

О.О. Пузанов

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна
E-mail: s5sk@ire.kharkov.ua

Застосування факельного розряду і парогенератора для шоопування поверхонь матеріалів

Предмет і мета роботи. Розглянуто метод шоопування матеріалів з використанням високочастотного факельного розряду (ВЧФР) і парів гліцерину як основи для розчинених у ньому активуючих добавок до робочого газу. Для розв'язання цієї задачі запропоновано використовувати парогенератор (ПГ), що дозволить збільшити каталітичні характеристики ВЧФР при активації різних поверхонь і нанесенні на них покриттів. Мета роботи – розроблення методу розрахунку ПГ, який дозволяє створити необхідне газове середовище в області горіння ВЧФР. Указаний метод розрахунку націлений на підвищення ефективності роботи автономного ПГ з урахуванням малості його розмірів у порівнянні з довжиною хвилі.

Методи і методологія роботи. Аналіз поведінки парів гліцерину в плазмі ВЧФР ґрунтується на відомих даних про потенціал іонізації молекули гліцерину в результаті електронного удару. Для з'ясування ступеня впливу парів гліцерину на струм ВЧФР використано відоме значення потенціалу іонізації кальцію як реперної точки. Розроблений метод розрахунку нагрівальних елементів ПГ ґрунтується на поняттях, що використовуються для теплових розрахунків електронагрівальних установок. У формулах для розрахунку відносного часу роботи ПГ з різними нагрівальними елементами і потужностями використано співвідношення з теорії гальванічних елементів живлення.

Результати роботи. Показано, що пари гліцерину без добавок не впливають на струм ВЧФР. Для збудження ВЧФР обрано СВЧ-діапазон. Сумісно з дією каталізуючих добавок, які вносяться в плазму розряду, це додатково підвищує струм ВЧФР. У такому випадку каталітичні властивості ВЧФР залежать не тільки від потужності ВЧФР і частоти електромагнітного поля, що його збуджує, але й від добавок, які розчинені в гліцерині. Розроблено оригінальний метод розрахунку нагрівального елемента малогабаритного ПГ. Для виготовлення його нагрівача складено довідкові таблиці, які дозволяють обрати необхідні діаметр і кількість паралельно з'єднаних дрітків спіралі.

Висновок. Показано можливість використання парів гліцерину як основи пароподібних флюсів і активуючих добавок до робочого газу ВЧФР. Розроблений метод розрахунку нагрівального елемента ПГ дає можливість оптимізувати його нагрівальне коло, а саме: а) збільшити пароутворення і зменшити енерговитрати при живленні ПГ від гальванічного елемента; б) зробити можливим застосування нагрівальних спіралей з нержавіючої сталі для роботи в режимі автоматичного регулювання температури. Іл. 2. Табл. 5. Бібліогр.: 34 назв.

Ключові слова: факельний розряд, газорозрядна плазма, пароподібні флюси, активація поверхонь, нанесення покриттів, парогенератор, опір багатодітних спіралей, поверхнева потужність.

У 1910 році М. Шооп описав нанесення покриттів для протикорозійного захисту металевих виробів за допомогою розпилення свинцю [1]. Цей метод отримав назву шоопування, за ім'ям винахідника. Розпорошуючи свинець за допомогою стаціонарної тигельної установки, М. Шооп одержував покриття на різних матеріалах перенесенням рідкого свинцю водяною парою [2].

На цей час підвищений інтерес викликає оброблення поверхонь і нанесення на них покриттів за допомогою високочастотного факельного розряду (ВЧФР) [3–8].

Під час напилення з використанням ВЧФР перенесення мікрочастинок речовини, що напилюється, робить плазма розряду. При цьому, однак, може виникнути необхідність привнести в зону горіння певного роду речовини –

пароподібні флюси або активуючі добавки, які підвищують каталітичні властивості ВЧФР. Останні дозволяють збільшити кількість вільних електронів у плазмі, а отже, і струм розряду.

Використана у технології М. Шоопа водяна пара в якості переносника названих речовин для ВЧФР не придатна, бо є плазмопригнічувальною добавкою з високою теплоємністю і виразними електронегативними властивостями – здатністю атома в молекулі набувати негативний заряд (притягувати електрон). Тому молекули води викликають істотне зниження концентрації електронів у плазмі розряду і збільшують коефіцієнт згасання електромагнітної хвилі – власне, завдяки якій і підтримується горіння розряду. З цього випливає, що в середовищі водяної пари виділення енергії розрядом неприйнятно зменшується.

Для створення в області горіння ВЧФР необхідних для указаних цілей газоподібних середовищ нами пропонується помістити поблизу області зародження ВЧФР малогабаритний парогенератор (ПГ) з автономним живленням.

Вимоги щодо малогабаритності та автономності ПГ пов'язані з необхідністю усунути вплив його металевих деталей і проводів живлення на електромагнітні процеси в безпосередній близькості від розряду і однопровідної лінії, на кінці якої він збуджений. Тому стає актуальною розробка методики розрахунку параметрів ПГ, яка дозволить досягти його високої ефективності при малих габаритах пристрою (збільшити пароутворення і зменшити енерговитрати під час живлення від гальванічного елемента). До того ж найбільш доцільно використовувати нагрівальні спіралі з нержавіючої сталі, котра володіє достатньо високим температурним коефіцієнтом опору. Такі спіралі дозволяють жити ПГ у режимі автоматичного регулювання температури. Це виключає перегрівання випаровуваного активуючого розчину або потрапляння до пари включень з перегорілої органіки гноту. Очевидно, основа пароутворюючої речовини, яка містить необхідні добавки, має створювати достатньо велику кількість пару і, на відміну від води, бути горючою. На наш погляд, в якості такої речовини, зокрема, може бути використано гліцерин.

Метою цієї роботи є: розроблення підходів до розвитку методу шоопування з використан-

ням збуджуваного в повітрі ВЧФР і гліцерину як основи для активуючих добавок до робочого газу, що випаровується; аналіз особливостей, які належить враховувати при виборі типу нагрівальних елементів, розрахунку нагрівача і потужності, що споживається ПГ. Зокрема, проаналізовано:

а) можливі шляхи збільшення площі поверхні й опору нагрівачів при використанні багатодротових спіралей (БДС), співставлення їх властивостей зі спіраллю однодротовою;

б) методику порівняльного розрахунку часу роботи ПГ від одного акумулятора під час роботи на різних потужностях і з нагрівальними спіралями різного опору;

в) залежність відносного часу роботи ПГ для БДС, які порівнюються, від діаметрів і питомих опорів їх провідників при заданому відношенні поверхневих потужностей (без необхідності завдання опорів спіралей і потужностей, що подаються).

1. Використання парів активуючих або флюсоутворюючих добавок до робочого газу (повітря) для газоплазмової активації поверхонь матеріалів або нанесення на них покриттів. У роботі [14] зазначено, що під час переробки речовин і нанесення на них покриттів газовий розряд має переваги перед плазмовим струменем. Розряду притаманна більш висока температура плазми і менший осьовий градієнт, а електричні поля і підвищена концентрація електронів у розрядній зоні надають плазмі додаткові каталітичні властивості.

У роботі [9] повідомляється, що під впливом електричних розрядів на матеріали може бути здійснена активація поверхонь структур, які включають як органічні, так і неорганічні компоненти. Причому такі структури можуть істотно відрізнятися за електричними, хімічними, механічними властивостями і температурною стійкістю.

Високий ступінь енергетичної віддачі, малі втрати енергії на нагрів газу та об'єкта обробки дозволяють ефективно застосовувати низькотемпературний нерівноважний ВЧФР до матеріалів з жорсткими обмеженнями до хімічних та температурних впливів. При цьому утворення хімічно активних продуктів відбувається завдяки істотній відмінності електронної та іонної температур розряду.

У роботі [10] також відзначається, що плазмовий нагрів дозволяє «більш гнучко керувати хімічними процесами і більш активно впливати на фізико-хімічні властивості цільових продуктів. Плазма ВЧ-одноелектродно-ємнісних розрядів, яка відрізняється нерівноважністю, може бути використана для реалізації реакції з високими пороговими енергіями та інтенсифікації хімічних процесів, що протікають в плазмі. <...> Збільшення нерівноважності плазми в ряді випадків досягається при її амплітудній модуляції. В амплітудно-модульованій плазмі при однаковій потужності розряду, але різних глибинах модуляції, разом із збільшенням середньої енергії електронів помітно зростає інтенсивність хімічних процесів зі збільшенням швидкості виходу цільового продукту». У цитованій роботі наводиться приклад отримання діоксиду титану та діоксиду цирконію. Аналіз створених за допомогою ВЧФР матеріалів показав, що за низкою своїх властивостей, зокрема, щодо відсутності домішок, вони перевершують аналогічні матеріали, отримані за традиційною технологією.

Ще більше підвищити ефективність використання ВЧФР можна шляхом додавання до плазми розряду спеціальних каталізуючих добавок.

Горінню факельного розряду в різних середовищах присвячено низку робіт [11–14].

Проведені вимірювання [13, 14] показали, що при запиленні ВЧФР такими речовинами, як Al_2O_3 , Na_2SO_3 , $Ca(CH_3COO)_2$, з дисперсністю від 20 до 60 мкм, спостерігається зростання високочастотного струму в розряді. Водночас встановлено, що при запиленні розряду речовинами, які мають потенціал іонізації більший, ніж потенціал іонізації кальцію, зміна характеристик розряду не спостерігається.

Пояснюється це тим, що кальцій знаходиться в ряду елементів, які володіють найменшим потенціалом іонізації атома. Окрім кальцію в ряд таких елементів входять калій, натрій, барій, літій, алюміній та ін. Тому для підвищення стійкості електричного розряду названі речовини часто вводять в зону горіння [15]. Завдяки їх включенню збільшується кількість вільних електронів, зростає струм розряду і, як наслідок, підвищуються каталітичні властивості ВЧФР. Ці ж речовини використовуються як електродні покриття або флюси.

Отже, набувають актуальності дослідження з газоплазмової активації поверхонь або нанесення на них покриттів з використанням парів різних речовин як добавок до робочого газу. Зокрема, гліцерину в розчинах з інгібіторами корозії, борметіловим або боретіловим ефіром, каталізаторами хімічних реакцій та речовинами-розчинниками для видалення продуктів реакції (реактивно-флюсовий метод), хлоридом амонію, лужними елементами, лимонною кислотою та ін. з числа названих вище [16, 17]. Однак для чистоти експериментів, передусім, важливо мати уявлення про поведінку молекули гліцерину під впливом електронного удару.

Взаємодії електронних пучків і нерівноважної газорозрядної плазми з гліцирином присвячено роботу [18]. Гліцерин ($C_3H_8O_3$) є триатомним спиртом. Внаслідок присутності в його молекулі трьох гідроксильних груп (ОН) її фрагментація під дією електронного удару призводить до появи трьох рядів похідних. Моно- та ді-похідні можуть існувати у вигляді двох структурних ізомерів, а похідні типу $CH_2XC-NOHCH_2OH$ або CH_2XCXCH_2OH – у вигляді оптичних ізомерів [18]. Такий процес фрагментації молекули гліцерину має місце в низькотемпературній і, особливо, нерівноважній газорозрядній плазмі.

У роботі [18] також відзначається, що особливістю мас-спектрів аліфатичних спиртів і, зокрема, гліцерину, є надзвичайно низька інтенсивність піку молекулярного іона $C_3H_8O_3^+$. У зв'язку з цим варто зазначити, що коефіцієнти дисоціативної рекомбінації істотно залежать від сорту іонів. З цієї причини швидкість об'ємної загибелі зарядів змінюється з іонним складом плазми. Зокрема, зникнення молекулярних іонів призводить до зменшення швидкості рекомбінації впритул до декількох порядків величини [19].

Основний напрямок фрагментації молекули гліцерину полягає в розриві зв'язків вуглеводного каркасу з утворенням іонів оксонієвого типу. Високу питому глибину фрагментації вихідної молекули підтверджує утворення фрагментів малих мас і нехтовно мала інтенсивність молекулярного іона в мас-спектрі.

Виміряні авторами роботи [18] температурні залежності виникнення іонів – фрагментів молекули гліцерину підтвердили вплив на

процес дисоціативної іонізації температурної деструкції.

Значення енергій іонізації і появи іонів – фрагментів молекули гліцерину $C_3H_8O_3$ [20], отримані методом електронного удару за допомогою монопольного мас-спектрометра, наведено в роботі [18]. Наймасивнішим, нехтовно малої інтенсивності в мас-спектрі, є іон $C_3H_8O_3^+$ материнської молекули. Потенціал її іонізації складає 10,07 еВ і помітно перевищує потенціал іонізації кальцію – 6,11 еВ [21]. Ця обставина свідчить про те, що пари гліцерину як добавка до плазموутворюючого газу (повітря) самі по собі не мають чинити вплив на струм розряду. Тому пари гліцерину можуть бути використані тільки як основа для створення спеціального газового середовища, яке містить флюсоутворюючі або каталізуючі добавки.

На початку нами передбачається використовувати водні розчини гліцерину концентрації 90...95 %. Незначна домішка води необхідна для надання розчину достатньої текучості та полегшення його доставки по капілярах гноту до випарника. Властивості цих розчинів істотно залежать навіть від малих змін співвідношення гліцерину й води. Тому в подальшому можна очікувати, що зміна концентрації названих вище добавок надасть можливість керувати процесом осадження і якість отримуваних покриттів.

Як зазначено в роботі [19], «багато які експериментальні дані свідчать про те, що при мікрохвильовому збудженні може бути отримана плазма з середньою енергією електронів більш високою, ніж в розряді постійного струму або низької частоти». Отже, збудження розряду доцільно здійснювати електромагнітними коливаннями НВЧ-діапазону.

Також важливо зауважити, що в молекулярних газах, у порівнянні з атомарними, зростає ефективність передачі енергії від електронів до важких частинок. Навіть незначні добавки молекулярного газу до атомарного значно (до 2-3 разів) підвищують температуру ВЧФР. В атмосфері температура дифузійної оболонки ВЧФР складає 2 200...2 500 К [13].

Отже, є підстави припускати, що використання робочого газу, утвореного сумішшю повітря, парів гліцерину та активуючих речовин, дозволить сполучати в одному технологічному

процесі фазові й хімічні перетворення для отримання необхідних характеристик порошків та покриттів, що напиляються, під впливом ВЧФР на різні матеріали [22, 23].

Розроблення необхідного для описаних цілей малогабаритного ПГ з урахуванням вимог до його автономності, малогабаритності та ефективності використання потребує проведення всебічного аналізу його нагрівального кола, чому й присвячено викладений нижче матеріал.

2. Оптимізація площі поверхні та опору нагрівальної спіралі. У ПГ, що розглядається, доцільно застосовувати багатодотові нагрівальні спіралі. Використовувані для їх виготовлення провідники, які утворені необхідним числом дровів, дозволяють змінювати площі поверхні та опори спіралей в широких межах. Це надає можливість керувати кількістю отриманого пару й обмежити струм, що споживається, значенням, допустимим для джерела живлення. Сказане досягається вибором необхідних діаметра дровів та їх числа.

Традиційно багатодотові проводи використовуються для зменшення їх опору та збільшення площі поверхні. Це дозволяє підвищити гранично допустимі для них струми і, одночасно, надати проводу гнучкості. Так, площа поверхні одного циліндричного провідника зростає пропорційно його діаметру – πdL , а площа перерізу – як $\pi d^2/4$. Це означає, що площа поверхні, яка припадає на одиницю площі перерізу, меншає за законом $1/d$. Виходить, у звичайному збільшенні перерізу однодротового провідника, щоб уникнути перегрів при великих струмах, немає ані найменшого сенсу з точки зору економії матеріалу [24].

Тут розглядатиметься інший випадок. Адже, окрім сказаного, багатодотові проводи також дозволяють збільшити площу поверхні разом із підвищенням опору. Цю можливість, вельми корисну стосовно до нагрівальних елементів, часто не беруть до уваги.

У ПГ використання потрібного числа з'єднаних паралельно БДС дозволяє запобігти перевищенню гранично допустимого струму через нагрівач і притому збільшити швидкість випаровування.

Зокрема, підвищити швидкість випаровування можна за допомогою «плоских» спіралей,



a



б

Рис. 1. Нагрівальні спіралі зі збільшеною площею поверхні: *a* – з прямокутним перерізом центрального провідника і додатковим навиванням на нього дроту меншого діаметра; *б* – з декількох звитих дротів однакового діаметра

виготовлених з провідника прямокутного перерізу із щільно навитим зверху дротом більш тонким (рис. 1, *a*).

Проте використання конструкцій спіралей, подібних до зображених на рис. 1, *a*, не таке дієве, як спіралей, що звиті з декількох дротів однакового діаметра (рис. 1, *б*). Такі спіралі дозволяють змінювати свої параметри в дуже широких межах.

Для нашої мети кращі спіралі з щільно стисненими витками. Як показує досвід, в умовах нагріву витки провідника спіралі з щільно стисненими витками виявляються між собою ізольовані. Причиною цього є утворення на поверхнях дротів оксидної плівки високого опору, який зветься перехідним контактним опором

[25, 26]. Тому, незважаючи на стикання витків, струм протікає по спіралі уздовж її провідника, а не упоперек.

Методи розрахунку промислових ПГ, які описані у відомих монографіях (наприклад, [27]), виявляються не цілком придатні для створення приладу, що розглядається тут. Ці методи націлені на розробку куди більш складних пристроїв, призначених до використання в умовах серійного виробництва, на промислових підприємствах. До того ж кожний з подібних пристроїв має конкретне призначення, котре не відповідає нашим потребам. При всій своїй фундаментальності, ці роботи не дають відповіді на питання, які неминуче виникають при розробці значно більш простих ПГ: зокрема, як змінюються опір і площа поверхні випаровування при використанні спіралей, звитих з декількох дротів.

Незважаючи на удавану простоту визначення опору і площі поверхні випаровування, викладений нижче матеріал показує, що ця задача потребує проведення акуратного аналізу і має безліч далеко не очевидних розв'язків, кожен з яких відрізняється своїми перевагами і недоліками в різних випадках.

Збільшити опір нагрівача, передусім, виготовленого з нержавіючої сталі, може виявитися необхідним для того, щоб: *a*) зменшити струм, що споживається, і запобігти неприпустимого перегріву акумулятора (аж до вибуху); *б*) виготовити нагрівальну спіраль достатньо малої довжини, за якої забезпечується рівномірність випаровування зі всієї площі її поверхні. У зв'язку з пунктом «б» звернемо увагу на таку обставину. Мала довжина спіралі дозволяє виключити нестачу випаровуваного розчину в найбільш віддаленій від країв і сильніше розігрітій – центральній її частині. В іншому випадку в області пароутворення, тобто в збідній рідиною області випарника, може відбутися перегорання гноту, а відтак і спіралі. За тією ж причиною, а також для збільшення пароутворення слід віддати перевагу спіралям із щільно стислими витками.

Проте передусім збільшення пароутворення досягається за рахунок збільшення площі поверхні S нагрівача. Це дозволяє зменшити поверхневу потужність $\beta = P/S$ до прийнятної величини при великих потужностях P і запобігти

підгорянню гноту по всій довжині спіралі або навіть займання розчину, що його живить.

Використання в якості матеріалу спіралі нержавіючої сталі – з істотно більшим температурним коефіцієнтом опору [28], ніж ніхром або фехраль – табл. 1, дозволяє застосувати режим автоматичного регулювання температури. Передбачається спостереження за зміною опору нагрівача в залежності від ступеня його нагріву. Так стає можливим поставити потужність, що споживається, в залежність від необхідного температурного режиму, знизити витрати електрики в порівнянні з ручним регулюванням і захистити нагрівач. Цей метод широко застосовується в промислових електротермічних печах опору [29, с. 244; 30].

Таким чином, ґрунтуючись тільки на загальних положеннях, викладених у монографії [27], тут буде виконано аналіз, який дозволяє оцінити, у скільки разів БДС, що звіті з окремих провідників кількістю $n = \{2; 3; 4\}$, забезпечують збільшення електричного опору і площі поверхні у порівнянні зі спіраллю однодротовою. Буде розглянуто декілька випадків, з необхідністю аналізу яких можна зіштовхнутись на практиці. Як вже було сказано, подібного аналізу, крім загальних підходів, у спеціальних джерелах нам знайти не вдалося. Важливість розв’язання цієї задачі зумовлена необхідністю виробити докладні, далеко не очевидні практичні рекомендації, на підставі яких можна покращити роботу малогабаритного ПГ з урахуванням тих або інших вимог, що пред’являються до нього.

Площі поверхонь однодротової і багатодротової спіралей, виготовлених з одного матеріалу, а також їх опори описуються такими виразами відповідно:

$$S_1 = \pi d_1 L, \quad S_2 = n \pi d_2 L,$$

$$R_1 = \rho L / s_1, \quad R_2 = \rho L / (n s_2),$$

де d_1 – діаметр провідника однодротової спіралі; d_2 – діаметр одного з провідників БДС; L – довжина провідників, загальна для однодротової спіралі та БДС; n – число дротів у БДС; ρ – питомий опір дротів обох спіралей, Ом·м; $s_{1,2} = (\pi / 4) d_{1,2}^2$ – площі поперечного перерізу окремих дротів обох спіралей (для БДС – площа перерізу одного з її дротів).

Позначивши відношення діаметрів як $q = d_1 / d_2$, запишемо відношення $\xi = (S_2 - S_1) / S_1$ і $\psi = (R_2 - R_1) / R_1$ у вигляді

$$\xi = \frac{n}{q} - 1; \tag{1}$$

$$\psi = \frac{q^2}{n} - 1. \tag{2}$$

Водночас з необхідних умов $\xi \geq 0$ ($S_2 \geq S_1$) і $\psi \geq 0$ ($R_2 \geq R_1$) виходить нерівність, яка обмежує можливі значення q інтервалом

$$\sqrt{n} \leq q \leq n. \tag{3}$$

Для спіралей, звитих з одного і $n = \{2; 3; 4\}$ окремих провідників, відношення v об’єму $V(1) = (\pi / 4) d_1^2 L$ до $V(n) = n (\pi / 4) d_2^2 L$ становитиме

$$v = \frac{q^2}{n} \equiv \psi + 1. \tag{4}$$

Вираз (4) дозволяє порівняти масивність спіралей, звитих з одного і декількох дротів. Значення v далі не наводяться, оскільки їх легко визначити на підставі (4).

Розглянувши геометрію поперечного перерізу всіх трьох різновидів БДС, можна встановити еквівалентні діаметри $D(n)$ їх провідників

$$D(n) = \begin{cases} 2d_2, & n = 2; 3, \\ (1 + \sqrt{2})d_2, & n = 4. \end{cases} \tag{5}$$

Проаналізуємо чотири характерних випадки, які дозволяють одержати достатньо повне уявлення про поведінку параметрів (1), (2). Наведений нижче аналіз виконаний для вихідного діаметра однодротової спіралі $d_1 = 0,4$ мм.

Таблиця 1. Електричні характеристики металів, які використовуються для виготовлення нагрівачів

Метал (марка)	Питомий опір ρ , 10^{-6} , Ом·м	Температурний коефіцієнт опору α , 10^{-4} , $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Ніхром (Х20Н80)	1,03...1,13	0,9
Фехраль (Х23Ю5Т)	1,39 (1,24...1,45)	1,0...1,3
Нержавіюча сталь (08Х17Н13М2, 08Х16Н11М3, 03Х17Н14М3, 04Х17Н13М2, 12Х18Н10Т)	0,75...0,8	9,0...10,5

За наведеними нижче табл. 2–5 значення v визначається як $v \% = \psi \% + 100 \%$.

А) Обидва конкуруючих між собою значення – ξ та ψ – одночасно збільшено настільки, наскільки це можливо (не в збиток одне одному). З огляду на те, що ξ із зростанням q меншає, а ψ зростає, то збільшення однієї з указаних величин нерозривно пов'язане із зменшенням іншої. Тому, поставивши за мету знайти таке q , за якого обидві величини ξ і ψ набудуть найбільших значень, рівності (1) і (2) слід прирівняти. У результаті одержимо

$$q(n) = n^{2/3}. \tag{6}$$

Таблиця 2 містить розраховані на підставі (1), (2) та (5), (6) значення $q(n)$, $\xi(n) \equiv \psi(n) = \sqrt[3]{n} - 1$, $d_2(n) = d_1 / n^{2/3}$ і $D(n)$.

Таблиця 2. Випадок $\xi \equiv \psi$ (величини ξ і ψ разом збільшені до значення, яке є максимальним для обох одночасно)

n	q	ξ і $\psi, \%$	$d_2, \text{мм}$	$D, \text{мм}$
2	1,587	25,99	0,252	0,504
3	2,080	44,23	0,192	0,385
4	2,520	58,74	0,159	0,383

Таблиця 3. Випадок $D(n) \equiv d_1 = 0,4 \text{ мм}$ (діаметри однодротового та багатодротового провідників однакові)

n	q	$\xi, \%$	$\psi, \%$	$d_2, \text{мм}$
2	2,000	0,00	100,00	0,200
3	2,000	50,00	33,33	0,200
4	2,414	65,69	45,71	0,166

Таблиця 4. Випадок $\xi = 0$ (площа поверхні БДС така ж, як в однодротовій спіралі)

n	q	$\psi, \%$	$d_2, \text{мм}$	$D, \text{мм}$
2	2	100	0,200	0,400
3	3	200	0,133	0,267
4	4	300	0,100	0,241

Таблиця 5. Випадок $\psi = 0$ (опір БДС такий же, як в однодротовій спіралі)

n	q	$\xi, \%$	$d_2, \text{мм}$	$D, \text{мм}$
2	1,414	41,42	0,283	0,566
3	1,732	73,21	0,231	0,462
4	2,000	100,00	0,200	0,483

Б) $D(n) \equiv d_1$ – діаметр провідника БДС залишається таким же, як у однодротовій спіралі – d_1 . Значення q , які відповідають умові $D(n) \equiv d_1$, знайдено при різних n з таких рівностей:

$$D(2) \equiv d_1 = 2d_2, \text{ звідки } q(2) = 2;$$

$$D(3) \equiv d_1 = 2d_2, \text{ звідки } q(3) = 2;$$

$$D(4) \equiv d_1 = (1 + \sqrt{2})d_2, \text{ звідки } q(4) = 1 + \sqrt{2}.$$

Таблиця 3 містить розраховані на підставі (1), (2) значення $\xi(n)$, $\psi(n)$, а також $d_2(n) = d_1 / q(n)$ для визначених вище $q(n)$.

В) $\xi \equiv 0$ – площа поверхні БДС залишається такою ж, як у однодротовій – з діаметром провідника d_1 . Згідно з (1), умові $\xi(n) \equiv 0$ відповідають значення $q(n) = n$.

Таблиця 4 містить знайдені значення $q(n)$, $\psi(n) = n - 1$, $d_2(n) = d_1 / q(n)$ і $D(n)$.

Знаходячи v згідно з (4), з табл. 4 бачимо, що спіраль, яка звита з чотирьох провідників діаметром 0,1 мм, має масу (об'єм) на 400 % (в 5 разів) меншу, ніж однодротова спіраль діаметром 0,4 мм, яка має таку ж площу поверхні. Отже, чотиридротова спіраль нагріватиметься значно швидше, при цьому її опір зростає на $\psi = 300 \%$ (в 4 рази).

Г) $\psi \equiv 0$ – опір БДС залишається таким же, як у однодротовій з діаметром провідника d_1 . Значення $q(n) = \sqrt{n}$, які відповідають умові $\psi \equiv 0$, знайдено з (2).

Таблиця 5 містить розраховані значення $q(n)$, $\xi(n) = \sqrt{n} - 1$, $d_2(n) = d_1 / q(n)$ і $D(n)$.

З табл. 5 можна бачити, що в цьому випадку площа поверхні чотиридротової спіралі, звитої з провідників діаметром 0,2 мм ($n = 4$), зростає на $\xi = 100 \%$, тобто в 2 рази, притому що опір її залишається таким же ($\psi \equiv 0$), як у однодротової спіралі з діаметром провідника d_1 . В той же час, маса (об'єм) однодротової спіралі виявляється в два рази ($v = \psi + 1 = 1$, або на 100 %) більшою, ніж багатодротової. Це говорить про зниження швидкості розігріву останньої.

Як можна бачити, випадок «Г» дозволяє домогтися найбільшого значення ξ , яке, однак, не перевищує 100 %.

Спробуймо дещо відступити від вимог, що накладаються нерівністю (3). Тим самим збільшимо площу поверхні не в два, а в три ($\xi = 2$) і в чотири ($\xi = 3$) рази.

Для $\xi = 2$ припустимо $n = 8$. Тоді з (1) $q = n / (\xi + 1) = 8/3$. Звідси, згідно з (2), $\psi = -0,11$. Як бачимо, збільшення площі поверхні в три

рази досягається тільки за рахунок зменшення опору на 11 %.

Для $\xi = 3$ і $n = 8$ одержимо $q = 2$ і, відповідно, згідно з (2), $\psi = -0,5$. Збільшення площі поверхні на 300 % призводить до зменшення опору на 50 %.

Допустимість таких втрат опору належить оцінювати в кожному випадку окремо, оскільки навіть незначне порушення нерівності (3) може мати сенс тільки в особливих випадках.

Особливості, які впливають з відмінних від (3) нерівностей, зазвичай використовуються під час виробництва багатодротових проводів з метою зменшити їх опір разом із збільшенням площі поверхні: $R_2 < R_1$ ($\psi < 0$); $S_2 > S_1$ ($\xi > 0$). Досягання цього можливе, на відміну від (3), в області перетину нерівностей $q < \sqrt{n}$ і $q < n$, тобто $n > q^2$. Так, наприклад, якщо $q = 2$, то необхідна кількість дротів складає $n > 4$, а якщо $q = 10$, то $n > 100$.

Варто підкреслити, що використання табл. 2–5 передбачає, що в кожному окремо взятому випадку «А»–«Г» порівнювані БДС виготовлено з дротів однакової довжини L (див. виведення виразів (1) і (2)). Тому при однаковому числі витків внутрішні діаметри спіралей або щільність скручування їх дротів дещо відрізняються.

Таблиці 2–5 дозволяють оцінити переваги й недоліки кожного з розглянутих чотирьох випадків. З урахуванням зробленого вибору можна подібним чином розрахувати оптимальні параметри будь-якої БДС при іншому вихідному діаметрі d_1 однодротової спіралі.

Розрахунок у випадку «А» ($\xi \equiv \psi$) – табл. 2 є оптимальним в тому сенсі, що площа поверхні випаровування і опір спіралі можуть бути одночасно збільшені до 59 %.

Схожий результат, але «на користь» ξ , досягається у випадку «Б» ($D(n) \equiv d_1$) за умови $n > 2$ – табл. 3; виняток складають тільки розрахунки для $n = 2$, котрі цілком збігаються із випадком «В» за умови $n = 2$ – табл. 4.

Якщо метою є збільшення тільки опору спіралі (може бути важливим при використанні в якості матеріалу нержавіючої сталі – більш низькоомної, ніж ніхром або фехраль – табл. 1), то оптимальними можна назвати розрахунки у випадках «Б» ($D(n) \equiv d_1$) для $n = 2$ – табл. 3 і «В» ($\xi \equiv 0$) для всіх n – табл. 4. Цим досягається зменшення струму, що споживається.

Якщо ж метою є збільшення площі випаровування (зменшення поверхневої потужності) – $\xi > 0$, то оптимальними виявляються розрахунки для випадків «Б» ($D(n) \equiv d_1$) при $n > 2$ – табл. 3, а також «Г» ($\psi \equiv 0$) для всіх n – табл. 5.

Обираючи між тим або іншим серед розглянутих випадків, особливо – при поодиноких їх властивостях, що перетинаються, слід звертати увагу на значення $v = \psi + 1$ (див. (4)). Це дозволить виготовити менш масивну спіраль з прийнятними характеристиками. З іншого боку, слід враховувати еквівалентний діаметр спіралі. Цей діаметр обирається за критеріями, які забезпечують міцність вигину: $7 \dots 10 d_{1,2}$ – для ніхром і $5 \dots 7 d_{1,2}$ – для фехрально [31, с. 61].

3. Оцінка часу роботи ПГ залежно від обраної потужності джерела живлення і опору нагрівача. Живлення ПГ передбачається здійснювати від літій-марганцевого акумулятора [32–34] *Efest IMR 26650* з вихідною напругою 3,7 В і номінальною ємністю 5 А·год. Заявлений виробником акумулятора максимальний неперервний струм розряду складає 18 А, імпульсний – 45 А.

При характерних для ПГ малих опорах нагрівальних спіралей і великих робочих струмах час розряду акумулятора дуже малий – впритул до 10...15 хв.

Заважемо, що не завжди експерименти з факельним розрядом вимагатимуть великої кількості пари, а отже, потужність, яка подається на випарник, може бути зменшена, а його опір збільшений. Відповідно, при цьому збільшиться час роботи пристрою від одного гальванічного елемента. Отже, доцільно порівняти час роботи ПГ від одного акумулятора при різних опорах навантаження і потужностях, які на них подаються.

Основні співвідношення. Енергія, Вт·год, що передана від повністю зарядженого акумулятора до закінчення його розряду у зовнішнє коло, описується трьома рівнозначними виразами:

$$E = \begin{cases} P \Theta, \\ C \sqrt{RP}, \\ C U, \end{cases} \quad (8)$$

де P – потужність, що споживається навантаженням, Вт, – тобто енергія, яка витрачається в одиницю часу ($P = E / \Theta$); Θ – час повного роз-

ряду акумулятора при потужності P , що віддається; C – ємність акумулятора, $A \cdot год$.

Приблизне значення Θ в годинах –

$$\Theta = C / I, \quad (9)$$

де

$$I = \sqrt{P / R} \quad (10)$$

струм через навантаження з опором R при поданій потужності P .

Як можна бачити з (15), при зростанні струму I час розряду Θ зменшується обернено пропорційно.

Оскільки джерело живлення ПГ (імпульсний електронний трансформатор [31, с. 29]) дозволяє змінювати потужність (напругу), яка подається на спіраль випарника, то при різних U акумулятор здатний віддати різні енергії. Проте, чим більшу енергію віддає акумулятор, тим меншим виявляється час його розряду Θ (9): чим вище напруга U , тим більше струм $I = U / R$, і тим менше $\Theta = C / I$.

Порівняння часу роботи ПГ від акумулятора при різних опорах навантаження і потужностях, що подаються. Порівнюючи роботу акумулятора зі спіралями опорів R_1 і R_2 , з (9), (10) і першого виразу групи (8), можна знайти відношення енергій, які віддаються тим же самим акумулятором – $\Xi = E_2 / E_1$ у двох рівнозначних формах запису

$$\Xi = \frac{P_2 \Theta_2}{P_1 \Theta_1} = \sqrt{\frac{P_2 R_2}{P_1 R_1}}. \quad (11)$$

Якщо ввести позначення $\Theta_2 / \Theta_1 = \tau$, то

$$\tau = \sqrt{\frac{P_1 R_2}{P_2 R_1}}. \quad (12)$$

У подальшому становитиме інтерес випадок $\tau > 1$, тобто $\Theta_2 > \Theta_1$.

Тепер зіставимо вирази (10) і (12). Як бачимо, $\tau \equiv I_1 / I_2$, і тому для поставленої мети завжди справедлива нерівність $I_1 > I_2$.

Якщо обидві потужності співпадають $P_1 = P_2$, для зручності введемо позначення $\tau = \tau_0$. В цьому поодинокому випадку вирази (11) і (12) набувають вигляду

$$\Xi \equiv \tau_0 = \sqrt{R_2 / R_1}, \quad (13)$$

причому знов $I_1 / I_2 > 1$, якщо тільки $R_2 > R_1$. Параметр τ_0 знадобиться в подальшому.

Тобто при $P_1 = P_2$ умова $\Theta_2 > \Theta_1$ виконується для $R_2 > R_1$.

Випадок $\tau_0 = 1$ виключаємо як такий, що не має практичного сенсу.

Випадок $\Xi = 1$ ($P_2 R_2 = P_1 R_1$) жодних важливих особливостей не має і виділяється з ряду інших тільки поодинокую рівністю $\tau = \tau_0^2$, коли можна записати $P_2 = P_1 / \tau_0^2$.

Вираз (12), з урахуванням (13), можна також переписати у вигляді

$$\tau = \tau_0 \sqrt{P_1 / P_2}. \quad (14)$$

Якщо (14) передати як

$$P_2 = (\tau_0 / \tau)^2 P_1, \quad (15)$$

то можна бачити, що за умови $\tau \geq \tau_0 \geq 1$ виконується нерівність $P_2 \leq P_1$, а при $\tau_0 > \tau > 1$ – навпаки: $P_2 > P_1$. Проте в обох випадках $\tau > 1$, що рівнозначно первісно прийнятій умові $I_1 > I_2$ (див. (10)).

Описана методика може бути використана також для багатоспіральних ПГ. У цьому випадку в отримані вирази слід підставляти еквівалентний опір – зазвичай паралельно з'єднаних спіралей.

4. Зв'язок відносного часу τ для порівнюваних БДС від діаметрів дротів та їх питомих опорів при заданому відношенні поверхневих потужностей. Характеристикою якості отримуваної пари служить поверхнева потужність $\beta = P / S$, де P – потужність, що споживається нагрівальним елементом, а S – площа поверхні провідника нагрівача. Вище було зазначено, що оптимальні значення β , як правило, лежать у межах $0,15 \dots 0,3$, що дозволяє запобігти підгорянню гноту ПГ та неконтрольованих включень до пари перегорілої органіки.

Знов зіставимо максимально можливі часи роботи ПГ, який живиться від того ж самого акумулятора, але в термінах поверхневих потужностей, питомих опорів і діаметрів дротів двох БДС з числом дротів n_1 і n_2 ($n_{1,2} \geq 1$).

Припустимо, що поверхневі потужності знаходяться в співвідношенні

$$\beta_1 = g \beta_2, \quad (16)$$

де $\beta_{1,2} = P_{1,2} / S_{1,2}$; $S_{1,2} = n_{1,2} \pi d_{1,2} L_{1,2}$ – площа поверхні БДС з числом дротів n_1 і n_2 кожна; $d_{1,2}$ і $L_{1,2}$ – діаметри окремих дротів і довжини провідників порівнюваних спіралей відповідно. На

підставі (16) можна записати

$$\frac{P_1}{P_2} = g \frac{n_1 L_1 d_1}{n_2 L_2 d_2}. \quad (17)$$

Значення коефіцієнта g , вочевидь, може лежати в межах $0,15 / 0,3 \leq g \leq 0,3 / 0,15$, тобто $0,5 \leq g \leq 2,0$, притому що для обох поверхневих потужностей неодмінно виконується нерівність $0,15 \leq \{\beta_1, \beta_2\} \leq 0,3$.

Як і раніше, вважаємо, що потужності P_2 відповідає більший час розряду акумулятора, ніж для P_1 .

На підставі відомого виразу для опору провідника $R = \rho L / s$, де ρ – його питомий опір і $s = \pi d^2 / 4$ – площа поперечного перерізу, після підстановки $\rho = \rho_{1,2}$ і $s = s_{1,2}$ при $s_{1,2} = n_{1,2} \pi d^2 / 4$, запишемо

$$L_{1,2} = n_{1,2} \frac{\pi}{4} d_{1,2}^2 \frac{R_{1,2}}{\rho_{1,2}}. \quad (18)$$

Підставивши (18) в (17), маємо

$$\frac{P_1}{P_2} = \alpha \frac{R_1}{R_2}, \quad (19)$$

де

$$\alpha = g \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^3. \quad (20)$$

З використанням (19), (20) можна записати ще один вираз для введеної раніше величини τ . Підставивши (19) в (12), маємо

$$\tau \equiv \sqrt{\alpha}. \quad (21)$$

Отже, за умови $P_1 \equiv P_2$ (див. (19)) так само справедливо

$$\tau \equiv \tau_0 = \sqrt{R_2 / R_1}, \quad (22)$$

або в іншій формі запису –

$$\tau \equiv \tau_0 = \frac{d_1}{d_2} \sqrt{\frac{\rho_2 L_2 n_1}{\rho_1 L_1 n_2}}.$$

Таким чином, на підставі (21) і (22), вираз (19) можна переписати в уже знайомому вигляді (див. вираз (14)):

$$\tau = \tau_0 \sqrt{P_1 / P_2}. \quad (23)$$

Можна зробити висновок, що величина τ пропорційна $g^{1/2}$, n_1 / n_2 , $(\rho_2 / \rho_1)^{1/2}$ і $(d_1 / d_2)^{3/2}$.

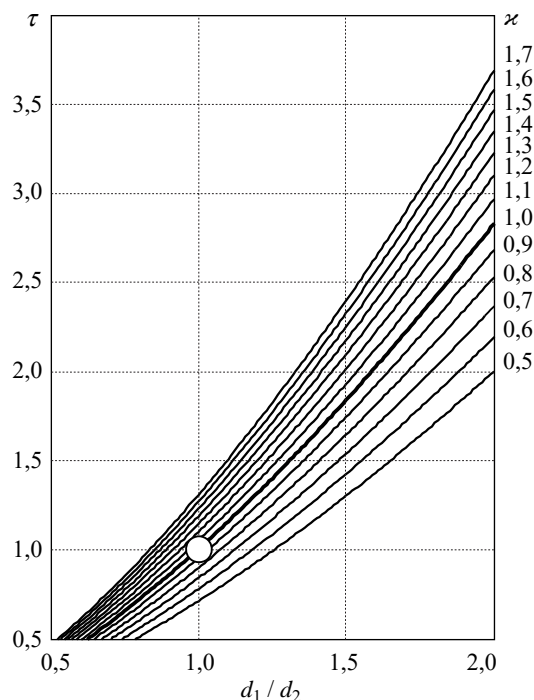


Рис. 2. Залежності відносного часу розряду акумулятора τ від відношення діаметрів провідників нагрівальних спіралей для низки значень $\kappa = g \rho_2 / \rho_1 (n_1 / n_2)^2$

З (20), (21) також випливає, що виграш у часі τ роботи акумулятора може бути знайдений і без урахування опору спіралей і потужностей, які віддаються джерелом живлення. Тобто лише на підставі відомих значень $\rho_{1,2}$, $d_{1,2}$ і відношення $g = \beta_1 / \beta_2$.

На рис. 2 ілюструються залежності τ від d_1 / d_2 при зміні параметра

$$\kappa = g \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

в межах $0,5 \dots 1,7$, котрі в поодинокому випадку $(\rho_2 / \rho_1) (n_1 / n_2)^2 = 1$ узгоджуються з допустимим інтервалом для g : $0,5 \leq g \leq 2,0$ (див. вище).

Товста лінія на рис. 2 відповідає значенню $\kappa = 1$, що, зокрема, рівносильно об'єднанню умов $g = 1$, $\rho_1 = \rho_2$ і $n_1 = n_2$. При $d_1 / d_2 = 1$ справедлива тотожність $\tau \equiv 1$: збільшення часу роботи акумулятора немає; ця точка на рис. 2 виділена кружком.

Висновки. Запропоновано застосовувати в якості добавок до плазмоутворюючого газу (повітря) каталізуючих або флюсоутворюючих парів на основі гліцерину. Це дозволить керувати якостями отримуваних покриттів і підвищити ефективність використання ВЧФР.

Проаналізовано поведінку осколкових іонів гліцерину в плазмі ВЧФР. Зроблено висновок про те, що самі по собі пари гліцерину не мають спричинити вплив на струм ВЧФР.

Розроблено оригінальну методику розрахунку оптимальних параметрів мініатюрного ПГ з метою:

а) збільшення пароутворення і зменшення енерговитрат при живленні від гальванічного елемента;

б) можливості застосовувати нагрівачі з нержавіючої сталі для живлення ПГ у режимі автоматичного регулювання температури.

Проаналізовано, за яких відношень q діаметрів однодротового провідника d_1 і одного з n дротів багатодотового провідника d_2 можна досягти бажаного збільшення площі поверхні S і опору R БДС в залежності від n . Встановлено, що:

а) придатні для цієї мети значення $q = d_1 / d_2$ обмежені інтервалом $n^{1/2} \leq q \leq n$;

б) площа поверхні S_2 і опір R_2 , які звичайно є «конкуруючими» величинами, в поодинокому

випадку $q = n^{2/3}$ можуть бути сумісно збільшені на 59 %;

в) за умови $n \leq 4$ площа поверхні БДС S_2 не може бути збільшена більш ніж в два рази. Проте можливо збільшити її опір R_2 від двох до чотирьох разів за незмінної S_2 .

Складено довідкові таблиці для вибору числа дротів БДС n та їх діаметра d_2 .

Одержано вирази, які дозволяють оцінити відносний час τ роботи ПГ при зміні потужності, що подається, та опору спіралі.

Показано, що величина τ двох БДС з різної кількості $n_{1,2}$ дротів може бути виражена в термінах відношень діаметрів окремих дротів d_1 / d_2 , питомих опорів ρ_2 / ρ_1 матеріалів спіралей і поверхневих потужностей $g = \beta_1 / \beta_2$. Цей висновок може виявитись корисним під час розрахунку площі поверхні БДС і потужності ПГ з урахуванням властивостей розчину для його випарювання з заданою швидкістю.

Автор вдячний ініціатору досліджень високочастотного факельного розряду – доктору технічних наук Б.П. Ефімову.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Schoop M.U. A New Process (Spray Process) for the Production of Metallic Coatings. *Metallurgical and Chemical Engineering*. 1910. Vol. 8. P. 404–406.
2. Ротрекле Б., Дитрих З., Тамхина И. *Нанесение металлических покрытий на пластмассы*. Пер. с чеш. Ленинград: Химия, 1968. 168 с.
3. Truncsek V. Unipolar high-frequency discharge. *Folia Fac. Sci. Nat. University*. 1971. Vol. 12. P. 3–13.
4. Ефімов Б.П., Кулешов А.Н., Хорунжий М.О., Пузанов А.О. Возбуждение факельного СВЧ разряда в однопроводной линии. *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2009. Т. 14, № 3. С. 267–274.
5. Puzanov A.O., Khorunzhiy M.O., Kuleshov A.N., and Yefimov B.P. Research Results and Applications of Torch Discharge in the Goubau Line. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2011. Vol. 39, Iss. 11, pt. 1. P. 2878–2879. DOI: 10.1109/TPS.2011.2166407.
6. Ефімов Б.П., Кулешов А.Н., Пузанов А.О., Хорунжий М.О. Факельный СВЧ-разряд в однопроводной линии: экспериментальная установка и результаты исследований. *Радиотехника*: науч.-техн. сб. Нац. ун-т радиоэлектрон. Харьков, Украина. 2013. № 172. С. 125–133.
7. Пузанов А.О., Ефімов Б.П., Кулешов А.Н. Активное сопротивление факельного разряда и частотная зависимость минимального для его поддержания напряжения генератора. *Радиофизика и электрон.* 2014. Т. 5(19), № 3. С. 61–70.
8. Сергейчев К.Ф., Душик В.В., Иванов В.А., Лаптева В.Г., Лахоткин Ю.В., Лукина Н.А., Борисенко М.А., Поддубная Л.В. Газофазный плазмохимический синтез поликристаллического алмазного покрытия рабочей поверхности твердосплавных режущих инструментов в плазме факельного СВЧ-разряда (обзор). *Успехи прикладной физики*. 2014. Т. 2, № 5. С. 453–475.
9. Мехтизаде Р.Н. Электрический разряд факельного вида как средство технологического воздействия на материалы. *Проблемы энергетики*. 2005. № 2. С. 49–55.
10. Шишковский В.И. Методические основы моделирования высокочастотных разрядов в курсе физики. *Вестник Томского гос. педагогического ун-та. Естественные науки*. 2000. № 2(18). С. 42–46.
11. Мискун И.А., Луценко Ю.Ю. Влияние добавок молекулярного газа на температуру факельного разряда, горящего в атомарном газе. *20-я Междунар. науч.-практич. конф. «Современные техника и технологии»*. Секция 8: «Физические методы в науке и технике»: материалы конф. (Томск, 14–18 апреля 2014): в 3-х т. Т. 3. Томск, 2014. С. 29–30.
12. Лопатин В.В., Сквирская И.И. Электрический разряд и его технологические применения. *Изв. Томского политехн. ун-та*. 2003. Т. 306, № 1. С. 128–132.
13. Луценко Ю.Ю. *Физика высокочастотных разрядов емкостного типа*. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011. 122 с.

14. Луценко Ю.Ю., Власов В.А., Вендеревская Ю.В. Особенности процесса горения высокочастотного емкостного разряда в средах с дисперсной фазой. *Изв. Томского политехн. ун-та*. 2007. Т. 311, № 2. С. 80–82.
15. Геворкян В.Г. *Основы сварочного дела*. Москва: Высшая школа, 1985. 168 с.
16. Хряпин В.Е. *Справочник паяльщика*. Москва: Машиностроение, 1981. С. 125.
17. Винников И.З. *Паяльные работы*. Москва: Высшая школа, 1979. 145 с.
18. Завилопуло А.Н., Шпеник О.Б., Маркуш П.П., Контрош Е.Э. Ионизация молекулы глицерина электронным ударом. *Журн. техн. физики*. 2015. Т. 85, вып. 7. С. 13–19.
19. Пархоменко В.Д., Сорока П.И., Краснокутский Ю.И., Цыбулев П.Н., Верещак В.Г., Максимов А.И., Моссэ А.Л., Амбразевичус А.Б. *Плазмохимическая технология*. Низкотемпературная плазма. Т. 4. Новосибирск: Наука, 1991. С. 83, 343.
20. Лебедев А.Т. *Масс-спектрометрия в органической химии*. Методы в химии. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 493 с.
21. *Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и средство к электрону*. Справочник. Под ред. В.Н. Кондратьева. Москва: Наука, 1974. 350 с.
22. Fauchais P. Understanding plasma spraying. Topical review. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2004. Vol. 37, No. 9. P. R86–R108. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/9/R02>.
23. Горячев С.В., Исакаев Э.Х., Сенченко В.Н., Чиннов В.Ф., Щербаков В.В. Эффективность нагрева микрочастиц в высокоэнтальпийных плазменных струях. *6-я Всерос. конф. «Физическая электроника»*: материалы конф. (Махачкала, Россия, 23–26 сент. 2010). Махачкала: ИПЦ ДГУ, 2010. С. 283–288.
24. Герасименко А.А., Федин В.Т. *Передача и распределение электрической энергии*. Москва: КНОРУС, 2014. С. 67, 528–529.
25. Тельманова Е.Д. *Электрические и электронные аппараты: электронный учебник*. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2010. URL: <https://www.rsvpu.ru/biblioteka/materialy-konf/filedirectory/3468/telmanova-elap.pdf>
26. *Расчет переходного сопротивления*. URL: <http://stud.izhdv.ru/rir/57.htm>
27. *Тепловой расчет промышленных парогенераторов*. Под ред. В.И. Частухина. Киев: Вища школа, 1980. С. 34–35, 171–173.
28. ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные. Марки. URL: http://www.metotech.ru/gost_10994_74.htm
29. Кудрявцев И.Ф., Карасенко В.А. *Электрический нагрев и электротехнология*. Москва: Колос, 1975. 384 с.
30. Сокунов Б.А., Грובה Л.С. *Электротермические установки. Электротермические печи сопротивления*. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. С. 103.
31. Басов А.М., Быков В.Г., Лаптев А.В., Файн В. Б. *Электротехнология*. Москва: Агропромиздат, 1985. 256 с.
32. Хрусталева Д.А. *Аккумуляторы*. Москва: Изумруд, 2003. 224 с.
33. Лаврус В.И. *Батареи и аккумуляторы*. Москва: Наука и техника, 1995. 79 с.
34. Сорокин М.И., Клименко Г.К. Исследование энергетических характеристик аккумуляторов специального назначения. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2014. Вып. 2. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/energy/1204.html>

Стаття надійшла 25.08.2020

REFERENCES

1. Schoop, M.U., 1910. A New Process (Spray Process) for the Production of Metallic Coatings. In: *Metallurgical and Chemical Engineering*, **8**, pp. 404–406.
2. Rotrekle, B., Ditrikh, Z., Tamkhina, I., 1968. *Causing of metallic coverages on plastics*. Translated from Czech. Leningrad: Khimiya Publ. (in Russian).
3. Trunecsek, V., 1971. Unipolar high-frequency discharge. *Folia Fac. Sci. Nat. University*, **12**, pp. 3–13.
4. Yefimov, B.P., Kuleshov, A.N., Khorunzhiy, M.O., and Puzanov, A.O., 2009. Excitation of MW torch discharge at the edge of single-conductor line. In: V.M. Yakovenko, ed. 2009. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **14**(3), pp. 267–274 (in Russian).
5. Puzanov, A.O., Khorunzhiy, M.O., Kuleshov, A.N., and Yefimov, B.P., 2011. Research Results and Applications of Torch Discharge in the Goubau Line. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **39**(11), pt. 1, pp. 2878–2879. DOI: 10.1109/TPS.2011.2166407.
6. Yefimov, B.P., Kuleshov, A.N., Puzanov, A.O., and Khorunzhiy, M.O., 2013. Torch microwave discharge in a single-conductor line: experimental setup and research results. In: N.I. Slipchenko, ed. 2013. *Radiotekhnika*. Kharkov: National Univ. Radioelectronics Publ. **172**, pp. 125–133 (in Russian).
7. Puzanov, A.O., Yefimov, B.P., and Kuleshov, A.N., 2014. Torch discharge resistance and frequency dependence of the HF-source voltages required to sustain discharge. *Radiofiz. Elektron.*, **5**(19)(3), pp. 61–70 (in Russian).
8. Sergeichev, K.F., Dushik, V.V., Ivanov, V.A., Lapteva, V.G., Lakhotkin, Yu.V., Lukina, N.A., Borisenko, M.A., Poddubnaya, L.V., 2014. MPCVD plasma chemical synthesis of polycrystalline diamond coating on the working surface of carbide cutting tools in the microwave plasma torch discharge (review). *Uspekhi prikladnoy fiziki*, **2**(5), pp. 453–475 (in Russian).
9. Mehdizadeh, R.N., 2005. The electric flare discharge as means of technological materials action. *Power engineering problems*, **2**, pp. 49–55 (in Russian).

10. Shishkovsky, V.I., 2000. Methodical basis of high-frequency charges modeling in physics education courses. *Tomsk State Pedagogical University Bulletin. Natural Sciences*, **2**(18), pp. 42–46 (in Russian).
11. Miskun, I.A., Lutsenko, Yu.Yu., 2014. Influence of additions of molecular gas on the temperature of torch discharge burning in atomic gas. In: *20th Int. Conf. "Modern technique and technologies"*. Section 8: "Physical methods in science and technique". Tomsk, The Russian Federation, 14–18 Apr. 2014. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., pp. 29–30 (in Russian).
12. Lopatin, V.V., Skvirskaya, I.I., 2003. Electric discharge and his technological applications. *Izv. Tomskogo Politekh. un-ta*, **306**(1), pp. 128–132 (in Russian).
13. Lutsenko, Yu.Yu., 2011. *Physics of high-frequency discharges of capacity kind*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. (in Russian).
14. Lutsenko, Yu.Yu., Vlasov, V.A., Venderevskaya, Yu.V., 2007. Properties of process of burning of high-frequency capacity discharge in environ ments with a dispersible phase. *Izv. Tomskogo Politekh. un-ta*, **311**(2), pp. 80–82 (in Russian).
15. Gevorkyan, V.G., 1985. *Bases of welding job*. Moscow: Vysshaya shkola Publ. (in Russian).
16. Khryapin, V.E., 1981. *Referencebook of solderer*. Moscow: Mashinostroenie Publ., p. 125 (in Russian).
17. Vinnikov, I.Z., 1979. *Soldering Works*. Moscow: Vysshaya Shkola Publ. (in Russian).
18. Zavielopulo, A.N., Shpenik, O.B., Markush, P.P., Kontrosh, E.E., 2015. Ionizing of molecule of glycerin by an electronic blow. *J. tech. phys.*, **85**(7), pp. 13–19 (in Russian).
19. Parkhomenko, V.D., Soroka, P.I., Krasnokutsky, Yu.I., Tsybulev, P.N., Vereshchak, V.G., Maksimov, A.I., Mosse, A.L., Ambrazyavichus, A.B., 1991. *Plasma-chemical technology*. Low temperature plasma. Vol. 4. Novosibirsk: Nauka Publ., pp. 83, 343 (in Russian).
20. Lebedev, A.T., 2003. *A mass-spectrometry is in organic chemistry. (Methods are in chemistry)*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy Publ. (in Russian).
21. Kondratiev, V. ed., 1974. *Energy of break of chemical couplings. Ionizing potentials and affinity to the electron*. Referencebook. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
22. Fauchais, P., 2004. Understanding plasma spraying. Topical review. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**(9), pp. R86–R108. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/9/R02>.
23. Goryachev, S.V., Isakaev, E.Kh., Senchenko, V.N., Chinnov, V.F., Scherbakov, V.V., 2010. Efficiency of heating of micro-particleless is in high-enthalpy plasma streams. In: *6th All-Russian Conf. "Physical Electronics"*. Makhachkala, The Russian Federation, 23–26 Sept. 2010. Makhachkala: IPTs DGU, pp. 283–288 (in Russian).
24. Gerasimenko, A.A., Fedin, V.T., 2014. *Transmission and distribution of electric energy*. Moscow: KNORUS Publ., pp. 67, 528–529 (in Russian).
25. Tel'manova, E.D., 2010. *Electric and Electronic Vehicles: Electronic Reference Book*. Ekaterinburg: GOU VPO "Ros. Gos. Prof.-ped. Un-t Publ. (in Russian). Available from: <https://www.rsvpu.ru/biblioteka/materialy-konf/filedirectory/3468/tel-manova-elap.pdf>
26. *Calculations of a Transitive Resistance* (in Russian). Available from: <http://stud.izhdv.ru/rir/57.htm>
27. Chastukhin, V.I. ed., 1980. *Thermal calculation of industrial steam-generators*. Kiev: Vyshcha shkola Publ., pp. 34–35, 171–173 (in Russian).
28. GOST 10994-74. Precision alloys. Grades. (in Russian). Available from: http://www.metotech.ru/gost_10994_74.htm
29. Kudryavtsev, I.F., Karasenko, V.A., 1975. *Electric heating and electric technology*. Moscow: Kolos Publ. (in Russian).
30. Sokunov, B.A., Grobova, L.S., 2004. *Electrothermal installations. Electrothermal resistance furnace*. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UI Publ., p. 103 (in Russian).
31. Basov, A.M., Bykov, V.G., Laptev, A.V., Fain, V.B., 1985. *Electric technology*. Moscow: Agropromizdat Publ. (in Russian).
32. Hrustalev, D.A., 2003. *Accumulators*. Moscow: Izumrud Publ. (in Russian).
33. Lavrus, V.I., 1995. *Batteries and accumulators*. Moscow: Nauka i tekhnika Publ. (in Russian).
34. Sorokin, M.I., Klimentko, G.K., 2014. Research of power characteristics of accumulators of the special purpose. *Engineering journal: Science and innervations*, **2** (in Russian). Available from: <http://engjournal.ru/catalog/machin/energy/1204.html>

Received 25.08.2020

O.O. Puzanov

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU
12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

EMPLOYMENT OF ELECTRIC TORCH DISCHARGE AND A STEAM-GAS GENERATOR IN SURFACE SCHOOPING OF MATERIALS

Subject and Purpose. The present paper is concerned with the method of surface schooping of materials using high-frequency torch discharge (HFTD) and glycerol vapor as a base for dissolving activating additives to the working gas. To approach the problem, a steam generator is employed in an effort to improve the HFTD catalytic performance in the activation of surfaces and deposition of coatings on them. The purpose is to develop a design technique of a steam generator intended for making a proper gas environment in the HFTD burning area. The discussed design techniques seek to enhance efficiency of the self-contained steam generator with allowance for its small size compared to the wavelength.

Methods and Methodology. The analysis of the glycerol vapor behavior in the HFTD plasma depends on the knowledge of glycerol molecule ionization potential in the electron impact case. To find out about the measure to which the glycerol vapor affects the HFTD current, a known calcium ionization potential is used as a defined point. The heating elements as part of the steam generator are designed in terms of thermal design methodology adopted in the electroheating machine making. The calculation formulas of the running time ratios of the steam generator with various heating elements and energy efficiencies have been obtained in terms of galvanic cell theory.

Results. It has been shown that glycerol vapor itself cannot affect the HFTD current. For the HFTD excitation, the microwave region has been chosen. In cooperation with activating additives to the discharge plasma, this factor also adds to the HFTD current increase. Hence, the HFTD catalytic performance depends not only on the HFTD energy and its excitation field frequency but on the glycerol-dissolved additives as well. A special design has been developed for the heating element as part of a small-size steam generator. Reference tables have been composed, enabling one to pick up a proper diameter and number of parallel connected wires in the spiral coil.

Conclusion. A good use of glycerol vapor as a base for vaporous fluxes and activating additives to the HFTD working gas has been shown. The developed design technique concerning the heating element of the steam generator optimizes its heating circuit. Specifically, it enhances the steam generation and reduces the power consumption of the steam generator running on the galvanic cell. Second, it makes it possible to use stainless-steel spiral heating coils in regime of automatic temperature control.

Key words: *schooping, torch discharge, vaporous fluxes, activation of surfaces, coating deposition, steam generator, multi-wire spiral coil resistance, surface power.*