

mobile type and be used for purification and disinfection of sewage waters of different origins and in different amounts. The cost of treatment of water by using this technology does not exceed that by using traditional methods. *Bibl. 10, Fig. 5, Table 4.*

**Key words:** volumetric-scattered plasma-arc discharge, bubble liquid, purification, radioactive nuclides.

### References

1. Bykov A.A. Investigation of gas-liquid flows and characteristics of electric discharge in the processes of purification of industrial and domestic sewage waters : Abstract of theses for candidate of technical science, Moscow, 2011, 24 p. (Rus.)
2. Aristova N.A., Piskarev I.M. Ozone-hydroxyl mixture generators and their application. Moscow, 2005, 26 p. (Preprint of the Institute of Nuclear Physics of Moscow State University, 2005-15/781. (Rus.)
3. Petrov S.V., Homma M. Plasma cleaning of contaminated waters. *Avtomaticheskaya Svarka*, 2012, (6), pp. 58–59. (Rus.)
4. Nikiforov A.S., Kulichenko V.V., Zhykharev M.I. Neutralisation of liquid radioactive wastes. Moscow : Energoatomizdat Publ., 1985, 183 p. (Rus.)
5. Technological and organizational aspects of treatment of radioactive waste. Vienna : International Atomic Energy Agency, 2005, 220 p. (Rus.)
6. Andryushin I.A., Yudin Yu.A. Review of problems in treatment of radioactive waste and spent nuclear fuel. Saratov: RFNC-VNIIEF Publ., 2010, 119 p. (Rus.)
7. Seida V.A., Tsyvun A.P. Problems in treatment of radioactive wastes at Chornobyl NPP. *Problems of the Chornobyl exclusion zone*, 2012, iss. 10, pp. 40–53.
8. Nigmatulin R.I. Dynamics of multiphase media. Moscow : Nauka Publ., 1987, 1, 459 p. (Rus.)
9. Petrov S.V., Bondarenko S.G., Rubets D.I., Savanchuk O.V., Yanyuk V.A. Modelling of behaviour of an air bubble in the stationary arc discharge field. *East-European Journal of Advanced Technologies*, 2013, (3/5), pp. 73–78. (Rus.)
10. Mikheikin S.V. Cleaning of soil by the hydroseparation method. *Bezopasnost okruzhayushchei Sredy*, 2006, (3), pp. 48–50. (Rus.)

Received September 16, 2013

УДК 546.212:621.35

**Бордун І.М., канд. фіз.-мат наук, Пташник В.В., аспірант**

**Національний університет «Львівська політехніка»**

*вул. Князя Романа, 5, 79005 Львів, Україна, e-mail: bordun.igor@gmail.com*

## Контроль струму як метод визначення глибини електрохімічної активації водних розчинів

Проаналізовано різні методики визначення глибини активації під час електрохімічної обробки водних розчинів. Показано, що під час активації таких розчинів у стаціонарному електролізері спостерігається характерна залежність сили струму від часу. Встановлено, що характер зміни сили струму корелює зі зміною водневого показника рН та електропровідністю продуктів електролізу. Це дозволяє визначити глибину активації за зміною сили струму. *Бібл. 16, рис. 2.*

**Ключові слова:** електропровідність води, електрохімічна активація, глибина активації.

Електрохімічна активація (ЕХА) водних розчинів є перспективним напрямком вдосконалення існуючих технологій водопідготовки для забезпечення їхньої екологічності та ресурсощадності, оскільки дозволяє відмовитися від використання хімічних реагентів для зміни властивостей водних розчинів [1]. Різноманітність технологічних застосувань [2, 3] забезпечується унікальним поєднанням окислювальних та відновлювальних, каталітичних та біокаталітичних властивостей ЕХА розчинів з непропорційно малим вмістом діючих речовин. Ще одна особливість активова-

них розчинів полягає у тому, що їхні властивості з часом змінюються, релаксуючи до певного стабільного значення [4, 5]. Метастабільність властивостей вимагає враховувати вихідний стан та часовий проміжок від отримання до використання ЕХА розчинів. Релаксаційні процеси у ЕХА розчинах вже у якійсь мірі вивчені, але контроль за глибиною активації залишається на слабо дослідженому рівні.

Це зумовлено, насамперед, складністю опису процесів, які відбуваються під час ЕХА та невизначеністю механізмів активації водного

розчину. Наприклад, у роботі [6] описано гіпотезу про електрон-радикальну дисоціацію активованої води та зміни її каталітичних властивостей. Однак, у роботі [7] приведено спростування цього механізму, оскільки у [6] не враховано енергію гідратації іона гідроксиду. Аналогічні труднощі виникають при поясненні причин біологічної дії метастабільних продуктів ЕХА [8]. Таким чином, більш широке застосування ЕХА розчинів обмежується існуючими методами прогнозування їх властивостей та контролю самого процесу активації.

Контроль ЕХА, а саме: інтенсивності чи глибини процесу, можна здійснювати, контролюючи певні фізичні чи хімічні параметри. Аналізу існуючих методів контролю ЕХА та розгляду можливості використання контролю сили струму як методу визначення глибини ЕХА водних розчинів у стаціонарному електролізері з постійною напругою на електродах присвячена ця робота.

Дослідження проводилися у стаціонарному (непроточному) діафрагмовому електрохімічному активаторі, виготовленому з органічного скла марки ТОСП. Як електроди були використані графітові пластини, розділювальною мембраною були 4 шари поліпропілену нетканого марки FS 2226-14Е. ЕХА водних розчинів здійснювалася у потенціостатичному режимі за допомогою джерела стабілізованої напруги ПСИП-500.

Для визначення значення сили струму, що проходить крізь електролізер, використовувався цифровий амперметр Pro'sKit MT-1820. Вимірювання питомої електропровідності аноліту та католіту проводилося з використанням комбіметра СОМ-100 з платинованими електродами. Вимірювання водневого показника рН

виконувалися з використанням рН-метра рН-301 з комбінованим скляним електродом ЭСК-10601/7 (ГОСТ 22261-94) та автоматичним температурним компенсатором ДТ-1000-1.

Для досліджень використовувалася водопровідна вода у відповідності до [13], а також розчини КСl, NaCl, NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>Cl, концентрацією 0,001 та 0,0001 моль/л, отримані з використанням солей марки ОСЧ.

Зміну сили струму, температури у камерах реактора, водневого показника рН, та електропровідності аноліту та католіту під час ЕХА водопровідної води показано на рис.1. Пояснення отриманих залежностей вимагає аналізу процесів, що відбуваються у ЕХА реакторі.

Водопровідна, як і природна, вода є складною багатокомпонентною динамічною системою, до складу якої входять гази, мінеральні та органічні речовини. Вуглекислий газ, розчинений у воді, частково реагує з її молекулами та утворює вугільну кислоту. Різні форми вугільної кислоти у водних розчинах пов'язані вуглекислотою рівновагою [9]: CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O ↔ H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ↔ H<sup>+</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ↔ 2H<sup>+</sup> + CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

Кількісні співвідношення між H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> визначаються значенням рН води. Під час прикладання електричного поля до водного розчину спостерігається протікання електрохімічних реакцій на катоді та на аноді.

На аноді протікає реакція 2H<sub>2</sub>O - 4 e<sup>-</sup> → O<sub>2</sub> + 4H<sup>+</sup>, яка спричиняє зменшення рН аноліту(рис.1, г). Зі зменшенням рН іони HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> поступово переходять у вільну вугільну кислоту, при рН 4 вони повністю зникають [9]. Отже, зменшення кількості іонів та структурні перетворення [10] призводять до зменшення провідності аноліту (рис.1, б). У катодній камері відбувається зростання значення рН (рис.1, г) внаслідок реакції 2H<sub>2</sub>O - 4 e<sup>-</sup> → H<sub>2</sub> + 2 OH<sup>-</sup>.

Зі зростанням рН католіту відбувається пом'якшення водопровідної води, оскільки у ній розчинені солі жорсткості [11]. Якщо добуток активності іонів Ca<sup>2+</sup> та CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> у воді перевищує добуток розчинності карбонату кальцію, то цей процес супроводжується утворенням твердої фази карбонату кальцію. Цей процес може бути визначальною причиною зменшення електропровідності католіту на ділянці графіку від 0 до 1000 с (рис.1, б). Зростання сили струму, що протікає крізь електролізер (рис.1, а), та електропровідності католіту (рис.1, б)

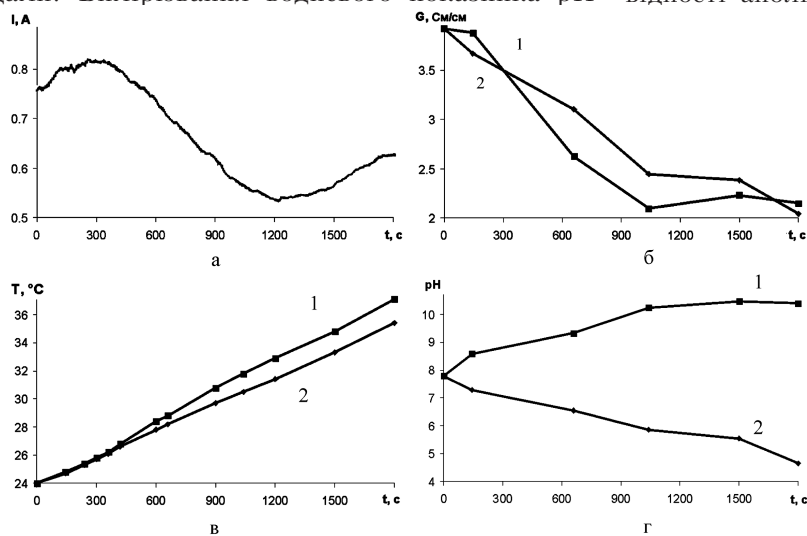


Рис.1. Зміна основних фізико-хімічних параметрів під час електрохімічної активації водопровідної води: сили струму (а); питомої електропровідності (б); температури (в); водневого показника (г); 1 – параметри католіту; 2 – параметри аноліту.

після 1000 с ЕХА водопровідної води найімовірніше спричинено використанням добре проникного матеріалу як діафрагми, внаслідок чого кислий розчин, який попадає з анодної камери у катодну, сприяє розчиненню  $\text{CaCO}_3$  у катоді [10].

У цих процесах, а також при перерозподілі іонів по камерах електрохімічного реактора спостерігаються зміни сили струму (рис.1, а), водневого показника (рис.1, г) та електропровідності (рис.1, б). Також при протіканні струму виділяється джоулеве тепло, що призводить до зростання температури у камерах електрохімічного реактора (рис.1, в).

Усі описані параметри, крім залежності сили струму від часу ЕХА, використовуються для аналізу стану активованого розчину. Автори роботи [12] контролюють якість ЕХА розчину за зміною електропровідності. Однак цей метод можна використовувати лише у випадку відносно низької мінералізації водного розчину, що активується. Крім того, для кожного розчину потрібно встановлювати свій критерій, оскільки електропровідність залежить не лише від концентрації, але й від типу іонів. Водночас електропровідність може змінюватися за рахунок хімічних перетворень, що ми, наприклад, спостерігали у катоді при часі активації більш 1000 с (рис.1, б). Аналогічні труднощі виникають під час контролю стану ЕХА води за значенням рН. Даний метод також описаний у [12], однак значення рН, яке слід приймати за точку завершення процесу активації, у цій роботі не наведено, ймовірно, тому, що цей показник для водопровідної води змінюється у широких межах — від 6,5 до 8,5 [13].

Температурний метод контролю, описаний у [14], дає змогу за зміною температури ЕХА розчину встановити момент завершення процесу активації. У разі дотримання вимог щодо початкової температури та мінералізації водного розчину використання цього методу забезпечить стабільність контрольованих параметрів аноліту та католіту. Справді, функція зростання температури близька до лінійної (рис.1, в) при допустимій мінералізації водопровідної води, однак такий метод контролю неефективний при роботі зі слабо мінералізованими розчинами або розчинами з підвищеною початковою температурою, що значно обмежує область застосування.

Таким чином, аналізуючи рис.1, бачимо, що контроль сили струму, що протікає через стаціонарний діафрагмовий електрохімічний реактор при постійній напрузі на електродах під час ЕХА, також може бути методом контролю глибини активації, оскільки характер кривої (рис.1, а) відображає фізико-хімічні перетворення у активованих розчинах. Цей метод дозволяє забезпечити оперативний контроль роботи електролізера та точно встановити момент часу завершення процесу активації — при досягненні мінімуму значення сили струму.

Оскільки у наукових цілях та для промислового застосування часто використовуються розчини різних солей, то нами було проведено дослідження зміни сили струму, показника рН, електропровідності та температури у камерах реактора у залежності від часу активації розчинів хлоридів, нітратів та карбонатів різних іонів. Типові залежності наведено на рис.2. Вибрана концентрація у 0,0001 моль/л показує, що залежність рН та залежність електропровідності є дуже нелінійними функціями, які відрізняються для кожної камери. А це утруднює контроль активації. Температура у камерах, як видно з рис.2, б, зростає на всьому проміжку ЕХА. Однак, на практиці у разі використання температури як параметра контролю процесу ЕХА необхідно застосовувати додаткові методи для визначення температури у момент завершення активації. Невирішеним є питання активації розчинів з підвищеними вихідними температурами. Водночас залежності сили струму для використаної у експерименті концентрації, а також

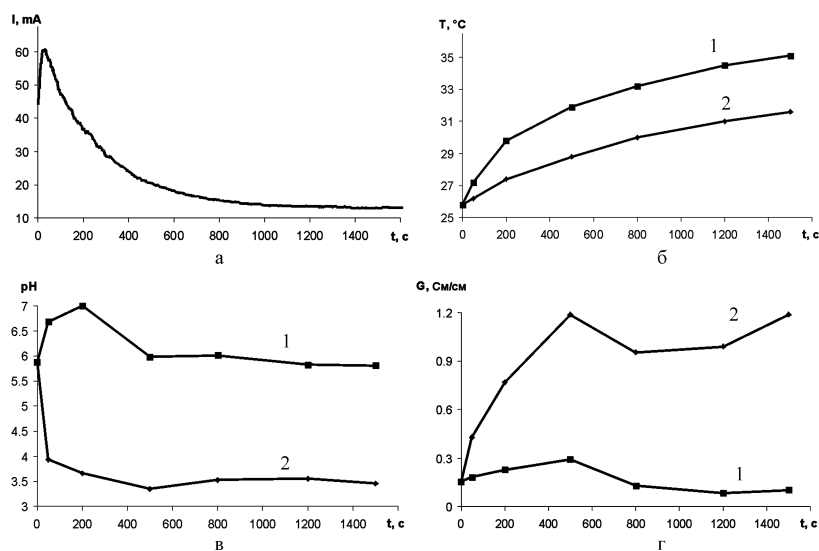


Рис.2. Зміна основних фізико-хімічних параметрів під час електрохімічної активації розчину  $\text{KCl}$  (0,0001 моль/л): сили струму (а), температури (б), водневого показника (в), питомої електропровідності (г): 1 — параметри катоду; 2 — аноліту.

для концентрації до 0,1–0,2 моль/л, що становить верхню межу концентрацій, для яких проявляються ефекти ЕХА [15], є однаковими та відрізняються лише за часом виходу на насичення, оскільки з ростом концентрації цей показник зменшується.

### Висновки

Проведені дослідження показали, що контроль сили струму, який протікає крізь стаціонарний електрохімічний реактор з постійною напругою на електродах, може бути оперативним методом контролю процесу ЕХА водних розчинів. Він не потребує використання супутніх методик чи розміщення додаткових елементів у камерах реактора та може бути технічно реалізованим сучасними електронними пристроями. Метод охоплює широку область концентрацій та температур водних розчинів, дозволяє встановити момент закінчення процесу активації [16], що дає можливість використовувати його як енергозберігаючий метод контролю глибини ЕХА.

### Список літератури

1. Бахир В.М. Электрохимическая активация : Ключ к экологически чистым технологиям водоподготовки // Водоснабжение и канализация. — 2012. — № 1–2. — С. 89–101.
2. Голохваст К.С., Рыжаков Д.С., Чайка В.В. Перспективы использования электрохимически активированных растворов // Вода : Химия и экология. — 2011. — № 2. — С. 23–30.
3. Yu-Ru Huang, Yen-Con Hung, Shun-Yao Hsu. Application of electrolyzed water in the food industry // Food Control. — 2008. — Vol. 19. — P. 329–345.
4. Петрушанко И.Ю., Лобышев В.И. Неравновесное состояние электрохимически активированной воды и ее биологическая активность // Биофизика. — 2001. — № 3. — С. 389–401.
5. Бордун І.М., Пташник В.В. Вплив глибини активації на релаксаційні процеси в електрохімічно ак-

- тивованій воді // Вісн. Черкас. держ. технол. ун-та. — 2013. — № 1. — С. 92–95.
6. Клосс А.И. Электрон-радикальная диссоциация и механизм активации воды // Докл. АН СССР. — 1988. — № 6. — С. 1403–1407.
  7. Лаврик Н.Л., Бажин И.М. О возможности образования в воде ОН-радикала из иона гидроксидила // Биофизика. — 2011. — № 3. — С. 574–576.
  8. Мирошников А.И. Исследование причин биологического действия электрохимически активированных растворов по изменению роста клеток *Escherichia Coli* // Там же. — 2004. — № 5. — С. 866–871.
  9. Кульский Л.А. Технология очистки природных вод. — Киев : Выща школа, 1986. — 356 с.
  10. Гончарук В.В., Маляренко В.В. Изменение свойств воды под влиянием электрохимической обработки // Химия и технология воды. — 2001. — № 4. — С. 345–353.
  11. Гончарук В.В., Чеботарева Р.Д., Багрич В.А. Умягчение воды в электролизере с керамической мембраной // Там же. — 2005. — № 5. — С. 460–470.
  12. Пат. на корис. модель 9995 Укр., МПК<sup>7</sup> С 02 F 1/46. Апарат для електроактивації рідин / Куртов В.Д., Косінов Б.В., Апуховський А.Й. — Опубл. 17.10.05, Бюл. № 10.
  13. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною : Затв. Міністерством охорони здоров'я України. — Київ, 2010.
  14. Пат. 49551 Укр., МПК<sup>6</sup> С 02 F 1/46. Спосіб одержання питної і лікувальної води / Апуховський А.Й., Куртов В.Д., Косінов Б.В. — Опубл. 16.09.02, Бюл. № 9.
  15. Бахир В.М., Задорожний Ю.Г., Леонов Б.И. и др. Электрохимическая активация : Универсальный инструмент зеленой химии. — Москва : ВНИИМТ, 2005. — 176 с.
  16. Пат. на корисну модель 73616 Укр., МПК<sup>6</sup> С 02 F 1/46. Спосіб оперативного контролю завершення процесу електрохімічної активації / Бордун І.М., Пташник В.В. — Опубл. 25.09.12, Бюл. № 18.

Надійшла до редакції 20.09.13

**Бордун І.М.**, кандидат фіз.-мат. наук, **Пташник В.В.**, аспірант  
**Национальный университет «Львовская политехника»**  
 ул. Князя Романа, 5, 79005 Львов, Украина, e-mail: bordun.igor@gmail.com

## Контроль тока как метод определения глубины электрохимической активации водных растворов

Проанализированы различные методики определения глубины активации при электрохимической обработке водных растворов. Показано, что при активации таких растворов в стационарном электролизере наблюдается характерная зависимость силы тока от времени. Установлено, что характер изменений силы тока коррелирует с изменением водородного показателя рН и электропроводности продуктов электролиза. Это позволяет определить глубину активации по изменению силы тока. *Бібл. 16, рис. 2.*

**Ключевые слова:** электропроводность воды, электрохимическая активация, глубина активации.



**Bordun I.M.**, Candidate of Physic and Mathematic Science,  
**Ptashnyk V.V.**, PhD Student

**Lviv Polytechnic National University**

5, Knjaska Romana St., 79005 Lvov, Ukraine, e-mail: bordun.igor@gmail.com

## Current Inspection as a Method of Water Solutions Electrochemical Activation Depth Testing

The different methods for determining the depth of activation during the electrochemical treatment of aqueous solutions were analyzed. It was shown that during the activation of such solutions in a stationary cell a specific time dependence of current was observed. It was found that the nature of changes in current correlates with the change in pH and conductivity of the electrolysis products. This allows to determine the activation depth by the change of current. *Bibl. 16, Fig. 2.*

**Key words:** water conductivity, activations depth, electrochemical activation.

### References

1. Bakhir V.M. Electrochemical activation: a key to environmentally friendly water conditioning technologies. *Vodosnabzhenie i kanalizacija*, 2012, (1–2), pp. 89–101. (Rus.)
2. Golohvast K.S., Ryzhakov D.S., Chajka V.V. Application potential of solution electrochemical activation. *Voda : Himija i Ekologija*, 2011, (2), pp. 23–30. (Rus.)
3. Yu-Ru Huang, Yen-Con Hung, Shun-Yao Hsu. Application of electrolyzed water in the food industry. *Food Control*, 2008, 19, pp. 329–345.
4. Petrushanko I.Yu., Lobyshev V.I. Nonequilibrium state of electrochemically activated water and its biological activity. *Biofizika*, 2001, (3), pp. 389–401. (Rus.)
5. Bordun I.M., Ptashnyk V.V. Impact of activation depth on relaxation processes in electrochemically activated water. *Visnyk Cherkas'kogo Derzhavnogo Tehnologichnogo Universytetu*, 2013, (1), pp. 92–95. (Ukr.)
6. Kloss A.I. Electron-radical dissociation and mechanism of water activation. *Doklady Akademii Nauk USSR*, 1988, (6), pp. 1403–1407. (Rus.)
7. Lavrik N.L., Bazhin N.M. On the impossibility of OH radical formation from the hydroxyl ion in water. *Biofizika*, 2011, (3), pp. 574–576. (Rus.)
8. Miroshnikov A.I. Study of the causes of the biological effect of electrochemically activated solutions as determined from changes in the Escherichia coli cell growth. *Biofizika*, 2004, (5), pp. 866–871. (Rus.)
9. Kul'skij L.A., Strokach P.P. Natural water treatment technology. Kiev : Vishha shkola, 1986, 352 p. (Rus.)
10. Goncharuk V.V., Maljarenko V.V. The change of the water properties under electrochemical treatment. *Himija i tehnologija vody*, 2001, (4), pp. 345–353. (Rus.)
11. Goncharuk V.V., Chebotareva R.D., Bagrij V.A. Softening of water in the electrolytic cell with a ceramic membrane. *Himija i tehnologija vody*, 2005, (5), pp. 460–470. (Rus.)
12. Pat. na korysnu model' 9995 Ukr., MPK7 C 02 F 1/46. Apparatus for liquids electroactivation, V.D.Kurtov, B.V.Kosinov, A.Yo.Apuhovs'kij. — Publ. 17.10.05, Bul. 10. (Ukr.)
13. Derzhavni sanitarni pravyla i normy 2.2.4-171-10. Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption : Ministerstvo ohorony zdorov'ja Ukrainy. Kharkov : Fort Publ., 2010, 39 p. (Ukr.)
14. Pat. 49551 Ukr., MPK6 C 02 F 1/46. Method of drinking and medical water development, A.Yo. Apuhovs'kij, V.D.Kurtov, B.V.Kosinov. — Publ. 16.09.02, Bul. 9. (Ukr.)
15. Bakhir V.M., Zadorozhnij Ju.G., Leonov B.I. Electrochemical activation: universal instrument of green chemistry. Moscow : VNIIMT, 2005, 176 p. (Rus.)
16. Pat. na korysnu model' 73616 Ukr., MPK6 C 02 F 1/46. Operative control method of the completion of the electrochemical activation process, I.M. Bordun, V.V.Ptashnyk. — Publ. 25.09.12, Bul. 18. (Ukr.)

Received September 20, 2013