

*К. С. РУТКОВСЬКА, Г. Г. ТУЛЬСЬКИЙ, В. П. ГОМОЗОВ, О. І. РУСІНОВ*

## **ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЗАСТОСУВАННЯ ГАЗОДИФУЗІЙНОГО КАТОДУ В ЕЛЕКТРОХІМІЧНОМУ СИНТЕЗІ РОЗЧИНІВ ГІПОХЛОРИТІВ**

Для удосконалення виробництва гіпохлориту натрію шляхом електролізу водного розчину хлориду натрію застосували газодифузійний електрод для реалізації деполяризації катодного процесу киснем повітря. У якості матеріалів для реалізації деполяризації катодного процесу на поруватому сітчастому струмопідводі були обрані: оксиди марганцю, оксиди кобальту, оксиди рутенію. Ці оксиди характеризуються низькою перенапругою в кисневій реакції. Оксиди обраних металів наносили на сітчастий струмопідвід методом термічного розкладу покриттів розчинів. Газодифузійний електрод складався з футерованого титанового струмопідводу, диспергатора газу з поруватого графіту і зовнішнього сітчастого робочого елемента, на якому і відбувались катодні реакції. Одержання каталітично активного шару оксиднометалевих покриттів здійснювалось методом термічного розкладання покриттів розчинів. Такий метод повністю відповідає вимогам, що пред'являються до малозношувальних оксиднометалевих електродів для електролізу водних розчинів хлориду натрію: можливість регулювання складу композиційного покриття в широкому діапазоні концентрацій компонентів. На вольт-амперних циклічних залежностях катодного процесу, для всіх досліджуваних матеріалів, спостерігаються визначені ділянки відновлення кисню та суміщеного відновлення кисню і виділення водню. Перша ділянка відновлення кисню спостерігається до рівноважних потенціалів водневої реакції (приблизно  $-0,42$  В). Швидкість відновлення кисню є невелика і складає  $3...5$  мА/см<sup>2</sup>. Різниця в ході вольт-амперної залежності не спостерігається через високу швидкість розгортки потенціалу, яка не призводить до збіднення розчину за киснем у випадку роботи катода без подачі повітря. На другій ділянці (при потенціалах, що є більш негативним за рівноважний потенціал водневої реакції) спостерігається значне зростання швидкості катодної реакції за рахунок виділення водню. Кисень, при цьому, відновлюється на граничній густині струму. На третій ділянці (більше за  $-1,5$  В) швидкість катодного процесу практично повністю визначається швидкістю виділення водню. Вплив подачі повітря в газодифузійний катод спостерігається при порівнянні зворотнього ходу циклічних вольт-амперних залежностей. На поверхні сталеві сітки спостерігається зростання струму зворотного ходу в діапазоні потенціалів  $-1,0$  до  $0$  В. Що вказує на збільшення адсорбованих часток, що приймають участь в катодному процесі. Як було показано раніше, цей діапазон потенціалів відповідає 1-й і 2-й ділянкам одержаних залежностей на яких відбуваються переважно відновлення кисню. Тому, зростання струму зворотного ходу, при потенціалах позитивніших за  $1,0$  В, можна пояснити впливом адсорбції кисню на поверхні газопроникнутих сітчастих сталевих катодів при подачі повітря. Додавання гіпохлорит-іону практично не впливає на густину струму на першій і другій ділянках вольт-амперних залежностей. Спостерігається зниження катодної густини струму при потенціалах, що є більш негативними від рівноважного потенціалу водневої реакції. Це вказує на певне гальмування процесу виділення водню. На третій ділянці густина струму теж зменшується. Це вказує на те, що гіпохлорит-іони у кількості  $0,08$  моль дм<sup>3</sup> не приймають участь у катодному відновленні. Рекомендованою густиною струму, для досліджуваної конструкції газодифузійного катода, є  $15$  мА/см<sup>2</sup> при температурі  $291...293$  К. Катодне відновлення гіпохлорит-іонів, за цих умов, знижується на  $55...60$  %.

**Ключові слова:** графітовий електрод, газодифузійний електрод, каталітичне покриття, активація, осадження, активні добавки.

*Е. С. РУТКОВСКАЯ, Г. Г. ТУЛЬСКИЙ, В. П. ГОМОЗОВ, А. И. РУСИНОВ*

## **ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОДИФУЗИОННОГО КАТОДА В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ РАСТВОРОВ ГИПОХЛОРИТОВ**

Для усовершенствования производства гипохлорита натрия путем электролиза водного раствора хлорида натрия применяли газодиффузионный электрод для реализации деполяризации катодного процесса кислородом воздуха. В качестве материалов для реализации деполяризации катодного процесса на пористом сетчатом токоподводе были выбраны: оксиды марганца, оксиды кобальта, оксиды рутения. Эти оксиды характеризуются низким перенапряжением кислородной реакции. Оксиды выбранных металлов наносили на сетчатый токоподвод методом термического разложения покровных растворов. Газодиффузионный электрод состоял из футерованного титанового токоподвода, диспергатора газа из пористого графита и внешнего сетчатого рабочего элемента, на котором и происходили катодные реакции. Получение каталитически активного слоя оксиднометаллических покрытий осуществлялось методом термического разложения покровных растворов. Такой метод полностью соответствует требованиям, предъявляемым к оксиднометаллическим электродам, которые незначительно изнашиваются, для электролиза водных растворов хлорида натрия: возможность регулирования состава композиционного покрытия в широком диапазоне концентраций компонентов. На вольт-амперных циклических зависимостях катодного процесса, для всех исследуемых материалов, наблюдаются определенные участки восстановления кислорода и совмещенного восстановления кислорода и выделения водорода. Первый участок восстановления кислорода наблюдается до равновесных потенциалов водородной реакции (примерно  $-0,42$  В). Скорость восстановления кислорода небольшая и составляет  $3...5$  мА/см<sup>2</sup>. Разницы в ходе вольт-амперной зависимости не наблюдается из-за высокой скорости развертки потенциала, которая не приводит к обеднению раствора кислородом в случае работы катода без подачи воздуха. На втором участке (при потенциалах, более отрицательных равновесных потенциалов водородной реакции) наблюдается значительный рост скорости катодной реакции за счет выделения водорода. Кислород, при этом, восстанавливается на предельной плотности тока. На третьем участке (более  $-1,5$  В) скорость катодного процесса практически полностью определяется скоростью выделения водорода. Влияние подачи

© Рутковська К. С., Тульський Г. Г., Гомозов В.П., Русінов О.І., 2020

воздуха в газодиффузионный катод наблюдается при сравнении обратного хода циклических вольт-амперных зависимостей. На поверхности стальной сетки наблюдается рост тока обратного хода в диапазоне потенциалов  $-1,0$  до  $0$  В. Что указывает на увеличение адсорбированных частиц, участвующих в катодном процессе. Как было показано ранее, этот диапазон потенциалов соответствует 1-й и 2-й участкам полученных зависимостей на которых происходит преимущественное восстановления кислорода. Поэтому, рост тока обратного хода, при потенциалах позитивнее  $1,0$  В, можно объяснить влиянием адсорбции кислорода на поверхности газопроницаемых сетчатых стальных катодов при подаче воздуха. Добавление гипохлорит-иона практически не влияет на плотность тока на первом и втором участках вольт-амперных зависимостей. Наблюдается снижение катодной плотности тока при потенциалах, более негативных от равновесного потенциала водородной реакции. Это указывает на определенное торможение процесса выделения водорода. На третьем участке плотность тока тоже уменьшается. Это указывает на то, что гипохлорит-ионы в количестве  $0,08$  моль·дм<sup>3</sup> не принимают участие в катодном восстановлении. Рекомендованная плотностью тока, для исследуемой конструкции газодиффузионного катода, составляет  $15$  мА/см<sup>2</sup> при температуре  $291...293$  К. Катодное восстановление гипохлорит-ионов, при этих условиях, снижается на  $55...60$  %.

**Ключевые слова:** графитовый электрод, газодиффузионный электрод, каталитическое покрытие, активация, осаждение, активные добавки.

**K. S. RUTKOVSKA, H. H. TULSKYI, V.P. GOMOZOV, A.I. RUSINOV**

### SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGICAL INDICATORS OF APPLICATION OF A GAS-DIFFUSION CATHODE IN ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS OF HYPOCHLORITE SOLUTIONS

A gas diffusion electrode was used to implement depolarization of the cathodic process with atmospheric oxygen to improve the production of sodium hypochlorite by electrolysis of an aqueous solution of sodium chloride. As materials for the implementation of depolarization of the cathode process on a porous cathode from the grid, we selected: manganese oxides, cobalt oxides, ruthenium oxides. These oxides are characterized by low overvoltage of the oxygen reaction. Oxides of selected metals were applied to a mesh current lead by thermal decomposition of coating solutions. The gas diffusion electrode consisted of a lined titanium current lead, a dispersant of gas made of porous graphite, and an external mesh working element, on which cathodic reactions occurred. The preparation of a catalytically active layer of oxide-metal coatings was carried out by thermal decomposition of coating solutions. This method fully complies with the requirements for oxide-metal electrodes for the electrolysis of aqueous solutions of sodium chloride: the ability to control the composition of the composite coating in a wide range of component concentrations. On the current-voltage cyclic dependences of the cathodic process, for all the materials studied, certain areas of oxygen reduction and combined oxygen reduction and hydrogen evolution are observed. The first section of oxygen reduction is observed to the equilibrium potentials of the hydrogen reaction (approximately  $-0.42$  V). The oxygen reduction rate is small and amounts to  $3...5$  mA/cm<sup>2</sup>. There is no difference in the current-voltage dependence due to the high potential sweep speed, which does not lead to oxygen depletion in the case of cathode operation without air supply. In the second section (at potentials, more negative equilibrium potentials of the hydrogen reaction), a significant increase in the rate of the cathodic reaction due to hydrogen evolution is observed. Oxygen, in this case, is reduced at the limiting current density. In the third section (more than  $-1.5$  V), the speed of the cathodic process is almost completely determined by the rate of hydrogen evolution. The effect of air supply to the gas diffusion cathode is observed when comparing the reverse stroke of cyclic current-voltage dependences. On the surface of the steel mesh, an increase in the reverse current is observed in the potential range  $-1.0$  to  $0$  V. Which indicates an increase in adsorbed particles involved in the cathodic process. As shown earlier, this range of potentials corresponds to the 1st and 2nd sections of the obtained dependences in which the predominant oxygen reduction occurs. Therefore, an increase in the reverse current, with potentials more positive than  $1.0$  V, can be explained by the effect of oxygen adsorption on the surface of gas-permeable mesh steel cathodes when air is supplied. The addition of hypochlorite ion has practically no effect on the current density in the first and second sections of the current - voltage dependences. A decrease in the cathodic current density is observed at potentials more negative from the equilibrium potential of the hydrogen reaction. This indicates a certain inhibition of the process of hydrogen evolution. In the third section, the current density also decreases. This indicates that  $0.08$  mol·dm<sup>3</sup> hypochlorite ions do not participate in cathodic reduction. Recommended current density for the studied design of the gas diffusion cathode is  $15$  mA/cm<sup>2</sup> at a temperature of  $291...293$  K. The cathodic recovery of hypochlorite ions, under these conditions, is reduced by  $55...60$  %.

**Keywords:** graphite electrode, gas diffusion electrode, catalytic coating, activation, deposition, active additives.

**Вступ.** Сучасні тенденції розвитку науки і техніки зумовлюють потребу в отриманні і дослідженні матеріалів з новими характеристиками для удосконалення існуючих електрохімічних виробництв і створення нових електрохімічних технологій. До електродних матеріалів в електрохімічних виробництвах гіпохлориту натрію пред'являється специфічні вимоги, які визначають показники якості продукту. При електрохімічному виробництві гіпохлориту натрію важливим напрямом вдосконалення процесу і зниження собівартості продукції є зниження питомих витрат електроенергії, підвищення селективності електродних процесів, підвищення стабільності і терміну

експлуатації електродів. Найбільш перспективним шляхом удосконалення виробництва гіпохлориту натрію шляхом електролізу водного розчину хлориду натрію є застосування кисневої (повітряної) деполяризації катодного процесу. Такий спосіб електролізу дає можливість отримувати більш високі концентрації водних розчинів гіпохлориту натрію при значно нижчих потенціалах катода, що має привести до різкого зниження напруги на електролізері в цілому [1–4].

У якості перспективних матеріалів для реалізації катодного процесу на поруватому сітчастому струмовідводі, що відповідають запитам практики, на особливу увагу заслуговують: оксиди марганцю, оксиди

кобальту, оксиди рутенію [5–8]. Ці оксиди характеризуються низькою перенапругою в кисневій реакції.

Для дослідження кінетичних параметрів електрохімічного відновлення молекулярного кисню використовували газодифузійний електрод з однаково доступною поверхнею. Важливим моментом є рівномірний розподіл матеріалів активаторів по поверхні газодифузійного електрода. Найбільш рівномірний розподіл дозволяє отримати метод просочення газодифузійного електрода розчинами, що містять солі металів-активаторів, з подальшим їх розкладанням до відповідних оксидів

Дослідження відновлення кисню на легованій сталі, з нанесеними оксидними каталітичними покриттями, дозволили визначити діапазони потенціалів та густин струму при яких перебігають: тільки відновлення кисню, відновлення кисню і виділення водню та переважне виділення водню [9–12]. На перших двох ділянках процеси перебігають з низькою швидкістю. Так, для діапазону відновлення кисню густина струму досягає 3 мА/см<sup>2</sup>. На дільниці суміщеного відновлення кисню та виділення водню густина струму досягає 8 мА/см<sup>2</sup>. Такі незначні значення густини струму потребують пошуку нових матеріалів, які дозволять підвищити швидкість катодного процесу [5].

У якості перспективних матеріалів для реалізації катодного процесу на поруватому сітчастому струмопідводі були обрані: оксиди марганцю, оксиди кобальту, оксиди рутенію. Ці оксиди характеризуються низькою перенапругою в кисневій реакції [1, 3–5].

Оксиди обраних металів наносили на сітчастий струмовідвід методом термічного розкладу покривних розчинів. Газодифузійний електрод складався з футерованого титанового струмовідводу, диспергатора газу з поруватого графіту і зовнішнього сітчастого робочого елемента, на якому і відбувались катодні реакції.

Метою дослідження було обґрунтування складу активного покриття газодифузійного катоду та робочих діапазонів катодної густини струму та катодних потенціалів при електрохімічному синтезі гіпохлориту натрію з деполяризацією киснем повітря катодного процесу.

**Методика.** Одержання каталітично активного шару оксиднометалевих покриттів здійснювалось методом термічного розкладання покривних розчинів. Такий метод повністю відповідає вимогам, що пред'являються до малозношувальних оксиднометалевих електродів для електролізу водних розчинів хлориду натрію: можливість регулювання складу композиційного покриття в широкому діапазоні концентрацій компонентів.

Для поліпшення адгезії композиційного покриття сталеві основи проходили очищення від механічних забруднень, піддавалися електрохімічному знежиренню в розчині наступного складу (г·дм<sup>-3</sup>): NaOH – 30, Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> – 30, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – 30. Густина струму 5 А·дм<sup>-2</sup>, температура 303 К, час обробки 3 хвилини. Травлення зразків відбувалося хімічно в розчині наступного складу (г·дм<sup>-3</sup>): HNO<sub>3</sub> – 100, KF – 50. Час обробки 15 хвилин [3].

На суху підготовлену поверхню зразка, за допомогою кисті, наносився покривний розчин так, щоб кількість покривного розчину, що наносилась, не приводило до утворення крапель і напливів. Склад розчинів представлений у таблиці.

Таблиця – Склад розчинів для нанесення активного оксиднометалевого покриття

Покриття	Компоненти розчину	Зміст компонентів, (г·дм <sup>-3</sup> )
RuO <sub>2</sub>	Ru(OH)Cl <sub>3</sub>	150
	HCl	36
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	3
MnO <sub>2</sub>	Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	300
	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	3
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	300

Після нанесення покривного розчину зразки поміщалися в сушильну шафу і сушилися до повного видалення вологи при температурі 313...323 К. Потім зразки поміщалися в муфельну піч і піддавалися термічній обробці при температурі 593...673 К. Попередня сушка покривного розчину дозволяла уникнути розтріскування покриття при нагріванні зразка в муфельній печі вище температури кипіння покривного розчину. Після охолодження цикл обробки повторювали 3 рази.

**Результати дослідження.** Вольтамперні циклічні залежності катодного процесу на одержаних оксиднометалевих покриттях катодів представлені на рис. 1 та рис. 2., швидкість розгортки потенціалу складала 100 мВ/с. Залежності представлені на рис. 2 одержані без подачі повітря (а) і в газодифузійному режимі (б) роботи поруватого катоду.

На цих залежностях, для всіх досліджувальних матеріалів, спостерігаються визначені ділянки відновлення кисню та суміщеного відновлення кисню і виділення водню. Перша ділянка відновлення кисню спостерігається до рівноважних потенціалів водневої реакції (приблизно –0,42 В). Швидкість відновлення кисню є невелика і складає 3...5 мА/см<sup>2</sup>. Різниця в ході вольтамперної залежності на рис. 1 та рис. 2 не

спостерігається через високу швидкість розгортки потенціалу, яка не призводить до збіднення розчину за киснем у випадку роботи катоду без подачі повітря. На другій ділянці (при потенціалах, що є більш негативним за рівноважний потенціал водневої реакції) спостерігається значне зростання швидкості катодної реакції за рахунок виділення водню. Кисень, при цьому, відновлюється на граничній густині струму. На третій ділянці (більше за  $-1,5$  В) швидкість катодного процесу практично повністю визначається швидкістю виділення водню.

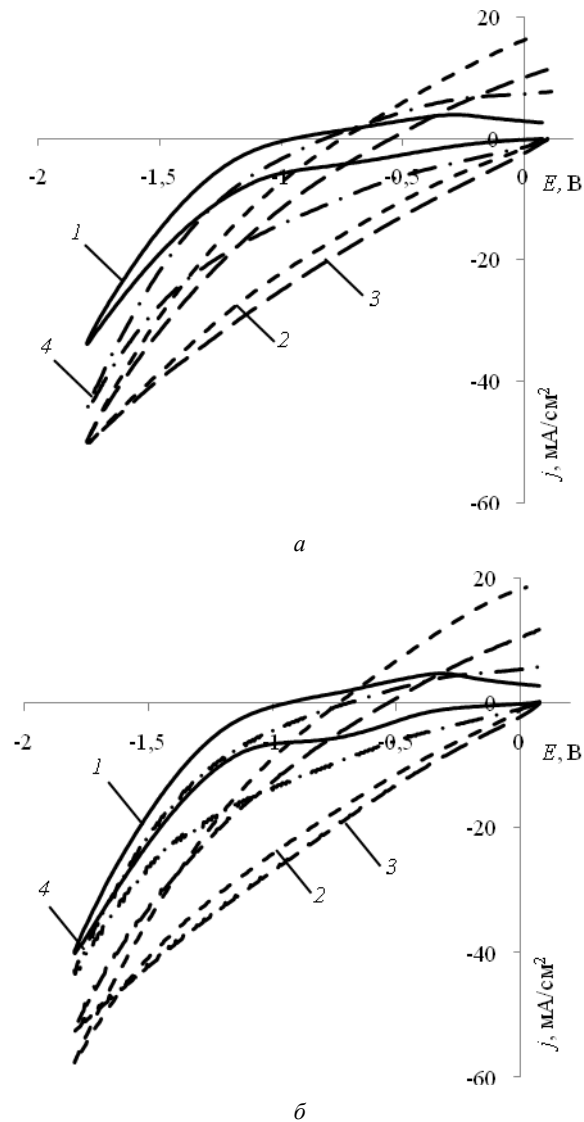


Рисунок 1 – Вольт-амперні залежності у 3 моль/дм<sup>3</sup> NaCl без подачі повітря (а) та з подачею повітря (б): 1 – сталевая сітка; 2 – Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – MnO<sub>2</sub>; 4 – RuO<sub>2</sub>. Швидкість розгортки – 100 мВ/с

Вплив подачі повітря в газодифузійний катод спостерігається при порівнянні зворотнього ходу циклічних вольт-амперних залежностей на рис. 1 та рис. 2. На поверхні сталевій сітці спостерігається зро-

стання струму зворотного ходу в діапазоні потенціалів  $-1,0$  до  $0$  В. Що вказує на збільшення адсорбованих часток, що приймають участь в катодному процесі. Як було показано раніше, цей діапазон потенціалів відповідає 1-й і 2-й ділянкам одержаних залежностей на яких відбуваються переважне відновлення кисню. Тому, зростання струму зворотного ходу, при потенціалах позитивніших за  $1,0$  В, можна пояснити впливом адсорбції кисню на поверхні газопроникнених сітчатих сталевих катодів при подачі повітря. Для катодів з покриттям оксидами металів ефект від подачі повітря найбільш проявлений на Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub>. На RuO<sub>2</sub> подача повітря не призвела до збільшення струму зворотного ходу.

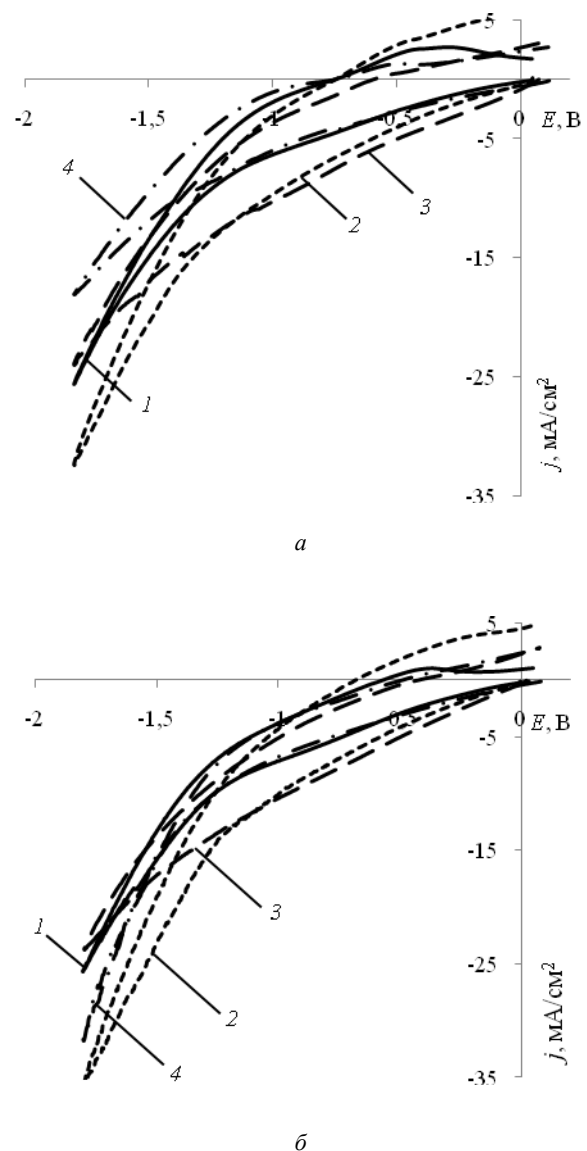


Рисунок 2 – Вольт-амперні залежності у 3 моль/дм<sup>3</sup> NaCl без подачі повітря (а) та з подачею повітря (б): 1 – сталевая сітка; 2 – Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – MnO<sub>2</sub>; 4 – RuO<sub>2</sub>. Швидкість розгортки – 10 мВ/с

Всі три оксидні покриття показали можливість збільшення густини струму на всіх трьох досліджуваних ділянках вольтамперної залежності при роботі катоду без газодифузійного режиму. В порядку зростання катодної густини струму їх можна розташувати у наступний ряд:  $\text{RuO}_2$ ,  $\text{Co}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ .

У випадку реалізації газодифузійного режиму хід залежностей значно не змінився.

Відсутність значного впливу від подачі повітря через поруватий катод пояснюється великою швидкістю розгортки потенціалу, при якій електроліт не встигав обіднитися за розчиненим киснем. Для визначення впливу концентрації кисню, розчиненого в електроліті, були одержані вольт-амперні залежності зі швидкістю розгортки потенціалу 10 мВ/с. Вольт-амперні циклічні залежності катодного процесу на одержаних оксидно-металевих покриттях катодів представлені на рис. 3.

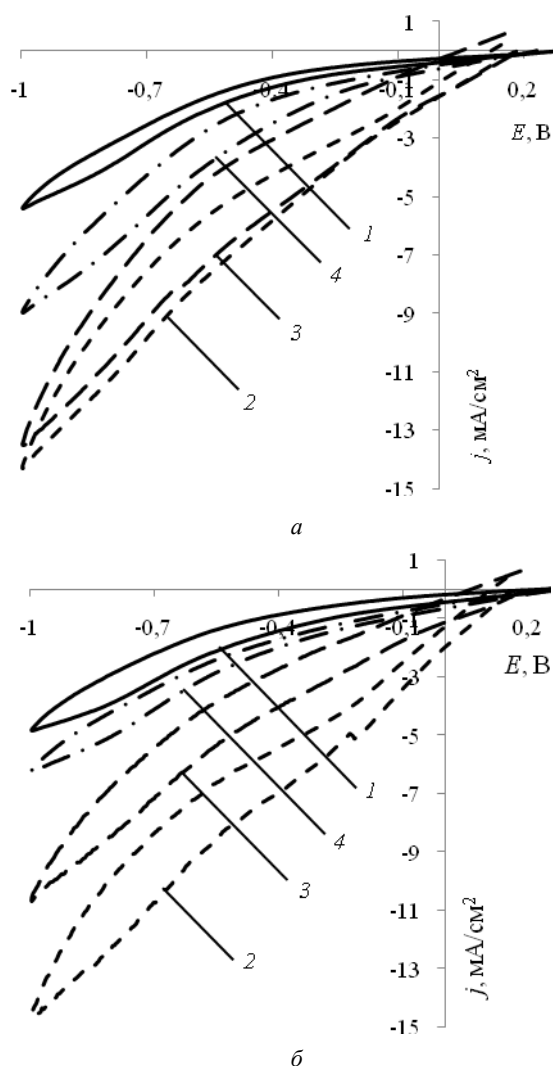


Рисунок 3 – Вольт-амперні залежності у 0,08 моль/дм<sup>3</sup>  $\text{NaClO}$  без подачі повітря (а) та з подачею повітря (б):

1 – сталева сітка; 2 –  $\text{Co}_2\text{O}_3$ , 3 –  $\text{MnO}_2$ , 4 –  $\text{RuO}_2$ .

Швидкість розгортки – 10 мВ/с

В умовах збіднення електроліту за розчиненим киснем значення густини струму в досліджуваному діапазоні потенціалів значно змінилися.

Реалізація газодифузійного режиму роботи поруватого катоду вплинула лише на третю ділянку вольт-амперної залежності – переважне виділення водню. Катодний струм на цій ділянці був значно знижений. Розраховані парціальні вольт-амперні залежності показали, що вихід за струмом водню на цій ділянці значно зменшується, а вихід за струмом відновлення кисню, відповідно, зростає.

Аналіз зворотного ходу вольт-амперних залежностей вказує на зниження адсорбції водню при потенціалах зворотного ходу до  $-1$  В, що вказує на збільшення виходу за струмом суміщеної реакції відновлення кисню.

Одержані результати вказують на розширення діапазону потенціалів в якому відновлення кисню перебігає з високим виходом за струмом.

Наступною стадією досліджень стало визначення впливу на швидкість сумішених реакцій катодного процесу при додаванні в хлоридний розчин гіпохлориту натрію у кількості 0,08 моль дм<sup>3</sup> (рис. 5,6). Додавання гіпохлорит-іону практично не впливає на густину струму на першій і другій ділянках вольт-амперних залежностей. Спостерігається зниження катодної густини струму при потенціалах, що є більш негативними від рівноважного потенціалу водневої реакції. Це вказує на певне гальмування процесу виділення водню.

На третій ділянці густина струму теж зменшується. Це вказує на те, що гіпохлорит-іони у кількості 0,08 моль дм<sup>3</sup> не приймають участь у катодному відновленні. При використанні плоских електродів в цих діапазонах потенціалів вже відбувається катодне відновлення гіпохлорит-іонів з ВС 10–15 % [2]. Це вказує на позитивний результат застосування газодифузійного режиму роботи катоду в електрохімічному синтезі гіпохлориту натрію.

**Висновки.** Обґрунтовано склад активних покриттів газодифузійних електродів, які забезпечують максимальне зниження потенціалу електрода, його високу електропровідність і зносостійкість. За показниками струму обміну катодного процесу у 3 моль/дм<sup>3</sup>  $\text{NaCl}$  каталітично активні покриття розташувалися в наступний ряд  $\text{MnO}_2 > \text{Co}_2\text{O}_3 > \text{RuO}_2$ . Для сітчастих катодів з покриттям оксидами металів ефект від подачі повітря найбільш проявлений на  $\text{Co}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ . На  $\text{RuO}_2$  подача повітря не призвела до збільшення струму зворотного ходу. У розчині гіпохлориту натрію найбільший граничний струм в реакції

відновлення кисню виявлено на оксидах кобальту Це вказує, що найбільшу каталітичну активність мають сітчасті електроди з каталітично активним покриттям  $\text{Co}_2\text{O}_3$ .

Рекомендованою густиною струму, для досліджуваної конструкції газодифузійного катоду, є  $15 \text{ mA/cm}^2$  при температурі 291...293 К. Катодне відновлення гіпохлорит-іонів, за цих умов, знижується на 55...60 %.

#### Список літератури

1. Kolyagin G. A., Kornienko G. V., Kornienko V. L. et al. Electrochemical reduction of oxygen to hydrogen peroxide in a gas-diffusion electrode based on mesoporous carbon. *Russ J Appl Chem.* 2017, vol. 90, pp. 1143–1147. DOI: 10.1134/S1070427217070187.
2. Рутковська К. С., Тульський Г. Г., Сінкевич І. В., Артеменко В. М. Застосування газодифузійного катоду в електрохімічному синтезі гіпохлориту натрію. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія.* Харків: НТУ «ХПІ». 2018. № 39 (1271). С. 23–26.
3. Байрачний Б. И., Тульская А. Г., Байрачный В. Б. Композиционные газодиффузионные аноды для реализации сульфатнокислотного способа получения водорода. *Журнал прикладной химии.* 2013. Т. 86, вып. 11. С. 1780–1785.
4. Тарасевич М. Р., Клейменов Б. В., Мазин П. В., Кузнецова Л. Н. оптимизация газодиффузионного катода для щелочного электролита. *электрохимическая энергетика.* 2008. Т. 8, № 3. С. 174–179.
5. Тарасевич М. Р., Давыдова Е. С. Неплатиновые катодные катализаторы для топливных элементов со щелочным электролитом (обзор). *Электрохимия.* 2016. Том 52, №3. С. 1–30. DOI: 10.7868/S0424857016030117.
6. Штефан В. В., Єпіфанова А. С., Кобзєв О. В., Метеньканич М. М. Вольтамперометрія осадження сплаву  $\text{Co-Mo}$ . *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія.* Харків: НТУ «ХПІ». 2018. № 39 (1315). С. 80–83. doi: 10.20998/2079-0821.2018.39.16.
7. Бервицкая О. С., Полищук Ю. В. Композиционные покрытия никель углеродный материал. *Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry: Monograph.* Kyiv: KNUTD. 2016, pp. 122–126.
8. Shtefan V. V., Epifanova A. S., Koval'ova A. A., Bairachnyi B. I. Electrolytic deposition of highly hard coatings of a cobalt-molybdenum alloy // *Materials science.* 2017, vol. 53(1), pp. 47–54.
9. Atapin A. G., Nefedov V. G. Parameters of oxygen bubbles evolved during the electrolysis of solutions with different concentration of NaOH. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii.* 2019, No. 5, pp. 14–21.
10. Nefedov V. G., Atapin A. G. Analysis of the conditions of the formation of gas bubble nuclei in the course of water electrolysis. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii.* 2019, No. 4, pp. 120–126.
11. Нефедов В. Г., Бондарь Д. В. Оценка факторов, влияющих на аномалии электропроводности тонких слоев жидкости у поверхности воздух-электролит. *Вопр. химии и хим. технологии.* 2007, № 4. С. 121–126.
12. Jung Y. J., Baek K. W., Oh B. S. An investigation of the formation of chlorate and perchlorate during electrolysis using Pt/Ti electrodes: the effects of pH and reactive oxygen species and the results of kinetic studies. *Water Res.* 2010, vol. 44, pp. 5345–5355.

#### References (transliterated)

1. Kolyagin G. A., Kornienko G. V., Kornienko V. L. et al. Electrochemical reduction of oxygen to hydrogen peroxide in a gas-diffusion electrode based on mesoporous carbon. *Russ J Appl Chem.* 2017, vol. 90, pp. 1143–1147. DOI: 10.1134/S1070427217070187.
2. Rutkovska K. S., Tulska G. G., Sinkevich I. V., Artemenko V. M. Zastosuvannya gazodifuzijnogo katodu v elektrohimičnomu sintezi gipohloritu natriyu. [Application of a gas diffusion cathode in electrochemical synthesis of sodium hypochlorite] *Visnyk NTU "KhPI" Seriya: Himiya, himichna tekhnologiya ta ekologiya [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Chemistry, chemical technology and ecology], Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, no 39 (1271), pp. 23–26.*
3. Bairachnyi B. I., Tulskaia A. G., Bairachnyi V. B. Kompozicionnye gazodifuzionnye anody dlia realizacii sulfatnokislотного sposoba polucheniia vodoroda [Composite gas diffusion anodes for implementing the sulfate-acid method for producing hydrogen] *Zhurnal prikladnoi khimii*, 2013, vol. 86, pp. 1780–1785.
4. Tarasevych M. R., Kleimenov B. V., Mazyn P. V., Kuznetsova L. N. Optymyzatsiya hazodyffuzionnoho katoda dlia shchelochnoho elektrolita [Optimization of gas diffusion cathode for alkaline electrolyte] *Electrochemical energy*, 2008, vol. 8, no 3, pp. 174–179.
5. Tarasevych M. R., Davydova E. S. Neplatynovyie katodnye katalyzatory dlia toplivnykh elementov so shchelochnym elektrolitom (obzor) [Non-platinum cathodic catalysts for alkaline electrolyte fuel cells (review)] *Electrochemistry*, 2016, vol. 52, no 3, pp. 1–30. doi: 10.7868/S0424857016030117.
6. Shtefan V. V., Epifanova A. S., Kobziev O. V., Metenkanych M. M. Voltamperometriia Osadzheniia Splavu Co–Mo [Voltamperometry precipitation alloy Co–Mo] *Visnyk NTU "KhPI" Seriya: Himiya, himichna tekhnologiya ta ekologiya [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Chemistry, chemical technology and ecology], Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, no 39 (1315), pp. 80–83. doi: 10.20998/2079-0821.2018.39.16.*
7. Bervickaya O. S., Polishchuk Y. V. Kompozicionnye pokrytiya nikel' uglerodnyj material [Composite nickel coatings carbon material]. *Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry: Monograph.* Kyiv: KNUTD. 2016, pp. 122–126.
8. Shtefan V. V., Epifanova A. S., Koval'ova A. A., Bairachnyi B. I. Electrolytic deposition of highly hard coatings of a cobalt-molybdenum alloy // *Materials science.* 2017, vol. 53(1), pp. 47–54.
9. Atapin A. G., Nefedov V. G. Parameters of oxygen bubbles evolved during the electrolysis of solutions with different concentration of NaOH. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii.* 2019, No. 5, pp. 14–21.
10. Nefedov V. G., Atapin A. G. Analysis of the conditions of the formation of gas bubble nuclei in the course of water electrolysis. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii.* 2019, No. 4, pp. 120–126.
11. Nefedov V. G., Bondar D. V. Otsenka faktorov vliyaiushchykh na anomalyy elektroprovodnosti tonkykh sloev zhydkosti u poverkhnosti vozdukh-elektrolit [Assessment of factors affecting the anomalies in the electrical conductivity of thin layers of liquid at the air-electrolyte surface ] *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii.* 2007, No. 4, pp. 121–126.
12. Jung Y. J., Baek K. W., Oh B. S. An investigation of the formation of chlorate and perchlorate during electrolysis using Pt/Ti electrodes: the effects of pH and reactive oxygen species and the results of kinetic studies. *Water Res.* 2010, vol. 44, pp. 5345–5355.

Надійшла (received) 18.06.2020

Вісник Національного технічного університету «ХПІ»  
Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія, № 2(4) 2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Рутковська Катерина Сергіївна (Рутковская Екатерина Сергеевна, Rutkovska Katerina)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0460-1906>; e-mail: rutkovskaya9@gmail.com.

**Тульський Геннадій Георгійович (Тульский Геннадий Георгиевич, Tulsyі Hennadii)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри технічної електрохімії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2662-8333>; e-mail: tgg@kpi.kharkov.ua.

**Гомозов Валерій Павлович (Гомозов Валерий Павлович, Homozov Valerii)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технічної електрохімії, м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-2014-0919>; e-mail: vp.gomozov@gmail.com

**Русінов Олександр Іванович (Русинов Александр Иванович, Rusinov Alexandr)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної та неорганічної хімії; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5617-4275>; e-mail: shktv192@gmail.com