксидів, електромагнітних хвиль і вихрів, термоядерної енергії та енергії світового вакууму. Часом ідеї дуже дотепні, але підсумок завжди один - кульову блискавку отримати не вдається, але схоже, що Планте це зробив. У доповіді автор розповів про своїх експериментах з тим, щоб можна було їх повторити. Головний висновок доповіді: кульова блискавка - особлива, первинна форма стійкого стану електричної енергії. Лінійна ж блискавка є попросту комбінацією кульових. А тепер розповімо все по порядку. Почнемо з головного - джерел струму, які дозволяли робити такі експерименти. Їх було

два типи. Одні призначалися для отримання дуже сильних, в тисячі ампер, струмів при напрузі 4 - 7 вольт. Інші давали високу імпульсну напругу до 10 000 В при струмах в десятки ампер. У кожному разі Планте отримував унікальне поєднання сили струму, напруги і часу їх дії. Воно різко відрізнялося від того, що давали джерела енергії, що застосовувалися іншими вченими. Для отримання великих струмів вчений застосовував акумуляторну батарею, що містила до 4000 невеликих свинцевих акумуляторів, з'єднаних паралельно. Заряджалась вона, за словами Планте "миттєво" від 2 - 3 гальванічних елементів, здатних давати напругу не більше 7,5 В при струмі максимум 10 А. Якщо під миттю малося на увазі 2 - 3 секунди, то енергія заряду акумуляторної батареї не перевищувала 220 Дж. Але розряд її носив особливий характер. Батарея мала мізерно малий внутрішній опір, тому практично вся її енергія виділялася на навантаженні. Це нагадує режим короткого замикання. Відзначимо, що сучасні свинцеві акумулятори в результаті цього приходять в непридатність. Акумулятори Планте в їхній первісній формі режим короткого замикання переносили прекрасно і тому були зручні в експериментах, де були потрібні сильні струми.

Для отримання високих напруг Планте змінював характер з'єднання вже заряджених акумуляторів з паралельного на послідовне. В результаті їх електрорушійні сили (ЕРС) складалися. Робив він це одним поворотом рукоятки спеціального механічного перемикача "реостатичної машини". Опишемо кілька дослідів, в яких, на переконання Планте, при ЕРС батареї 2000-4000 В виходили крихітні кульові блискавки.

Досвід 1. Посудина наповнена водним розчином кухонної солі. У неї занурений платиновий електрод, з'єднаний з мінусом батареї. Зверху плавно опускався інший платиновий електрод, з'єднаний з плюсом батареї. У момент зіткнення з поверхнею рідини на кінці його виникає та світиться кулька. Якщо почати електрод акуратно піднімати, то кулька збільшується, досягаючи

сантиметра в діаметрі. У цьому випадку вона починає представляти собою стійке утворення, яке обертається. Напрямок обертання непередбачуваний.

Досвід 2. При збільшенні сили струму в 2 - 3 рази, що досягалося включенням 2 - 3 батарей паралельно, вдавалося створити вогневу кульку в дистильованій воді. Вона була прозора, а в місці її зіткнення з водою була видна пластинка, що світилася. Якщо електрод трохи піднімався, кулька приймала форму яйця. Ставало чітко помітно його обертання. Нижня частина кульки покривалася безліччю фіолетових світних ниток і блискіток. Напрямок обертання і тут був випадковий, що говорить про те, що він не пов'язаний з дією електричного струму. У той же час при переміщенні електрода сферичне утворення слідувало за ним. Це говорить про те, що воно отримувало енергію від батареї. Взагалі ж Планте бачив у цих утвореннях, як і в кульових блискавках, прояв особливого виду матерії, створеної електроенергією. Яким же чином на основі цих та багатьох подібних дослідів пояснював Планте природний феномен кульової блискавки? Це схема утворення кульових блискавок на кінці смерчу. Заряди ґрунту і хмар протилежні за знаком. Наповнений водяними струменями і блискавками "хобот" смерчу виконує роль провідника. Стікаючі по ньому струми запалюють на залитій водою поверхні землі вогняні кулі. Планте зазначав, що в багатьох випадках під час грози смерч слабкий і майже не видно. Але його електропровідності і в цьому випадку достатньо для утворення кульових блискавок. Чисельні спостереження свідків відзначають у кульової блискавки наявність великої енергії. Але спроби співвіднести цю енергію з масою кульової блискавки нерідко ставили дослідників у глухий кут. Виходило, що енергоємність її речовини настільки велика, що не піддається поясненню без залучення ядерних процесів. Теорія Планте пояснює цей феномен тим, що кульова блискавка отримує енергію ззовні.

На сьогодні немає готових джерел електроенергії з характеристиками батареї Планте. Їх можна створити на основі спеціальних електрогенераторів з

маховиками або батарей іонних конденсаторів. Але найпростіше, напевно, відтворити батарею Планте.

Електричні фонтани Гастона Планте.

Провідники зі струмом, нагадаємо, створюють навколо себе магнітне поле, в результаті чого відштовхуються або притягуються один до одного. У звичайних випадках, наприклад в кімнатній електропроводці, струми і викликані ними сили порівняно малі, а оскільки самі провідники досить жорсткі, ніяких змін їх форми ми не помічаємо. Лише при аваріях струми короткого замикання досягають тисяч ампер на квадратний міліметр, і тоді магнітні сили зав'язують провідники товщиною в руку вузлами. Зате, пропускаючи по рідині відносно невеликі струми, Г.Планте виявив, що часом при цьому виникають досить несподівані ефекти. Ось найпростіший для повторення досвід Планте. У посудині з розчином мідного купоросу (чайна ложка на літр води) два мідних електрода. При подачі на них напруги всього в 2-3 В на всьому протязі позитивного електрода виникають бульбашки кисню. Якщо ж до електродів підключалася батарея з 15 - 20 елементів Бунзена, що розвивала напругу 45-50 В, виникала інша картина. Кисень виділявся, в основному, на кінці електрода струменем, який розпливався у вигляді пластівців. Якщо в цей момент до краю електрода наближали полюс намагніченого сталевого стрижня, хмарка газу приходила в швидкий обертальний рух. Його напрямок змінювався на протилежний при зміні магнітного полюса. Пояснити причину руху неважко. У воді під дією електричного поля, створюваного електродами, рухаються іони розчиненої солі. Іон - заряджена частинка. При їх русі в магнітному полі на іони діє сила Лоренца, викривляється траєкторія потоку і закручує іони в спіраль Архімеда. Бувають випадки, коли на рідину з протікаючим в ній струмом діє не зовнішнє магнітне поле, а її власне. Тоді картина стає складніше. Поле змінює

форму траєкторії руху іонів, а вони в свою чергу змінюють конфігурацію поля. Цим і пояснюються незвичайні ефекти в інших дослідах.

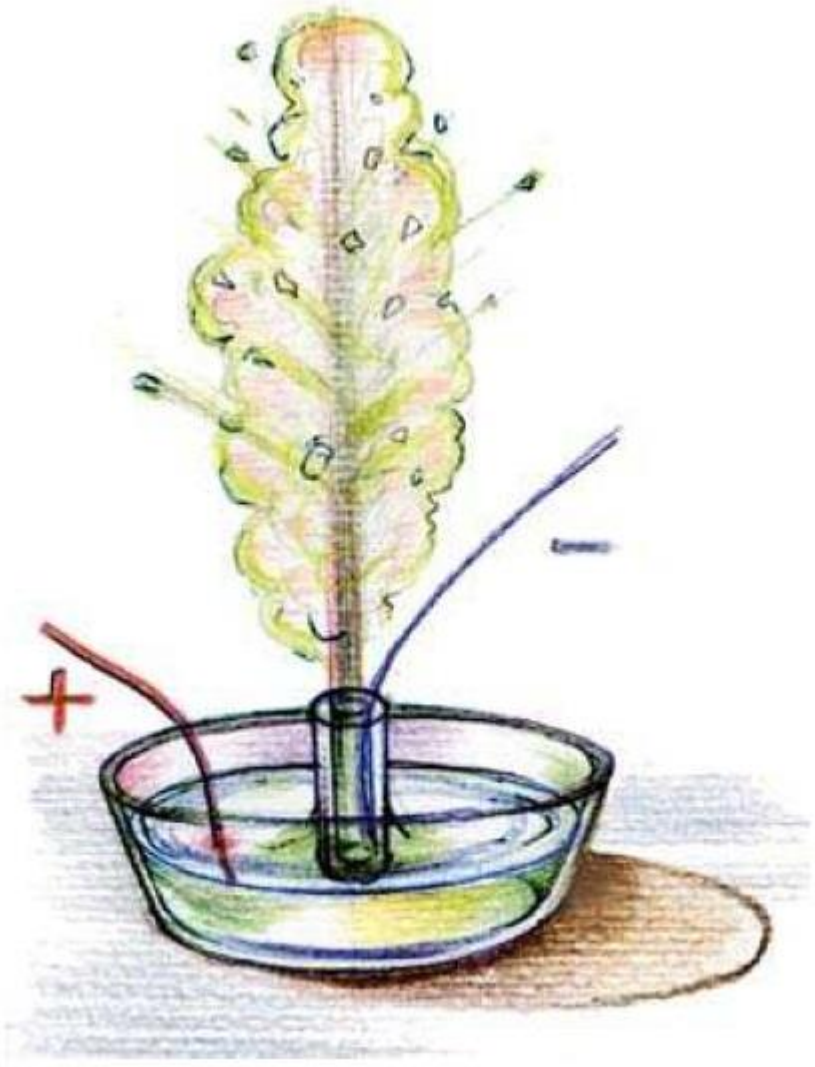
У посудину з солонуватою водою занурювалися провідники, з'єднані з батареєю з 400 пар свинцевих акумуляторних пластин. Якщо один з електродів торкався стінки, то біля нього спостерігався вихор,що на 1,5 - 2 см виходить над поверхнею води і супроводжується появою світних смуг. Отримати джерело з параметрами батареї Планте складно. Орієнтовний розрахунок на основі параметрів енерговиділення, знайдених з малюнків до книги, говорить про можливість застосувати для цієї мети батарею конденсаторів ємністю в одну фараду при напрузі 600 - 800 В.

Однак досвід, чисто зовні схожий з електричним приливом, що виходить у ванні з вазеліновим маслом. Занурені в неї електроди слід з'єднати зі шкільної електростатичною машиною. Позитивний електрод виконувався у вигляді смужки фільтрувального паперу. При напрузі близько 1600 В, перш, ніж відбудеться іскровий розряд, рідина піднімається у вигляді конуса на 2 - 3 см. Аналогічний конус висотою в кілька міліметрів можна спостерігати, використовуючи масло і електростатичну машину.

Нарешті, найкрасивіший досвід - електричний фонтан, вольтаїчна помпа, як назвав його сам автор (мал.2.4.1).

У слабосолону воду опускається скляна трубочка зі вставленим в неї дротяним електродом, з'єднаним з плюсом батареї, що дає напругу 400 В. Мінусовий дрот опускається в чашу з водою. При подачі напруги вода швидко піднімається по каналу трубки і, вириваючись на висоту 20 - 30 см, розсипається на тисячі бризок пара. При більш високій напрузі фонтан зростає, але процес починає йти майже без виділення тепла. Планте звертав особливу увагу на схожість явищ, що спостерігалися в його дослідах, з такими атмосферними явищами, як смерчі і циклони. Він вважав, що обертання

смерчу відбувається завдяки взаємодії атмосферної електроенергії, що стікає по стовпу вологого повітря (з водними краплями), і земного магнетизму.



Мал. 2.4.1. Вольтаїчна помпа Гастона Планте

На підтвердження цього є безліч спостережень, коли смерчі супроводжуються канонадою лінійних і кульових блискавок. Особливо сильні електричні явища, що супроводжуються оранжево-червоним світінням хвиль, відзначаються в районі ока тайфуну - місця його зародження. Один час точка зору Планте на ці грізні явища була популярна серед учених. Але електрична енергія в них була виміряна і зіставлено з енергією повітряних мас.

Виявилася, що частка її незначна, і її взагалі перестали брати до уваги. Лише в останні десятиліття на атмосферну електроенергію стали дивитися інакше. [4]

2.5 Аналіз дипломної роботи бакалавра

В ході попередньої дипломної роботи бакалавра «Особливості високовольтного електричного розряду у воді» було розроблено експериментальну установку та проведено дослідження високовольтних розрядів у воді зі спробою регулювання їх частоти, з метою пошуку можливих резонансних процесів. Експериментальна установка включає в себе наступні компоненти:

1. Резервуар з водним розчином електроліту.

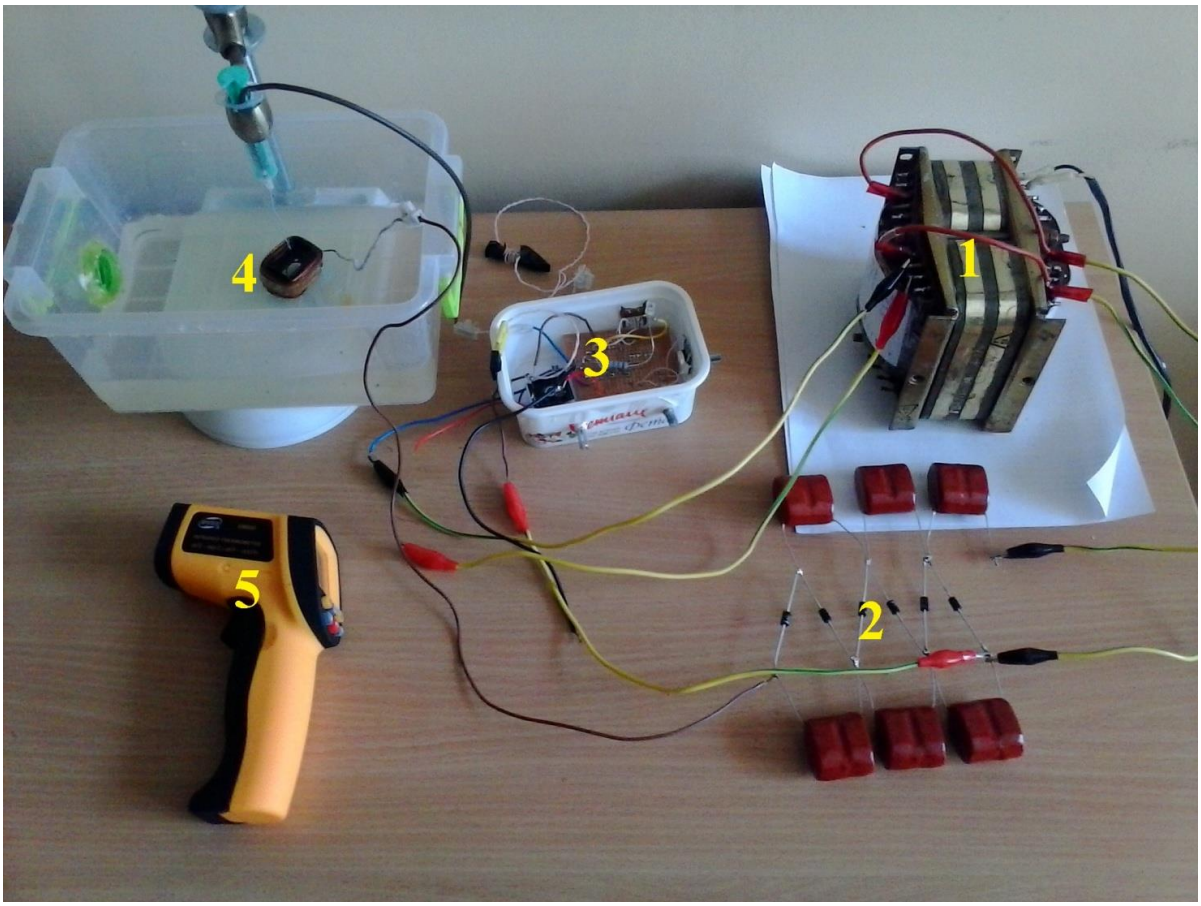
2. Джерело постійного струму для живлення генератора прямокутних імпульсів.

3. Джерело змінного струму для живлення силової схеми.

4. Генератор високовольтних імпульсів з помножувачем напруги.

5. Система подачі високовольтних імпульсів на електроди.

6. Контрольно-вимірювальна апаратура.



Мал. 2.5.1 Загальний вигляд експериментального стенду

1 Трансформатор

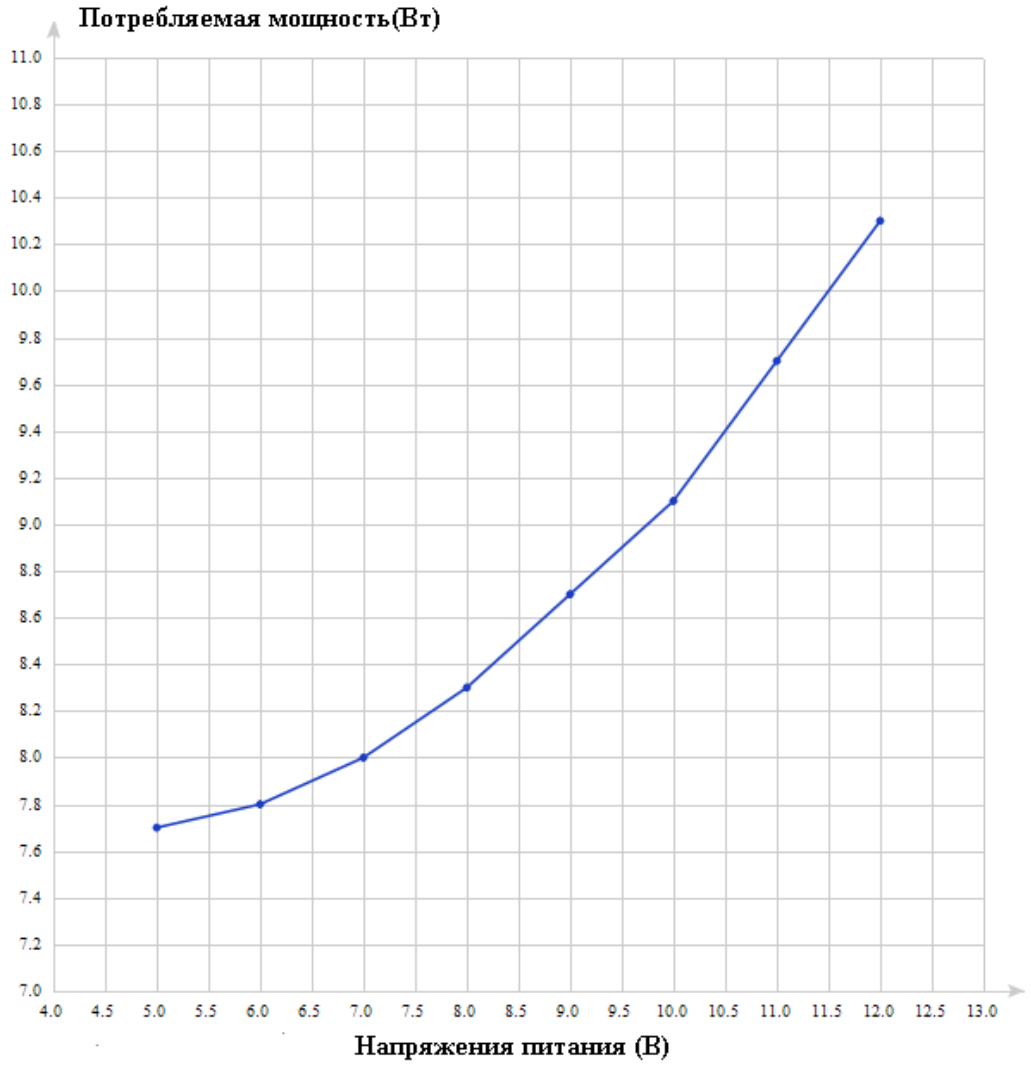
2 Помножувач напруги

3 Генератор прямокутних імпульсів

4 Резервуар з розчином електроліту

5 Пірометр

При виконанні роботи була заміряна потужність установки, яка в середньому становила 8.7 Вт. Також був побудований графік залежності споживаної потужності від напруги живлення генератора прямокутних імпульсів (мал. 2.5.2.).



Мал. 2.5.2. Графік залежності споживаної потужності від напруги живлення генератора прямокутних імпульсів

В ході експерименту вдалося отримати імпульси напругою 530 В. Цього виявилося достатньо для отримання дугового розряду у воді з утворенням воднево-кисневої плазми (мал. 2.5.3).



Мал.2.5.3. Приклад розряду у воді

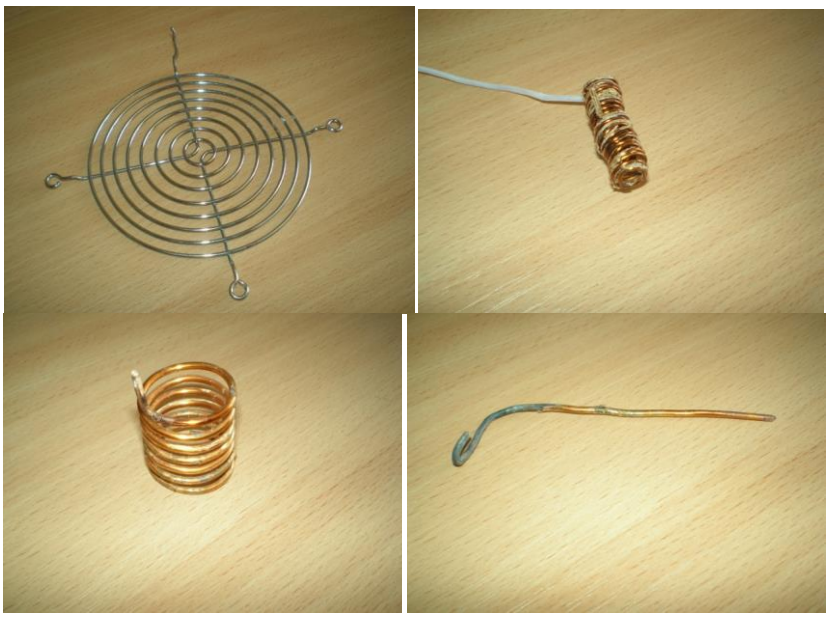
Для посилення ефекту можна використовувати більшу напругу. Необхідною умовою для отримання ефекту є геометрія катода. Катод повинен бути максимально тонким і краще з добре провідного матеріалу (в експерименту була використана мідний дріт товщиною 0.08мм). Дуговий розряд відбувається тільки при дуже малій відстані катода до води (<1мм) і має некерований характер, виділення плазми відбувається не при кожному розряді.

Стабільний процес вдається отримати, опустивши електрод в воду. В даному випадку крім виникнення плазми відбувається електрогідравлічний ефект з виділенням великої кількості бульбашок. При цьому процес керований тільки при великому значенні шпаруватості, і при невисокій частоті (не більше 15 Гц). При зменшенні шпаруватості або збільшенні частоти розряди спочатку

відбуваються не в такт генератора прямокутних імпульсів, а потім і зовсім зникають і настає процес електролізу, як при постійному струмі. Однак якщо при мінімальній шпаруватості катод знаходиться над водою, вдається отримати практично постійну дугу з виділенням плазми.

Важливу роль в характері розрядів грає склад електроліту. В ході експерименту були випробувані різні розчини. Були випробувані сода і сіль, розчинені в дистильованій воді. Найкращого ефекту вдалося досягти при використанні розчину солі. Були випробувані різні концентрації солі-35 грам / л і 70 грам / л. При більшій концентрації розряди відбуваються сильніше. Крім цього, змінювалося відстань катода до електрода, однак не було виявлено залежності характеру розрядів від відстані між електродами, ключову роль відіграє провідність електроліту.

Також були випробувані аноди різної геометрії і матеріалів (мал.2.5.4)



Мал.2.5.4. Приклади анодів різної геометрії, що використовувалися у експерименті

Однак кореляції між геометрією, матеріалом анода і характером розрядів виявлено не було. Ключову роль відіграє геометрія катода.

Також була заміряна температура в області розряду при різній частоті і шпаруватості, проте підвищення температури не перевищувало 1 градуса, що може бути похибкою, тому при даній потужності установки і розрядів можна не враховувати температурний фактор.

3. Постановка експерименту

В результаті дослідження теоретичного матеріалу і аналізу попередньої дипломної роботи було встановлено, що силова установка повинна мати більшу потужність і мати можливість точного регулювання характеру імпульсів. В ході пошуку можливих схем і аналізу ринку, для експериментів був придбаний високовольтний генератор з можливістю модуляції частоти. Доставлено пристрій було в розібраному вигляді і він потребував самостійної збірки. Даний генератор дозволяє отримувати електродугові розряди з напругою до 20 кВ і регулювати характер розрядів з високою точністю, використовуючи телефон, аудіо програвач, персональний комп'ютер або будь-який інший звуковий генератор частот, що дозволяє навіть відтворювати будь-які аудіо файли за допомогою електродугового розряду. Експериментальна установка складається з таких основних частин і зображена на мал.3.1:

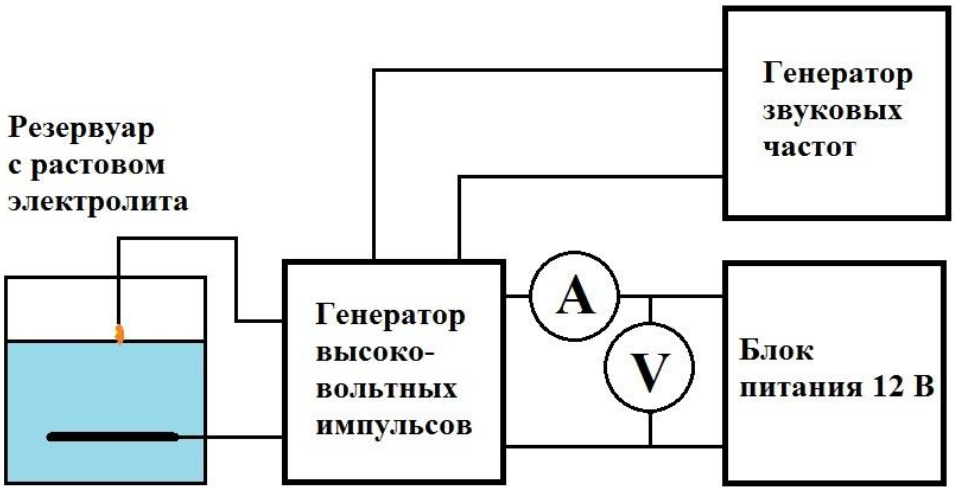
1) Блок живлення на 12 В потужністю вище 100 Вт

2) Генератор звукових частот

3) Генератор високовольтних імпульсів

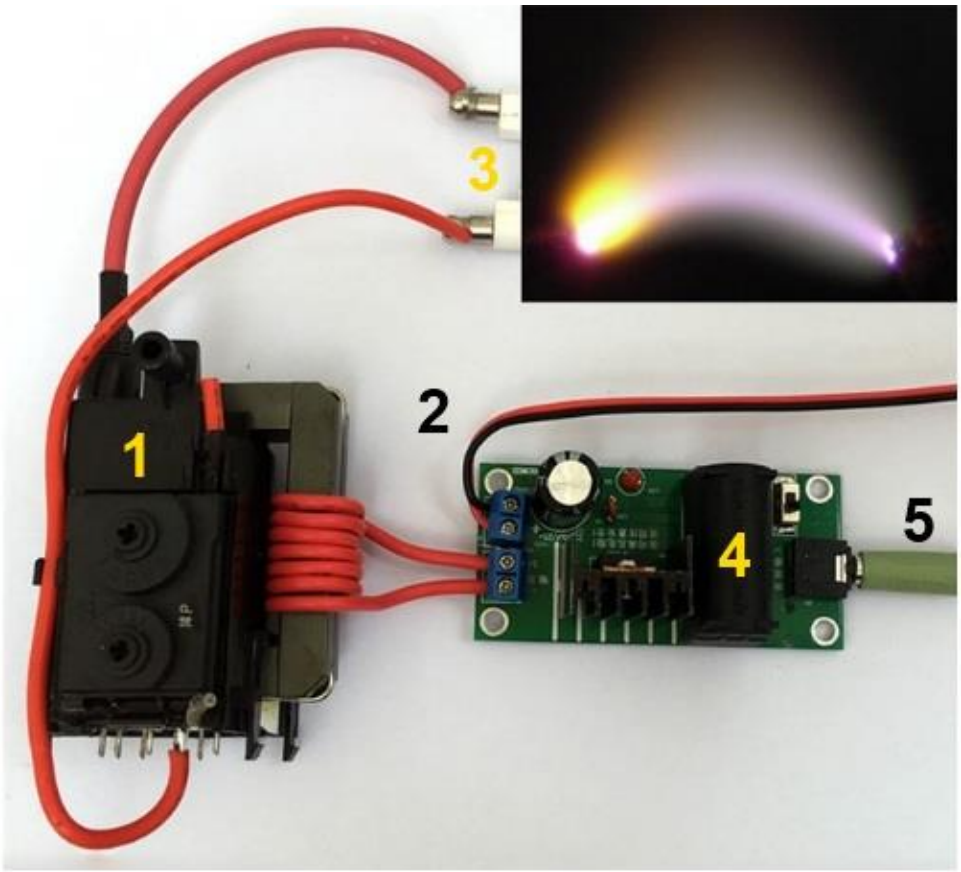
4) Резервуар з розчином електроліту

5) Система подачі електричних розрядів



Мал.3.1. Загальна схема експериментальної установки

Основні компоненти високовольтного генератору зображені на мал.3.2.



Мал. 3.2 Загальна схема високовольтного генератору

- 1 Високовольтна котушка

- 2 Живлення 12В, 5А постійний струм

- 3 Розрядник

- 4 Мікросхема

- 5 Аудіо вхід для подачі звукових сигналів

Тепер зупинимося більш детально на складових генератора.

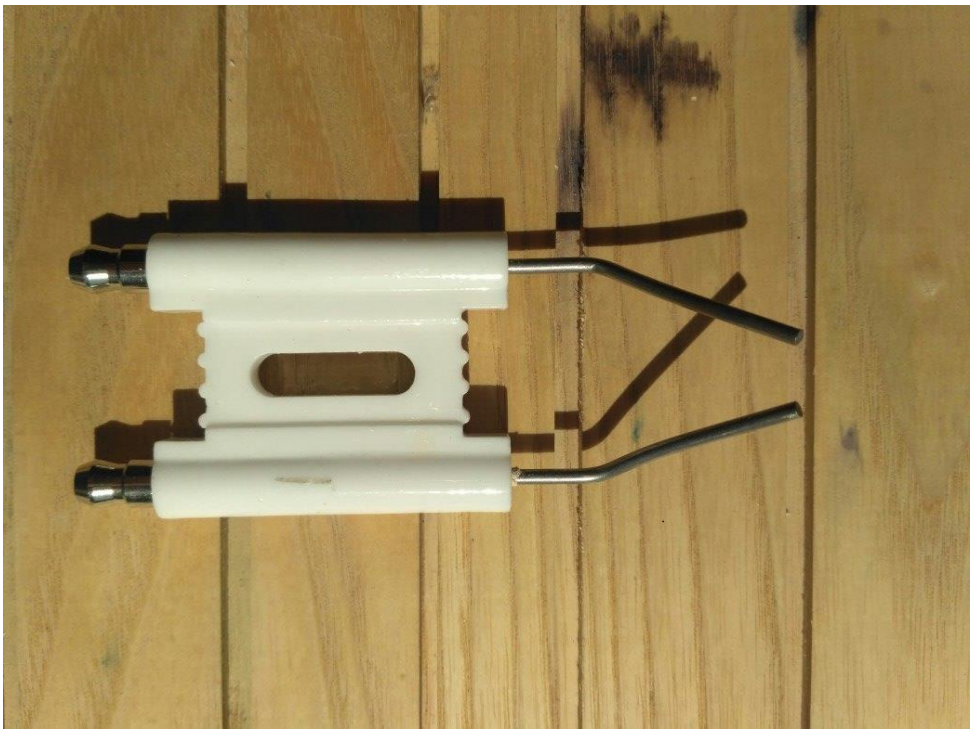
У генераторі використана високовольтна котушка BSC25-T1057A з потужністю 60 Вт і робочою температурою 30-75^{O} С.

В якості джерела живлення підходить будь-який блок постійного живлення на 12 В, потужністю 100 Вт і вище. В експерименті використовувався блок живлення від комп'ютера на 180 Вт (мал.3.3).



Мал.3.3. Блок живлення на 12 В

У комплект постачання входив розрядник в керамічній ізоляції (мал.3.4.)

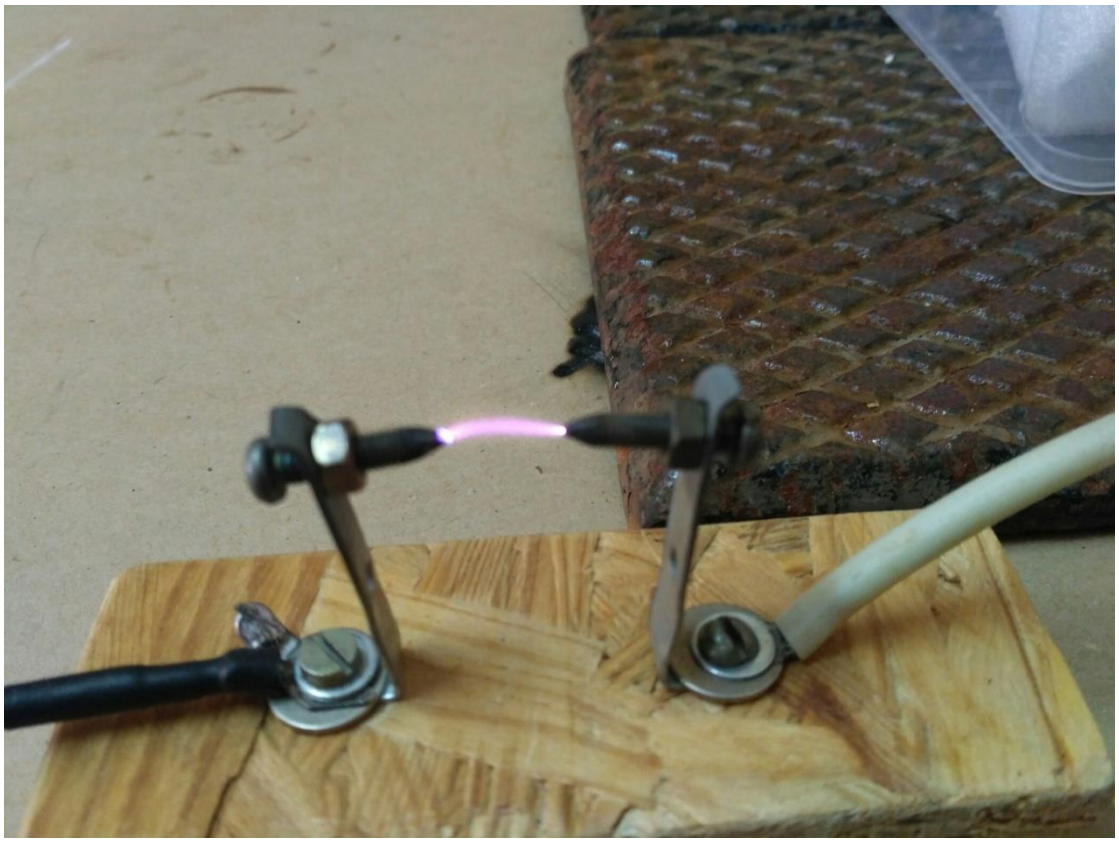


Мал. 3.4. Розрядник в керамічній ізоляції

Крім розрядника, що входить в комплект були випробувані і інші типи (мал.3.5). В ході експериментів було визначено, що ці розрядники не підходять для досліджень високовольтних розрядів у водних розчинах.

Були розроблені розрядники, в яких один контакт занурювався в рідке середовище, а інший розміщувався зовні на деякій відстані від водного розчину (мал. 3.6). В якості резервуара для розчину електроліту використовувався пластиковий контейнер.

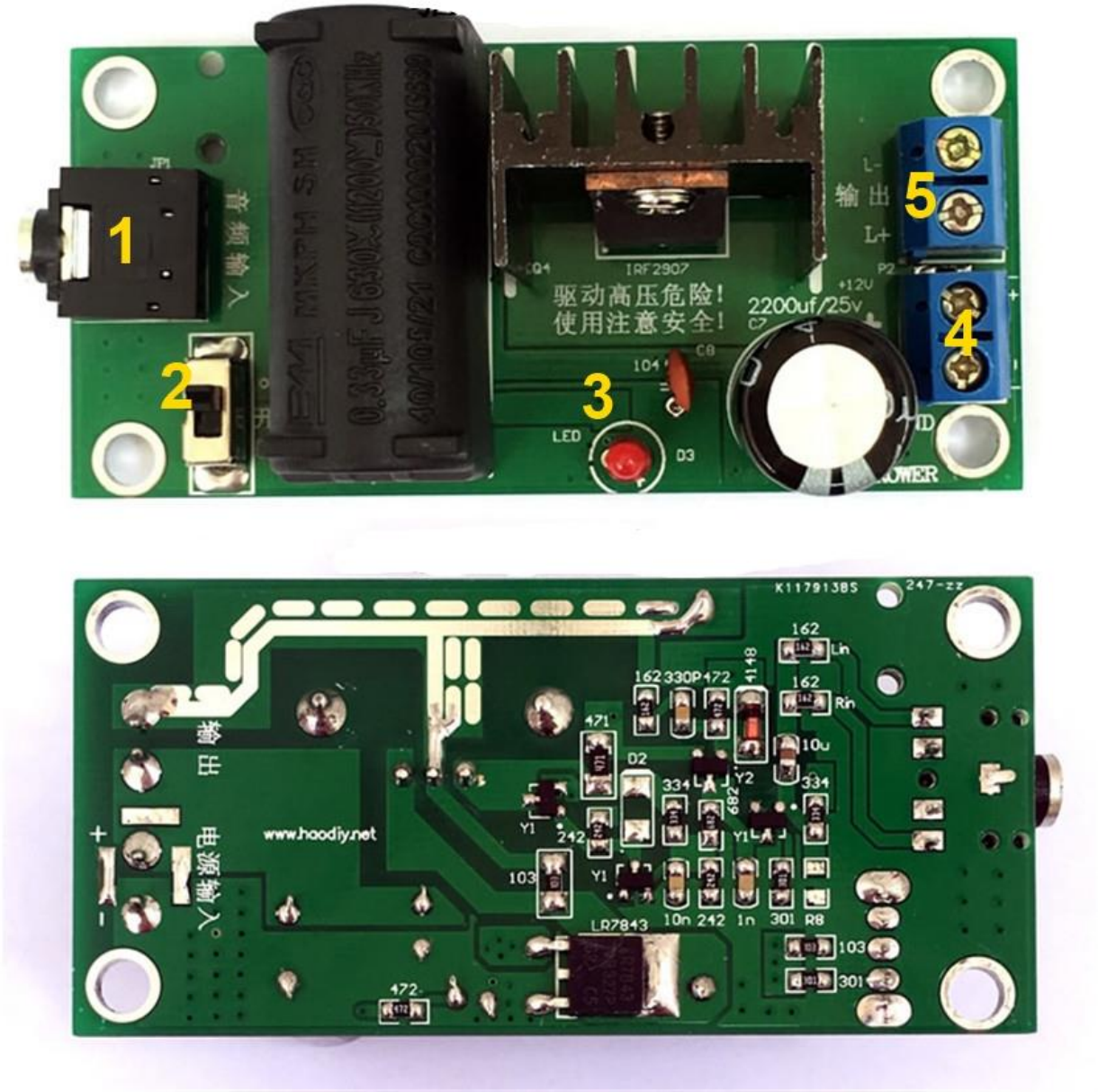
Робоча плата високовольтного генератора зображена на мал.3.7.



Мал. 3.5. Один з видів розрядників у робочому стані



Мал. 3.6. Система подачі високовольтных імпульсів



Мал. 3.7 Загальний план мікросхеми високовольтного генератора з лицьової і тильної сторони

1 - Аудіо вхід AUX 3.5 мм

2 - Вимикач живлення

3 - Індикатор живлення

4 - Контакти живлення постійним струмом 12 В

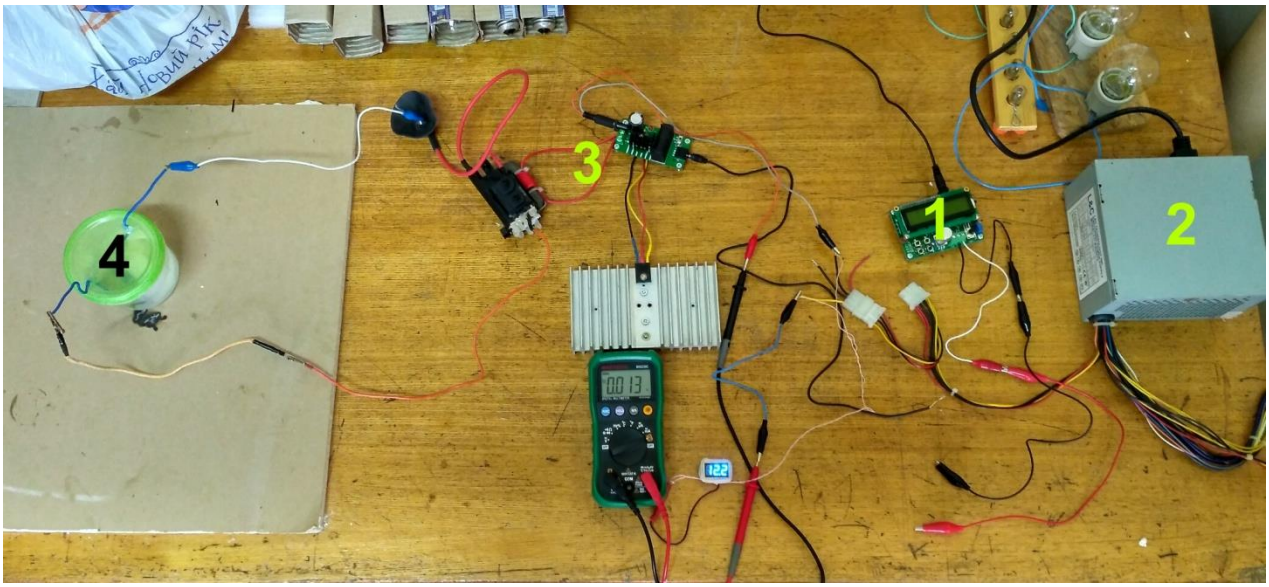
5 - Вихід на котушку

Для генерації звукових частот використовувався цифровий генератор з можливістю регулювання амплітуди і частоти хвиль в діапазоні від 0 до 50 кГц (мал.3.8).



Мал. 3.8. Генератор електромагнітних імпульсів

В якості вимірювальної апаратури використовувалися вольтметр, амперметр і оптичний спектрометр. Загальний вигляд установки зображено на мал. 3.9.



Мал. 3.9. Загальний вигляд експериментального стенду

1 - Генератор звукових частот

2 - Блок живлення 12 В

3 - Високовольтний генератор

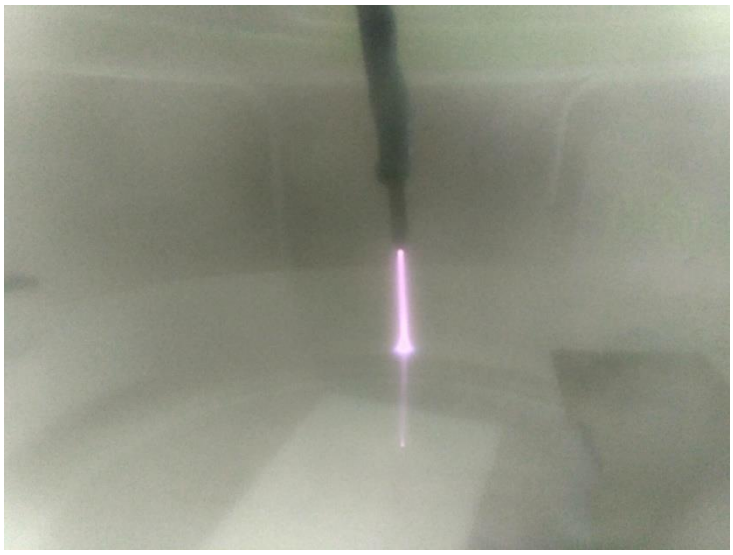
4 - Резервуар з водним розчином і системою подачі високовольтних імпульсів

4. Результати експериментів

В ході проведення експериментів з керованими високовольтними розрядами джерелом прямокутних електромагнітних імпульсів високої напруги в області частот 50-51 кГц служив високовольтний генератор з трансформатором високої напруги, який підключалися до комп'ютерного блоку живлення потужністю до 200 Вт. Джерелом керованого модульованого сигналу в різних діапазонах частот служив цифровий генератор. Вивчалися частоти від 10 Гц і до 50 кГц. Виміри проводилися послідовно в декількох інтервалах:

- 10 - 100 Гц (шаг 5 Гц),
- 100 -1000 Гц (шаг 50 Гц),
- 1000 - 7000 Гц (шаг 200 Гц),
- 5 кГц - 40 кГц (шаг 0,5 кГц)
- 30 кГц – 50 кГц (шаг 0.2 кГц).

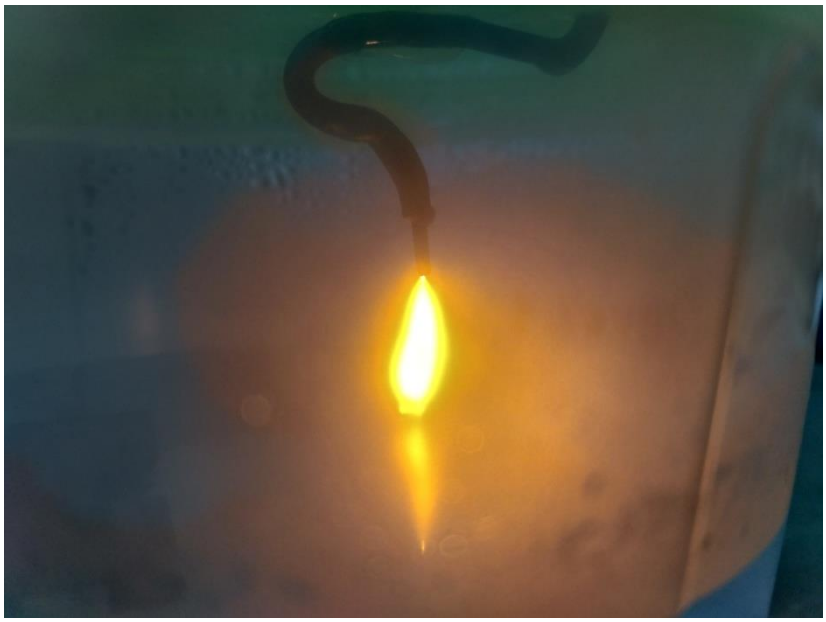
При включенні експериментальної установки відбувався електричний розряд між анодом, розташованим над поверхнею водного розчину (5-15 мм) і рідиною, в яку занурений катод (мал.4.1). При цьому використовувався слабо солений розчин чистої води, без додаткових хімічних домішок.



Мал.4.1. Початковий вигляд електричної дуги при розряді в воду

Як було встановлено, практично в кожному діапазоні частот електричний розряд супроводжується яскравим горінням області входження розряду в воду з великим виділенням теплової енергії (мал.4.2). Крім того, у воді під розрядом відбувається інтенсивне виділення бульбашок газу (мал.4.3), що свідчило про розкладання молекул води на кисень і водень. Стабільне горіння поверхневої області розряду без загасання відбувається на частотах 31-34 кГц. На цих частотах електрична дуга дещо змінює свій характер, вигинаючись вгору, а на частоті близько 33,3 кГц було зафіксовано найяскравіше горіння, максимум сили струму і споживаної потужності.

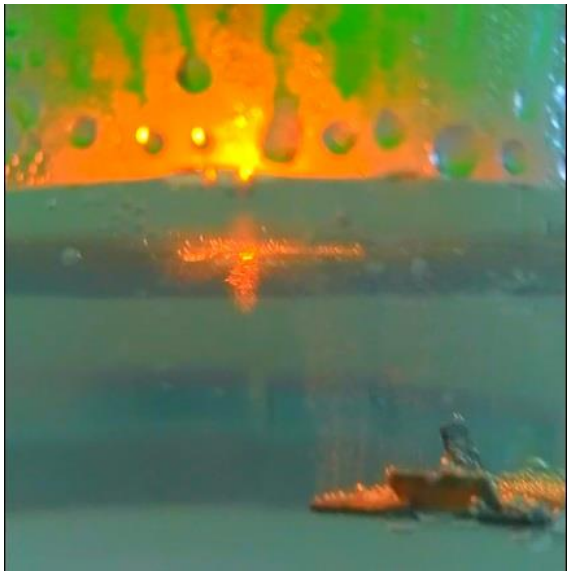
При підвищенні частоти вище 30 кГц відбувається досить різке збільшення сили струму (від 3 до 4,7 А в точці максимуму на частоті 33.3 кГц). Крім цього, на деяких частотах (наприклад, на 32,4 кГц і 33,5 кГц), показники амперметра мають нестабільний характер і сильно коливаються. Даний результат свідчить про резонансний характер даної області частот для досліджуваного розчину.



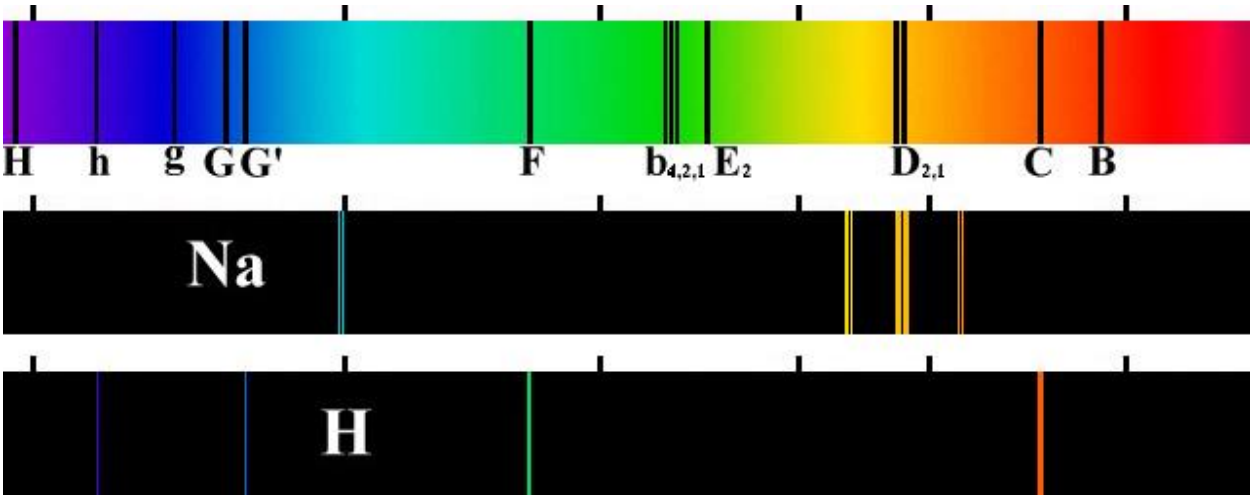
Мак. 4.2. Дуговий розряд, що супроводжується горінням водню

В ході експерименту з використанням оптичного спектроскопа в спектрі електричного розряду були виявлені яскраві лінії водню і натрію, що свідчило про горіння цих елементів в поверхневій області розчину під дією електричної дуги (мал.4.4).

Крім того, після тривалих електричних розрядів в розчині були виявлені опади білого кольору, імовірно оксиду натрію (мал.4.5).



Мал.4.3. Виділення бульбашок в області розряду

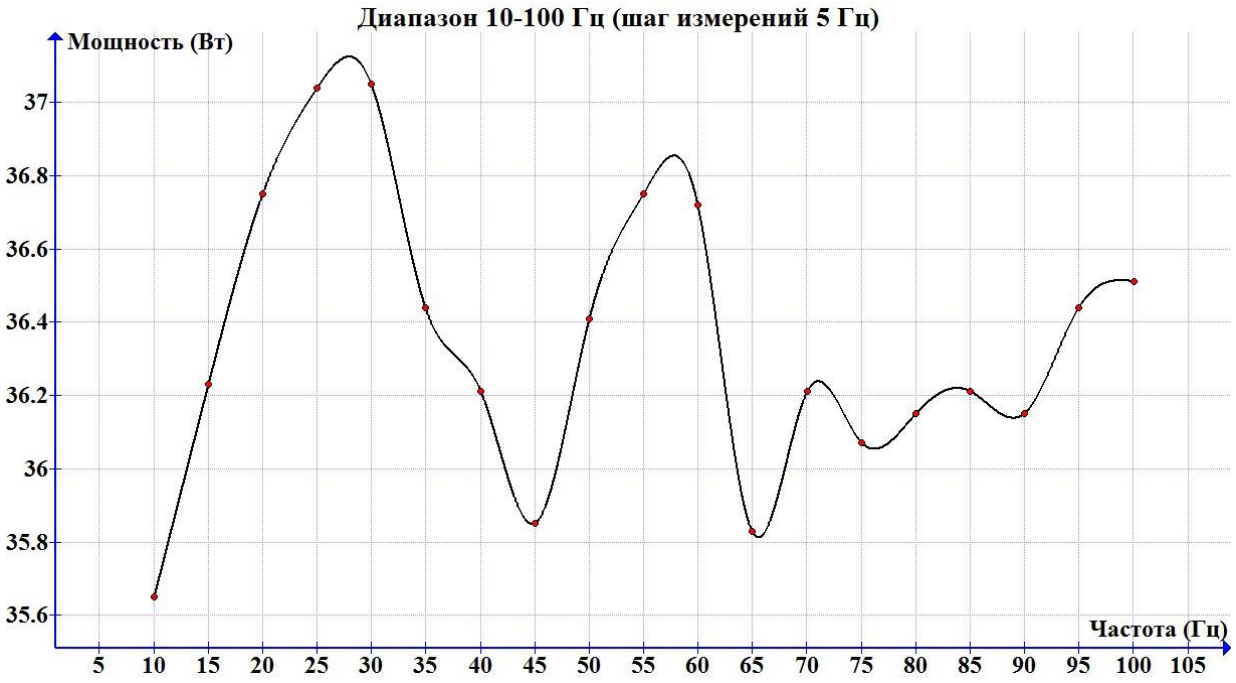


Мал.4.4. Спектральні лінії водню та натрію, що виявлені у експерименті

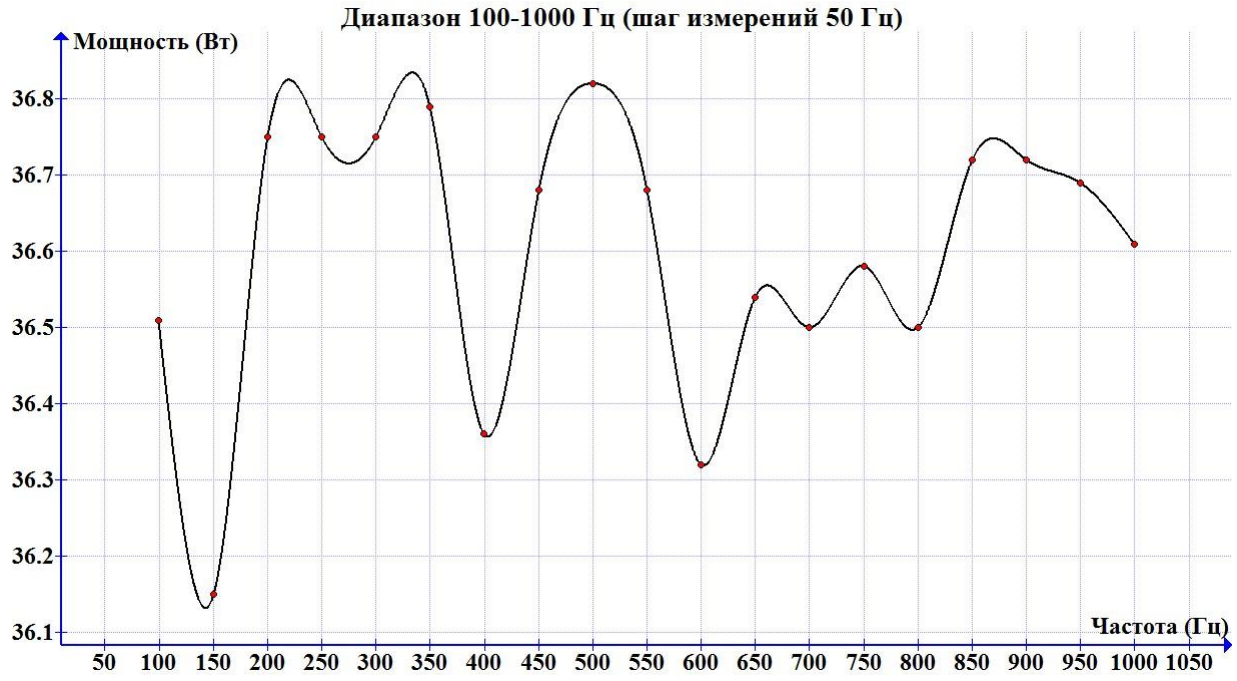


Мал.4.5. Осад, що виявлений у резервуарі після закінчення серії розрядів

За підсумками експериментів були побудовані графіки залежності електричної потужності, споживаної високовольтним генератором, від модулюючої частоти імпульсів, які представлені на мал. 4.6- 4.9.



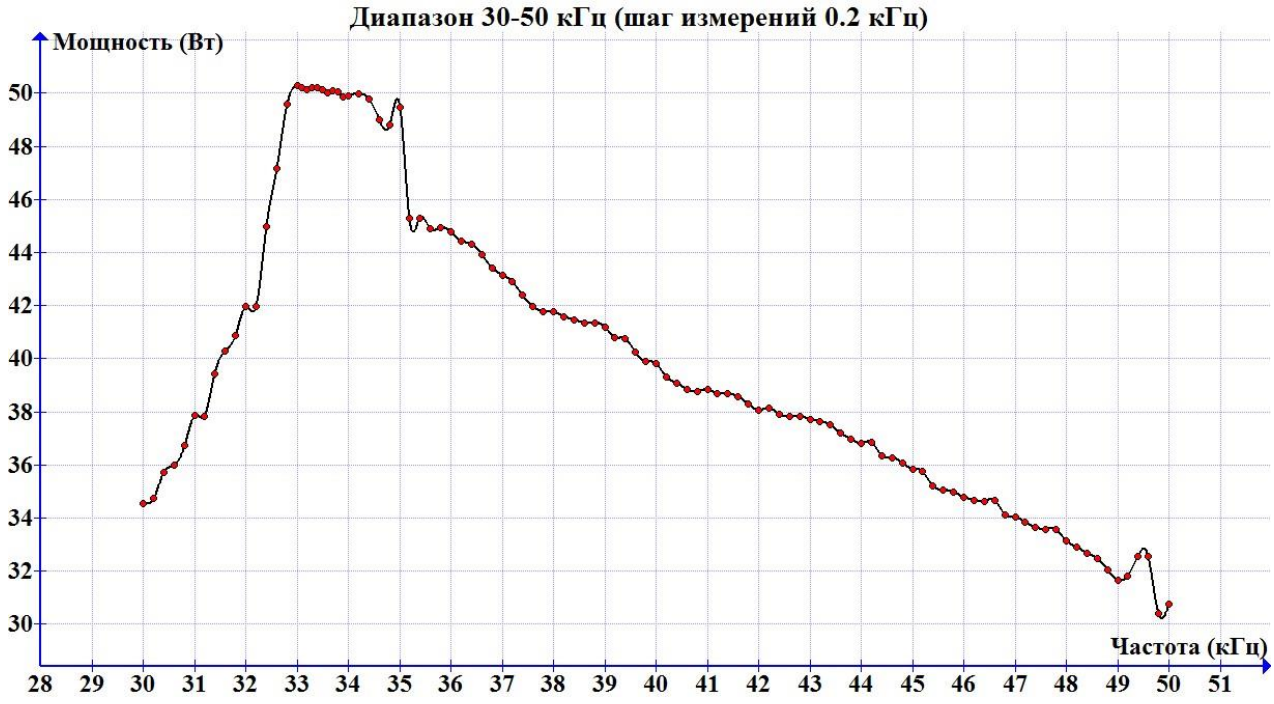
Мал.4.6. Залежніть потужності від частоти у діапазоні 10-100 Гц



Мал.4.7. Залежніть потужності від частоти у діапазоні 100-1000 Гц

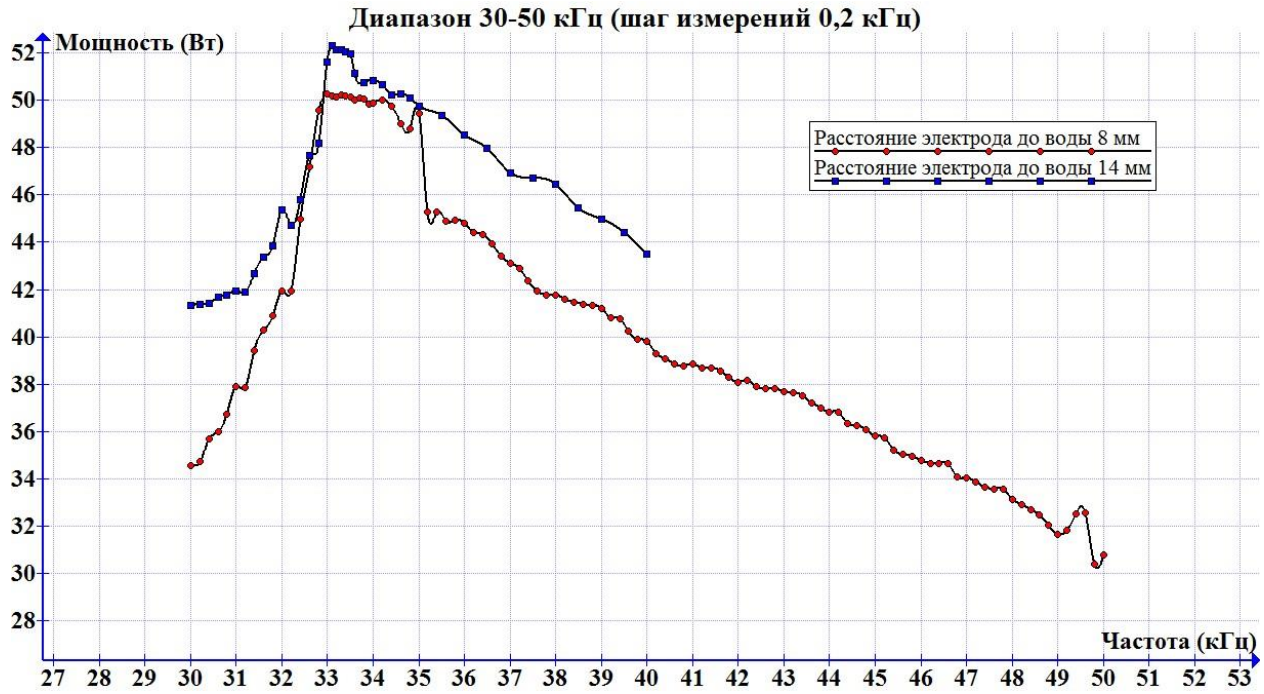


Мал.4.8. Залежніть потужності від частоти у діапазоні 5-40 кГц



Мал.4.9. Залежніть потужності від частоти у діапазоні 30-50 кГц

На мал. 4.10 представлені графіки залежності електричної потужності, споживаної установкою, від модулюючої частоти при різних відстанях від верхнього електрода до поверхні рідини.



Мал.4.10. Порівняння залежності потужності від частоти у діапазоні 30-50 кГц при різних відстанях анода до поверхні розчину

Як видно з мал.4.10. резонансний характер взаємодії електричної дуги з рідиною відбувається в одній і тій же області частот, що свідчить про незалежність ефекту від довжини іскрового проміжку і може бути пов'язано з фундаментальними властивостями досліджуваного речовини.

5. Висновки

У даній дипломній роботі виконано детальний аналіз науково-технічної літератури в області електродугового розряду, узагальнені результати попередньої дипломної роботи.

В ході виконання дипломного проекту були придбані комплектуючі, розроблена і зібрана оригінальна експериментальна установка, яка включала в себе генератор високовольтних імпульсів, цифровий генератор керуючих імпульсів, блок живлення, електролізер і контрольно-вимірювальну апаратуру.

В результаті проведених експериментів були вивчені особливості електродугового розряду в підсолену воду в залежності від частоти модулюючого сигналу та визначена резонансна частота взаємодії дуги з даними водним розчином.

За підсумками експериментів були побудовані графіки залежності електричної потужності, споживаної високовольтним генератором, від частоти імпульсів при різній висоті електроду до водного розчину.

З використанням оптичного спектроскопа в спектрі електричного розряду були виявлені яскраві лінії водню і натрію, що свідчило про горіння цих елементів в поверхневій області розчину під дією електричної дуги

Таким чином, в даній дипломній роботі отримані базові дані для подальших досліджень застосування ефекту в альтернативній енергетиці, водневих установках і перспективних екологічно чистих двигунах, що працюють на воді або соляних розчинах.

6. Список використаних джерел

1) Райзер Ю.П. Физика газового разряда - Изд. 2-е, доп. и перераб. - М.: Наука, 1992. - 536 с.

2) Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности/ Машиностроение, Ленинград, 1986. – 253 с.

3) Князев Б.А. Низкотемпературная плазма и газовый разряд – Новосибирск 2000

4) *Г. Плантэ*. Электрические явления в атмосфере. – СПб., типография Безобразова и Ко, 1891.

5) Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток.– М.:Наука, 1971.– 544 с.

6) Энгель А. Ионизованные газы: Пер с англ./ Под ред. Иоффе М.С.– М.:Физматгиз, 1959.– 221 с.

7) Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов.-М.: Наука, 1980

8) Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда: Пер. с англ. – М.:Атомиздат, 1980

9) Райзер Ю.П. Оптические разряды: Обзор // Усп.физ.наук.– 1980.–Т.132.– С.549

10) Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда – Госатомиздат, 1961, 342 с.

11) Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде – Новосибирск, Наука, 1982, 256 с.

12) Абрамович Л.Ю., Клярфельд Б.Н., Настич Ю.Н. Сверхплотный тлеющий разряд с полым катодом // ЖТФ – 1966. – 36, №4, с. 714-719

13) Гвоздецкий В.И., Зражевский В.А. Численное решение уравнения баланса столба цилиндри- ческой дуги // Автоматическая сварка. 1975. № 6.

14) Ленивкин В.М., Мечев В.С., Семенов В.Ф. Двухтемпературная модель столба сварочной ду- ги // Автоматическая сварка. 1990. № 6.

15) Пентегов И.В. Математическая модель столба динамической электрической дуги // Автома- тическая сварка. 1976. № 6. С. 8–12.

16) Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.

17) Шельгазе М. Математическая модель переходных процессов в сварочной дуге и ее исследо- вания // Автоматическая сварка. 1971. № 7.

18) Немова Т.Н., Степанов А.П. Вихревой механизм возбуждения электрической сварочной ду- ги // Сварочное производство. 2008. № 6.

19) Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.