

ния» / Пещерова Татьяна Николаевна; Московск. гос. технол. ун-т «Станкин». – Москва, 2007. – 26 с. 3. Ковачич Л. Склеивание металлов и пластмасс. – М.: Химия, 1985. – 240с.

Поступила в редколлегию 01.09.2010

**УДК 621.9.048.4**

**Л. Ф. ГОЛОВКО**, проф., докт. техн. наук, НТУУ „КПІ”, м. Київ  
**В. І. НОСУЛЕНКО**, проф., докт. техн. наук, КНТУ, м. Кіровоград  
**О. С. ЧУМАЧЕНКО**, доц., канд. техн. наук, КНТУ, м. Кіровоград

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ**

Описано якісні і кількісні характеристики джерел тепла електрофізичних методів розмірної обробки металів і на цій підставі визначені області їх раціонального застосування. Динамічний тиск середовища – це керуючий чинник, що визначає енергетичні і технологічні характеристики відомих різновидів електричних розрядів, які застосовують для металообробки. Стационарні і нестационарні електричні розряди, маючи однакову фізичну природу, відрізняються тривалістю.

Описаны качественные и количественные характеристики источников тепла электрофизических методов размерной обработки металлов и на этом основании определены области их рационального применения. Динамическое давление среды – это управляющий фактор, который определяет энергетические и технологические характеристики известных разновидностей электрических разрядов, которые применяют для металлообработки. Стационарные и нестационарные электрические разряды, имея одинаковую физическую природу, отличаются длительностью.

**Вступ.** Електрофізичні методи розмірної обробки металів (ЕФ), засновані на використанні для локального руйнування металу висококонцентрованих джерел тепла, отримали широке застосування і продовжують розвиватись все більш інтенсивно. До них належать лазерна обробка (ЛО), електроннопроменева обробка (ЕП) та процеси електророзрядної обробки (ЕРО), серед яких [1] електроіскровка (електроімпульсна) (ЕІ), електромеханічна обробка (ЕМ) та наближена до неї анодно-механічна (АМ), розмірна обробка електричною дугою (РОД), а також плазмова обробка (ПО). Технологічні можливості цих процесів визначаються якісними та кількісними характеристиками їх джерел тепла, що визначає області раціонального застосування цих процесів. Опишемо якісні та кількісні характеристики джерел тепла в умовах зазначених процесів в їх порівнянні і на цій основі опишемо технологічні можливості та області їх раціонального застосування. Для реалізації процесу руйнування металу необхідні концентрації енергії в таких джерелах тепла мають бути близькими до енергії зв'язку структури твердого тіла – для металів це  $10^3 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> [2, с. 78].

Лазерна обробка, при якій носієм енергії є електромагнітна хвиля, та якщо виходити з поверхневої густини потоку енергії (до  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>), можливостей керування лазерним променем і можливостей реалізації процесу в найрізноманітніших умовах, отримала і надалі буде отримувати все більш широке застосування для розмірної обробки металів.

Електроннопроменева обробка, коли носієм енергії є заряджені частки, а гу-

стина потоку енергії досягає  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> [3, с. 5], забезпечує широкі технологічні можливості в умовах розмірної обробки металів. Проте цей процес не отримав помітного практичного застосування [2, с. 3...4] внаслідок високої вартісті обладнання, високої кваліфікації обслуговуючого персоналу, складності засобів безпеки. Окрім того застосування лазера дозволяє вирішити аналогічні технологічні задачі не в вакуумі, що значно спрощує процес.

Процеси ЕРО мають більш високу економічну ефективність порівняно з іншими електрофізичними методами металообробки та мають широкі можливості регулювання концентрації енергії. Процеси ЕРО, що включають ЕІ, ЕМ, РОД та ПО, реалізують електричні розряди, що мають єдину фізичну природу – це те, що називають електричним дуговим розрядом або, інакше і що те ж, електричною дугою [1]. Саме це об'єднує ці процеси, робить їх схожими і дозволяє розглядати їх в єдності, взаємозв'язку і взаємозалежності, зокрема, як альтернативу традиційним процесам обробки металів різанням і тиском.

Покажемо, що нестационарні електричні розряди мають із стаціонарною дугою єдину фізичну природу – це те, що прийнято називати електричним дуговим розрядом. Для цього достатньо звернутись до числених, але несистематизованих літературних даних.

**Спільна фізична природа іскрових та дугових розрядів.** Всі відомі різновиди ЕРО реалізують електричні розряди тривалістю  $t_i > 10^{-7}$  с [4, с. 25]. “З даних, що маємо, видно, що після 1 мкс і більш іскра стає квазістабільною і отримує багато рис, характерних для сталого дугового розряду” [5, с. 104]. “Іскру можна представити як нестационарну електричну дугу, яка гасне через відносно короткий час лише внаслідок того, що джерело живлення не в змозі жити дугу струмом достатньо тривалий час” [6, с. 17]. “Можна вважати, що після  $10^{-5}$ ... $10^{-4}$  с від початку розряду між електродами його параметри за інших рівних умов набувають значень, характерних для дуги, що горить скільки завгодно довго” [7, с. 10]. “М. Н. Соболев показав, що напруга розряду стає типово дуговою і сталою після  $10^{-6}$  с після його початку” [7, с. 9-10]. Нагадаємо, що “типово дуговий розряд” характеризується силою струму більше  $\sim 1$  А і сумарним значенням катодного і анодного падінь напруги  $U_{e+\dot{a}} \approx 10...20$  В. Саме це є необхідною і достатньою умовою, щоб вважати електричний розряд “типово дуговим”. Але саме цими параметрами характеризуються нестационарні електричні розряди в умовах ЕРО [8, с. 12-15, 10]. Це, зокрема, означає, що основні закономірності протікання стаціонарної дуги, певною мірою, справедливі і для нестационарної дуги.

**Динамічна взаємодія розрядів із середовищем.** Відміни електричних розрядів в умовах реалізації різноманітних процесів ЕРО – це лише різні форми динамічної (механічної) взаємодії дуги з поперечним до стовпа дуги потоком середовища-діелектрика, динамічний тиск  $P_d$  якого на стовп дуги і визначає енергетичну структуру дугового розряду. При РОД дуга протікає в поперечному потоці середовища-діелектрика в умовах однобічного динамічного тиску потоку на стовп дуги. При ЕМО однобічний поперечний до стовпа дуги потік середовища-діелектрика створюється рухомими електродами, які звичайно обертаються. При ЕІ і при реалізації нестационарних електричних розрядів, взагалі, динамічна взаємодія дуги з поперечним потоком середовища-діелектрика досягається в умо-

вах змінного в часі всебічного рівномірного стиснення стовпа дуги при розширенні каналу розряду, коли останній “набігає” на нерухоме середовище-діелектрик, стискуючи його. В плазмотронах ефект всебічної, постійної, рівномірної, поперечної до стовпа дуги динамічної дії потоку середовища-діелектрика досягається за рахунок обмеження площі поперечного перерізу каналу розряда соплом плазмотрона із додатковою динамічною дією потоку на стовп дуги за рахунок прокачування через сопло середовища-діелектрика.

Згідно викладеного, в умовах реалізації різних процесів ЕРО при заданому  $P_d$  енергетична структура розрядів повинна співпадати і такі джерела тепла для ЕРО можуть розглядатися як рівноцінні. Дійсно, якщо порівняти, енергетичні характеристики дуги в умовах РОД [9] і енергетичні характеристики нестационарного розряду в умовах відомих способів ЕЮ [10, с. 12-15], то виявляється, що це саме так. Проте, існують і відмінності. Відрізняються і технологічні можливості цих джерел тепла. При протіканні нестационарного електричного розряду його енергетичні характеристики змінюються в широких межах. Напруженість електричного поля в стовпі розряду може змінюватися від 4 до 0,1 кВ/см. В умовах РОД енергетичні характеристики стаціонарного електричного розряду стабільні і незалежно від сили струму напруженість електричного поля в стовпі дуги становитиме близько 3 кВ/см. Однак з погляду фізичної суті явища – це одне і те ж, це – електричний дуговий розряд відповідних енергетичних характеристик. Можна сказати, що електрична іскра – це дуга з енергетичними характеристиками, що змінюються в часі, або, що дуга в умовах РОД – це тривала іскра.

Так за енергетичними характеристиками і ефектом теплової дії на метал, наприклад по величині зони термічного впливу, стаціонарна дуга в умовах РОД відповідає нестационарному (іскровому, імпульсному) електричному розряду в умовах ЕІ. Але, що ж до останнього, має важливу перевагу – вона забезпечує стабільні енергетичні характеристики, які легко регулюються незалежно від сили струму, а значить забезпечують як якісну, так і кількісну сторону процесу обробки в значно ширшому діапазоні режимів, починаючи від грубого розмірного плавлення і до найтоншого розмірного випаровування, зокрема, дозволяє реалізувати високопродуктивну обробку (десятки тисяч мм<sup>3</sup>/хв) на великій силі струму (сотні і тисячі ампер) при високій якості обробки і глибині зони термічного впливу в межах сотих доль міліметра або навіть практично при її відсутності.

Опишемо кількісні та якісні характеристики електричної дуги як джерела тепла для ЕРО.

Дугу, як відомо [1], розглядають як суму трьох джерел тепла (рис. 1), що діють, в катодній області, анодній області і стовпі дуги при напрузі дуги  $U_d$  та її довжині  $L_d$ . Схема трьох джерел тепла в дузі дає можливість так представити дугу: одне джерело тепла потужністю  $P_k$  розташовано в плоскому шарі товщиною  $L_d$  на поверхні катода при падінні напруги  $U_k$ , друге потужністю  $P_a$  – в плоскому шарі товщиною  $L_a$  на поверхні анода при падінні напруги  $U_a$ , і третє потужністю  $P_c$  розташоване по об'єму стовпа дуги на довжині  $L_c$  при падінні напруги  $U_c$ . Схема трьох джерел тепла в дузі дозволяє розглядати її і досліджувати як єдність трьох різних за енергетичними характеристиками джерел тепла – катодного, анодного і стовпа дуги, кожне з яких в межах своєї області визначається одно-

рідними енергетичними характеристиками.

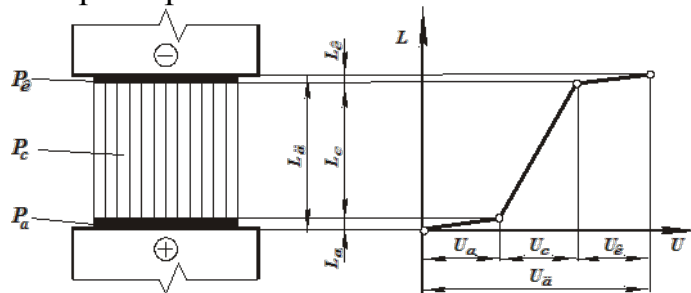


Рис. 1. Схема електричної дуги як джерела тепла

Для оцінки дуги як джерела тепла скористаємося такою характеристикою як об'ємна густина теплової потужності на ділянках кожного з трьох зазначених джерел тепла, яка може бути визначена за формулою:

$$K = Ej, \quad (1)$$

де  $K$  – об'ємна густина теплової потужності, Вт/см<sup>3</sup>;  $E$  – напруженість електричного поля, В/см;  $j$  – густина сили струму, А/см<sup>2</sup>.

Відповідно до рівняння (1) приелектродні області (катодна і анодна) внаслідок дуже високої напруженості електричного поля є потужними концентрованими плоскими джерелами тепла, тоді як стовп дуги є значно менш концентрованим об'ємним джерелом тепла.

При цьому якісні характеристики (якість) джерела тепла на катоді визначає можливість і якісну сторону процесу ерозії (обробки) катода, а якісні характеристики (якість) джерела тепла на аноді – можливість і якісну сторону процесу ерозії (обробки) анода. Порівняльна кількісна і якісна оцінки джерел тепла на катоді і аноді, у свою чергу, дозволяють встановити доцільну полярність електричної ерозії, оскільки, як відомо, ефект електричної ерозії полярний.

Стовп дуги в процесі безпосередньої обробки суттєвої ролі не відіграє. Проте, енергетичні процеси в стовпі дуги визначають енергетичні процеси на електродах і, зокрема, об'ємну густину теплової потужності в катодному і анодному джерелах тепла, а отже можливість і якісну сторону процесу обробки. Тому енергетичні характеристики стовпа дуги, що характеризуються, в першу чергу, напруженістю електричного поля і густиною сили струму і які є функцією динамічного тиску потоку, є параметрами процесу, які визначають в кінцевому підсумку, можливість і якісну сторону процесу обробки. В умовах процесів ЕРО електричні розряди мають чіткі оптичні межі, що дозволяє надійно визначати їх геометричні параметри, а значить густину сили струму і напруженість електричного поля.

Якість катодного і анодного джерел тепла на електродах може бути охарактеризовано поверхневою густиною теплової потужності (добуток густини сили струму на падіння напруги відповідно в катодному і анодному джерелах тепла, Вт/см<sup>2</sup>), оскільки при протіканні дуги в поперечному потоці рідини сумарна товщина катодної і анодної областей в діапазоні досліджених режимів для сталевих електродів складає, за нашими даними, всього лише 0,3...0,6 мкм і тому такі джерела тепла можна розглядати як плоскі.

Густину сили струму в описаних дугах визначено [11, рис. 6]; вона є переважно функцією динамічного тиску потоку, в 5...10 разів перевищує густину си-

ли струму у відкритих дугах на повітрі і збільшується (зменшується) зі збільшенням (зменшенням) динамічного тиску потоку рідини і досягає 40...50 кА/см<sup>2</sup>. Сумарне значення катодного і анодного падіння напруги ( $U_{к+а}$ ) коливається в межах 12...22 В [11].

Отже поверхнева густина теплової потужності катодного і анодного джерел тепла в діапазоні досліджених режимів досягає  $5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, що в десятки разів перевищує значення для відкритих дуг на повітрі. Нагадаємо також, що згідно закону Джоуля-Ленца кількість тепла, що виділяється в цих джерелах тепла, пропорційна квадрату густини сили струму. Все це підтверджує можливість реалізації процесу обробки в умовах РОД в найширшому діапазоні режимів.

Зазначимо, що якість катодного і анодного джерел тепла на електродах є функцією часу навіть в межах одного елементарного ерозійного акту, коли дуга практично нерухома. Щоб переконатись в цьому, звернемося до типової осцилограми напруги  $U$  і сили струму  $I$  (рис. 2), записаної на режимах “стійкий процес – зближення електродів до короткого замикання – розмикання електродів – стійкий процес”.

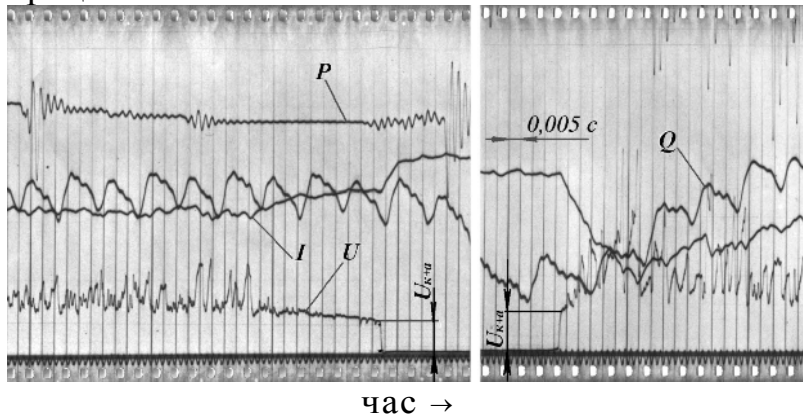


Рис. 2. Осциллограма процесу РОД:  $I$  – сила струму;  
 $U$  – напруга;  
 $P$  – статичний тиск робочої рідини;  $Q$  – розхід  
робочої рідини

Осцилограма показує, що напруга і сила струму в часі постійно змінюються. Це пов'язано, передусім, із процесами, що відбуваються на електродах в області катодного і анодного джерел тепла, коли нестационарний процес поширення тепла від цих плоских джерел супроводжується нагрівом, плавленням і випаровуванням матеріалу електродів і, відповідно, збільшенням

напруги в областях катодного і анодного джерел тепла на дузі, що, таким чином, перетворює ці плоскі джерела на об'ємні і, по суті, значно, в 1,5...2 рази і більше, збільшує їх теплову потужність, сприяючи більш інтенсивному протіканню процесу ерозії.

Як наслідок глибину, структуру і твердість зони термічного впливу (рис. 3, а) легко регулюють за рахунок зміни динамічного тиску потоку робочого середовища [9] і при збільшенні останнього до відповідних значень незалежно від сили струму ця зона може практично повністю бути відсутня (рис. 3, б).

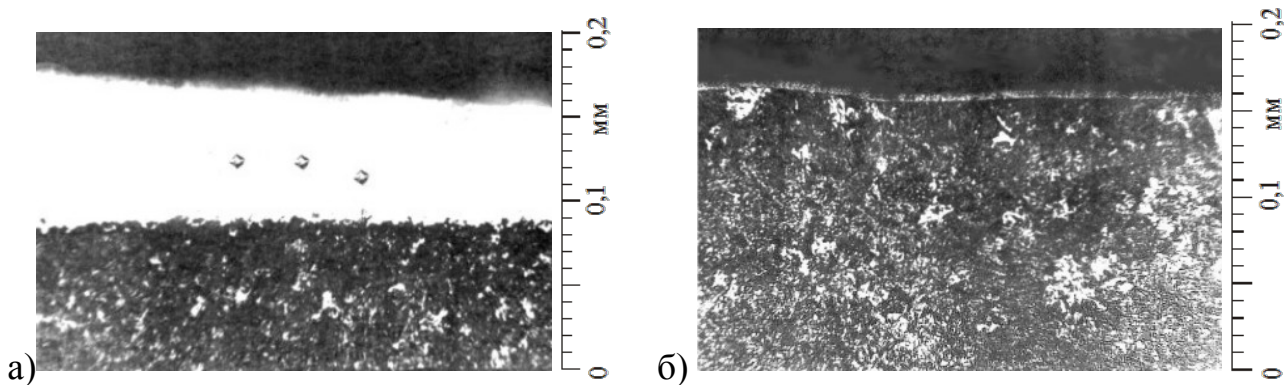


Рис. 3. Мікроструктури поверхні загартованих зразків зі сталі У8 після РОД

Технологічні можливості електричних розрядів при ЕРО визначаються можливостями і діапазоном регулювання енергетичних характеристик дуги і можливостями реалізації технологічних схем формоутворення. В сукупності процеси ЕРО забезпечують регулювання енергетичних характеристик дуги в широкому діапазоні режимів. Кожен із способів ЕРО має свої обмеження, технологічні можливості і свою сферу застосування. Процеси ЕІ забезпечують високу точність розмірів і високу якість поверхні, але мають низьку продуктивність і незамінні, коли неможливе прокачування робочої рідини (обробка малих отворів). Процеси ПО ефективні при розкрії листового металу, якщо до одержуваних виробів не пред'являються підвищені вимоги відносно точності і якості різі. ЕМ можлива і доцільна при обробці виробів типу тіл обертання із важкооброблюваних матеріалів. РОД оптимально поєднує кількісні і якісні характеристики процесу (максимально високу продуктивність і якість обробки) і дозволяє реалізувати всі відомі технологічні схеми формоутворення із прокачуванням робочої рідини.

В умовах РОД геометричні і енергетичні характеристики дуги та технологічні характеристики процесу описуються в функції параметрів сили струму і динамічного тиску  $P_d$  і можуть бути представлені простим співвідношенням:

$$y = kI^\alpha P_d^\beta, \quad (2)$$

де  $y$  – будь-який технологічний показник (характеристика) процесу, наприклад, продуктивність, шорсткість, глибина зони термічного впливу та інші;  $k$  – коефіцієнт розмірності;  $I$  – сила струму, А, приймається в межах від декількох ампер до декількох тисяч ампер, визначає продуктивність обробки і таким чином, по суті, відображає кількісну сторону процесу;  $P_d$  – динамічний тиск потоку, Па, вибирається в межах від 1...2 кПа до 1 МПа і більш, визначає якість обробки (шорсткість, глибину зони термічного впливу, точність) і таким чином, по суті, відображає якісну сторону процесу;  $\alpha$  і  $\beta$  – показники степеню, різні для різних технологічних характеристик.

Згідно співвідношення (2) в умовах РОД можливо ввести в зону обробки, практично, будь-які потужності, від найменших до найбільших, забезпечити будь-яку доцільну продуктивність, і при цьому реалізувати обробку в найширшому діапазоні режимів, від розмірного плавлення до тонкого розмірного випаровування при відповідній зміні якості обробки незалежно від сили струму. Досягаєть-

ся це мобільно, в потрібний час, в потрібному місці простим регулюванням та  $P_d$ .

Згідно викладеного, процеси ЕРО порівняно з обробкою різанням і тиском мають такі переваги:

1) електроенергія не перетворюється на силову, а використовується в зоні обробки, виконуючи відповідну операцію в потрібному місці, в потрібний час і з необхідними якістю, продуктивністю і точністю обробки; при РОД продуктивність і якість обробки змінюють регулюванням сили струму і динамічного тиску потоку робочої рідини, отже верстат стає простим і дешевим, а процес – мобільним;

2) обробку здійснюють без механічних зусиль на інструмент і заготовку;

3) інструмент простіший, ніж різець, свердло, протяжка, штамп;

4) продуктивність обробки не залежить від твердості і в'язкості оброблюваного металу, що важливо при зростаючому застосуванні важкооброблюваних матеріалів;

5) широкі можливості реалізації різноманітних технологічних схем формоутворення як непрофільованим, так і, особливо, профільованим електродом, зокрема, копіювання форми електрода на поверхню заготовки при простому поступальному русі електрода, що дозволяє отримати аналогічно процесу штампування різноманітні отвори, порожнини, стержні і інші вироби складної форми; 6) можливо виконувати ряд технологічних операцій, які не можуть бути виконані іншими методами обробки, наприклад різноманітні глибокі отвори у важкооброблюваних матеріалах.

Переваги технологій, простота реалізації, досягнутий рівень розробок роблять сукупність процесів ЕРО вискоефективною альтернативою традиційним процесам обробки різанням і тиском як в інструментальному і інших елітних виробництвах, так і в основному виробництві для виготовлення серійних деталей.

Це означає, що металообробка отримала якісно новий, вискоефективний, універсальний, з надзвичайно широкими технологічними можливостями „інструмент” обробки, що представляє джерело тепла у вигляді електричного дугового розряду найрізноманітніших форм його прояву, який дозволяє:

– реалізувати практично всі можливі технологічні схеми формоутворення;

– забезпечує оптимальне поєднання кількісних і якісних характеристик процесу обробки;

– все це порівняно з процесами обробки різанням і тиском, реалізується простішими засобами (технікою і інструментом). Це означає, що в металообробці на зміну “ери сили” приходять “ера тепла”.

Так прогрес металообробки переходить “з вістря різця” на “кромку електрода” і, таким чином, об’єктивно, ЕРО – це наступний етап розвитку металообробки.

**Висновок.** Таким чином, процеси ЕРО, що включають ЕІ, ЕМ, РОД та ПО і засновані на використанні електричного дугового розряду, при густині потоку енергії до  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> забезпечують регулювання енергетичних характеристик дуги в широкому діапазоні технологічних режимів. Переваги цих технологій роблять процеси ЕРО ефективною альтернативою процесам обробки різанням і ти-

ском. ЕРО – це наступний етап розвитку металообробки, коли на зміну „ери сили” приходять „ера тепла”. Процес РОД став стрибком, якісно новим етапом розвитку металообробки в цілому, оскільки викладені переваги процесів ЕРО стало можливим реалізувати повною мірою після появи РОД.

**Список літератури:** 1. Носуленко В. И. О физической природе, общем, отличиях и технологических возможностях электрических разрядов и классификации способов электроразрядной обработки металлов // Электронная обработка материалов, Кишинев, 2006, № 1. – С. 8-18. 2. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с. ил. 3. Артамонов Б. А., Волков Ю. С., Дрожалова В. И. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учеб. пособ.(в 2-х томах). Т. 2 Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии / Под ред. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983. – 208 с. ил. 4. Лившиц А. Л. и др. Электроимпульсная обработка металлов. М.: Машиностроение, 1967. 5. Сомервилл Дж. М. Электрическая дуга. Пер. с англ. “Госэнергоиздат”, 1962. 6. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 7. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 8. Золотых Б. Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде: Автореф. дис. докт. техн. наук/МИЭМ – М., 1968. 9. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов, 2005, № 1. – С. 8-17. 10. Золотых Б. Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде: Автореф. дис. докт. техн. наук/МИЭМ – М., 1968. 11. Носуленко В. И. Электрическая дуга в поперечном потоке среды-диэлектрика как источник тепла для новых технологий // Электронная обработка материалов, 2005, № 2. – С. 26-33.

*Поступила в редколлегию 02.09.2010*

**УДК 622.65**

**В. Г. НЕНЯ**, канд. техн. наук, доцент, СумДУ, г. Сумы  
**С. О. ХОВАНСЬКИЙ**, аспірант, СумДУ, г. Сумы

### **ОЦІНКА ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ НЕСТАЦІОНАРНОЮ РОБОТОЮ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА**

Запропонована математична модель робочого процесу відцентрового насосу як сукупність залежностей напору насоса, потужності та моменту на приводному валу від змінної у часі подачі насоса. Виконано оцінку витрат енергії, яка пов'язана із неусталеними режимами роботи насоса на гідравлічну мережу.

Предложена математическая модель рабочего процесса центробежного насоса как совокупность зависимостей напора насоса, мощности и момента на приводном вале от изменяющейся во времени подачи насоса. Выполнена оценка затрат энергии, связанных с неустановившимися режимами работы насоса на гидравлическую сеть.

**Вступ.** Населення міст забезпечуються водою за допомогою трубопровідних мереж з відцентровими насосами, на привод яких витрачається значна кількість електричної енергії. В сучасних умовах ринкового господарювання раціональне та економне використання енергетичних ресурсів є незаперечною умовою. Водоспоживання у житлово-комунальному господарстві має складний характер, експериментальними дослідженнями встановлено, що у середньому щохвилини подача