

**Марія Совгуть<sup>1</sup>, Олексій Косогін<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>магістр, кафедра технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [maria.sovgut@gmail.com](mailto:maria.sovgut@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4252-3579>  
Researcher ID: [JXG-6903-2024](https://orcid.org/0009-0004-4252-3579)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [o.kosogin@kpi.ua](mailto:o.kosogin@kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8379-9580>  
Researcher ID: [I-3040-2018](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580). SCOPUS Author ID: [55463712800](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580)

**ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМАЛЬДЕГІДУ**

Запропоновано проводити визначення формальдегіду (НСОН) електрохімічним методом. Встановлено, що надійне детектування НСОН можливе по величині струму його окиснення в лужному середовищі. Методом аналізу вольт-амперних кривих встановлено потенціали робочого електрода, за яких можливе окиснення НСОН. Запропоновано використовувати двоелектродну схему електрохімічного сенсора, що дозволить відмовитись від використання зовнішнього потенціостатуючого пристрою та зменшить енергоспоживання для роботи сенсора. Показано, що можливе визначення НСОН з використанням двоелектродної комірки, в якій робочий електрод виконано з платинованого титану, і потенціал якій задається товстошаровим допоміжним електродом, що містить в своєму складі діоксид мангану марки ЕДМ-2. Розроблена комірка після оптимізації складу може бути використана у складі сенсора для визначення формальдегіду в водному середовищі.

**Ключові слова:** формальдегід; електрохімічне окиснення; вольтамперометрія; робочий електрод; допоміжний електрод; сенсор; платинований титан; діоксид мангану.

Рис.: 10. Бібл.: 7.

**Актуальність теми дослідження.** Забруднення повітряного та водного середовища формальдегідом внаслідок антропогенного впливу є серйозною проблемою в Україні та світі. Формальдегід НСОН є потенційно небезпечною речовиною, що відноситься до 2 класу небезпечності і є канцерогеном, навіть незначні кількості якого негативно впливають на здоров'я людини, що потребує проведення регулярного моніторингу його вмісту у водних та повітряних середовищах.

**Постановка проблеми.** Для визначення концентрації формальдегіду зазвичай використовують прямі та непрямі методи аналізу. Однак, такі методи вимагають використання дороговартісного обладнання та реактивів і мають низьку чутливість, що робить їх малопридатними для оперативного використання. Саме тому є потреба в розробці електрохімічного методу, заснованого на процесах окиснення або відновлення формальдегіду на електродах. Використання електрохімічного методу визначення НСОН дозволяє розробити чутливі пристрої, придатні для його оперативного моніторингу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанню електрохімічного визначення формальдегіду присвячено велику кількість наукових робіт, зокрема, вони направлені на дослідження різних електродних матеріалів для визначення формальдегіду. Так, у статті [1] автор описує електрохімічне окиснення формальдегіду на золотих та срібних дискових електродах, наводить детальний опис кінетики окиснення формальдегіду та зазначає, що золото та срібло можна застосовувати як електрокаталізатори для електрохімічного окиснення формальдегіду лише за наявності гідроксильних іонів на межі розподілу метал-розчин. На золоті, на відміну від металів платинової групи, процес електроокиснення формальдегіду практично не ускладнений утворенням СО. Зазначається, що в кінетиці стаціонарного електроокислення формальдегіду на золотому електроді важлива роль належить дифузійним процесам, і існує припущення, що саме дифузійні обмеження є основною причиною появи нестационарності анодної деструкції НСОН на золоті [2].

У статтях [3; 4] автори приводять дослідження нового кінетичного механізму для електроокиснення формальдегіду з використанням полікристалічної міді як робочого електрода, на якому електроокиснення формальдегіду відбувається через процес перенесення електронів, що каталізується  $\text{Cu}^{2+}$ . На межі поділу відбувається два процеси: один,

пов'язаний з електроокисненням формальдегіду, що призводить до утворення мурашиної кислоти, а інший – пов'язаний з окисненням мурашиної кислоти, у результаті чого виділяється  $\text{CO}_2$ . У процесі електролізу мідний електрод втрачає каталітичну активність через утворення на його поверхні оксиду міді.

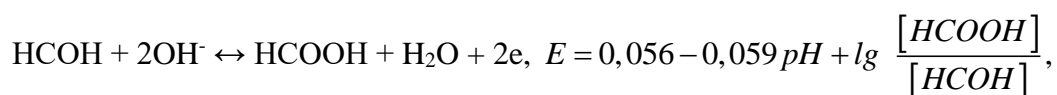
Стаття [5] присвячена електрохімічному окисненню формальдегіду на платині та паладії. У цій статті автори досліджували поведінку електродів при окисненні формальдегіду у розчинах від сильноокислих до сильнолужних. Платина є одним із найбільш широко використовуваних матеріалів для окиснення формальдегіду завдяки своїй каталітичній активності та стабільності. Платинові електроди відомі своєю високою ефективністю в каталізі окиснення формальдегіду до вуглекислого газу. Формальдегід на платині електрокаталітично окислюється за механізмом, у якому електрод окислюється до  $\text{PtOH}$ , а потім до  $\text{Pt}(\text{OH})_2$  [6].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Вибір матеріалу електрода для електрохімічного визначення формальдегіду залежить від різних факторів, включаючи специфіку застосування, міркування вартості та бажаний рівень каталітичної активності. У всіх приведених статтях досліджується окремо поведінка електродного матеріалу, проте основним електродним матеріалом в переважній більшості випадків є золото або платинові метали, що зменшує селективність електрохімічної системи та збільшує її вартість. Також значний інтерес становить побудова двохелектродної системи, яка буде характеризуватись низьким енергоспоживанням, тоді як наявні в літературі дослідження фокусуються на використанні триелектродних систем із застосуванням зовнішнього потенціостатуючого пристрою.

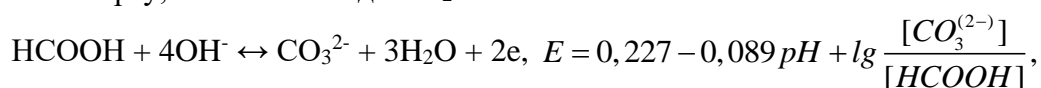
**Мета дослідження.** Метою роботи є розроблення електрохімічної системи, придатної для визначення формальдегіду у водних та повітряних середовищах. Для досягнення поставленої мети необхідним є вибір електродного матеріалу, який може слугувати інертною струмопровідною основою; вибір каталітично активного матеріалу для робочого електрода пристрою, на якому можливий перебіг електродної реакції електрохімічного перетворення формальдегіду; розроблення електрода, який характеризується низькою залежністю потенціалу від наявності формальдегіду та малою поляризованістю, що дозволить використати його як допоміжний електрод електрохімічної системи сенсора гальванічного типу, в якому сталий потенціал робочого електрода забезпечується за рахунок малополяризованого допоміжного електрода без використання зовнішнього потенціостатуючого пристрою. Розроблена електрохімічна система після її оптимізації може бути використана для створення сенсорів визначення формальдегіду в технологічних середовищах та дозволить забезпечити її постійний моніторинг.

**Виклад основного матеріалу.** З літератури відомо, що визначення формальдегіду можливе як за струмом його відновлення, так і окиснення. Зважаючи на достатньо негативний потенціал, за якого можливе повне відновлення  $\text{НСОН}$  (негативніше за мінус 1,7 В), за таких умов складно реалізувати систему з низьким енергоспоживанням і обов'язковим буде застосування зовнішнього потенціостатуючого пристрою. Разом з тим, окиснення формальдегіду можливе за потенціалів менше за +1,0 В, що дозволить підібрати для побудови гальванічного пристрою допоміжний електрод для забезпечення відповідного потенціалу робочого електрода.

Також відомо, що  $\text{НСОН}$  здатен до електрохімічних перетворень в кислих та лужних середовищах, однак саме в лужному середовищі досягається його більш повне окиснення спочатку до мурашиної кислоти



яка, у свою чергу, окислюється до  $\text{CO}_2$



тому для дослідження як робочий електроліт використовували розчин  $0,1$  моль/дм<sup>3</sup>  $\text{NaOH}$ .

Як електродний матеріал для окисно-відновних процесів найбільш часто застосовують платину та матеріали на її основі. З метою зменшення вартості можливе використання електродних матеріалів, де тонкий шар платини нанесено основу з іншого металу, який характеризується високою хімічною стійкістю та відіграє роль інертного струмопідводу [7]. У роботі було використано пластинчастий платиновий електрод типу Пл99,9 та пресований електрод з платинованого титану. Останній являв собою диск діаметром  $21$  мм, товщиною  $0,25$  мм і пористістю  $30\%$ , і виготовляли його з  $0,2$  г порошку титану, активованого платиною ( $20$  мг/г титану), напресованого на шар з  $0,2$  г титану з зусиллям пресування  $90$  кН. Для надання механічної жорсткості диск напресовували на диск, виготовлений з  $2,5$  г політетрафторетилену. Струмопідведення забезпечували запресовуванням в титанову основу титанового дроту.

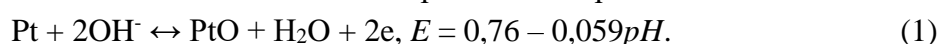
Дослідження проводили в розчинах без формальдегіду та з додаванням  $\text{НСОН}$  до його концентрації в розчині  $0,01$  моль/дм<sup>3</sup> та  $0,1$  моль/дм<sup>3</sup>. Для приготування розчинів з необхідним вмістом формальдегіду використовували вихідний  $30\%$ -й розчин.

Дослідження поведінки електродних матеріалів в різних розчинах проводили з використанням триелектродної схеми методом циклічної вольтамперометрії в умовах лінійної розгортки потенціалу. Приладом для отримання поляризаційних кривих слугував одноканальний потенціостат марки PGStat500n, швидкість розгортки потенціалу  $2$  мВ/с. Використовували скляну комірку, в якій розміщували робочий та допоміжний електрод. Електрод порівняння знаходився в окремій комірці, а електролітичний контакт між посудинами здійснювався через скляний електролітичний місток. Як електрод порівняння в електрохімічній системі використовували ртутно-оксидний електрод. Усі потенціали в роботі наведено відносно стандартного водневого електрода.

Анодну поляризацію усіх електродних матеріалів проводили до потенціалу  $+0,8$  В, тому що за більш позитивних значень потенціалів уже спостерігались значні струми, пов'язані з початком виділення кисню, що ускладнювало інтерпретацію даних. У статті на поляризаційних кривих для зручності опрацювання експерименту показано тільки перший та п'ятий цикл. Більшу кількість циклів поляризації не використовували, тому що в подальшому не відбувалось зсуву поляризаційних кривих порівно із попередніми, тобто досягався певний рівноважний стан.

*Електрохімічна поведінка платини.* Платина є одним із найбільш широко використовуваних матеріалів для окиснення формальдегіду завдяки своїй каталітичній активності та стабільності.

На платиновому електроді в розчині  $\text{NaOH}$  встановлюється безструмовий потенціал близько  $E = 0,05$  В, який відповідає встановленню рівноважної реакції



Анодна поляризація платинового електрода призводить до появи струмів за потенціалів позитивніше  $E = 0,4$  В (рис. 1), що може свідчити про утворення гідроксиду платини за реакцією [5] (рис. 1):

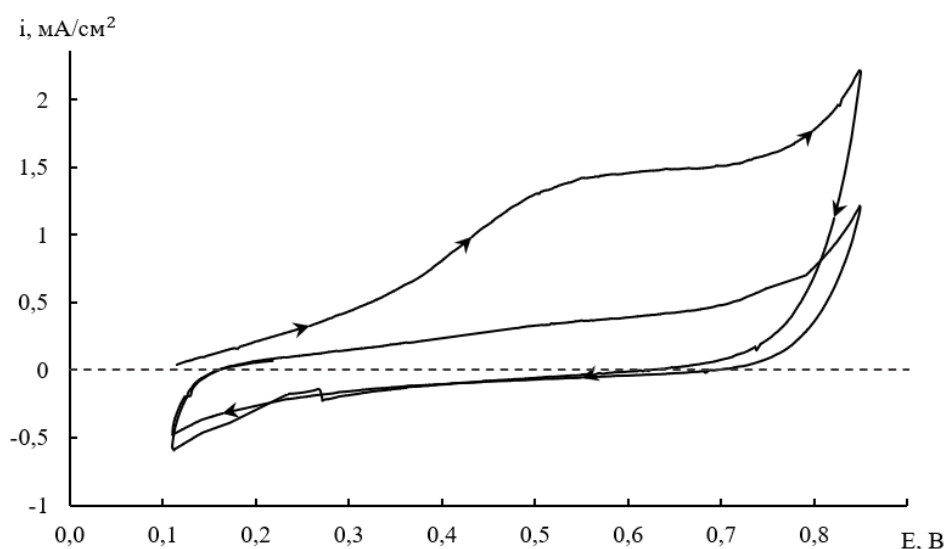


Рис. 1. Потенціодинамічна поляризаційна крива на платиновому електроді в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH. Стрілками показано напрям зсуву потенціалу  
 Джерело: розроблено авторами.



У наступних циклах ці струми зменшуються внаслідок закінчення формування дофазової плівки гідроксиду. За потенціалів позитивніше 0,8 В спостерігаються анодні струми, пов'язані із початком процесу виділення молекулярного кисню.

Введення в розчин лугу формальдегіду для створення концентрації 0,01 моль/дм<sup>3</sup> призводить до появи на поляризаційній кривій значних струмів (рис. 2). На кривих при прямому ході чітко можна відмітити максимум струму окислення за потенціалу -0,15 В.

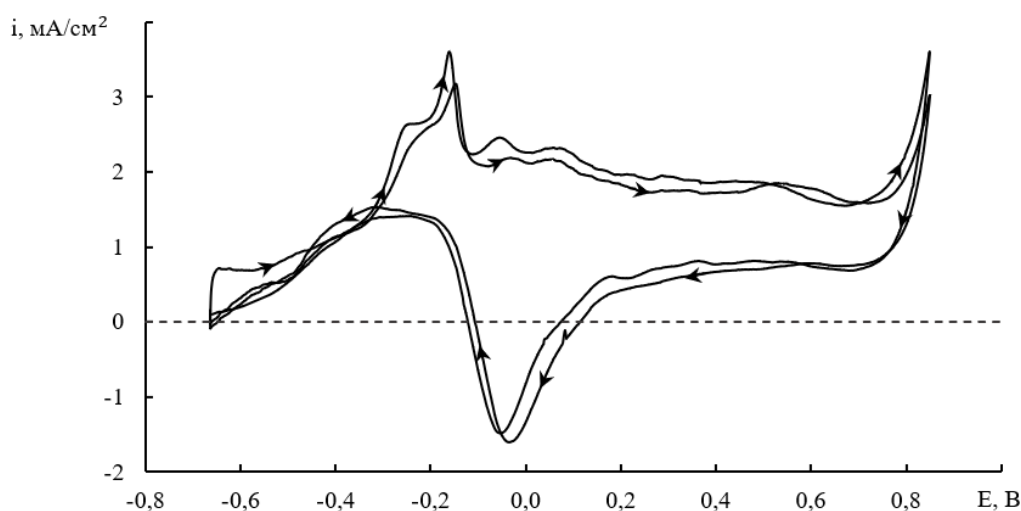


Рис. 2. Потенціодинамічна поляризаційна крива на платиновому електроді в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH + 0,01 моль/дм<sup>3</sup> HCHO  
 Джерело: розроблено авторами.

Наявність перегинів поляризаційної кривої перед максимумом струму може бути пов'язана зі стадійним механізмом перебігу процесу. Формальдегід на платині електрокаталітично окислюється за механізмом, у якому електрод окислюється до PtOH, а потім до Pt(OH)<sub>2</sub>, які, у свою чергу, окислюють формальдегід. При цьому реакції, що відбуваються в процесі окиснення формальдегіду на платиновому електроді, мають такий вигляд [6]:



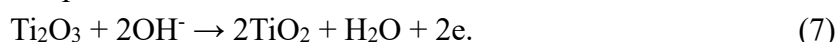
Окиснення формальдегіду починається за потенціалу, який знаходиться за межами адсорбції водню на платині. Це може бути пов'язане з тим, що деякі міцно зв'язані сполуки утворюються під час взаємодії адсорбованого водню з проміжним продуктом або продуктом окиснення HCOH.

На зворотному ході поляризаційної кривої за потенціалів 0...-0,1 В спостерігаються струми відновлення адсорбованих на електроді частинок, які утворились в результаті неповного перебігу реакцій (3)-(5).

*Електрохімічна поведінка титану.* Платина є хоча і найбільш поширеним електродним матеріалом, але разом з тим, малоселективним та дуже дорогим. Тому в промисловості дуже часто застосовують електродні матеріали, створені нанесенням тонкого каталітичного шару платини на інертну струмопровідну основу. Таким матеріалом може бути титан, але спочатку має бути встановлена його електрохімічна стабільність. На поверхні титанового електрода, виготовленого напресовуванням 0,2 г дрібнодисперсного порошку на фторопластовий диск, в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH встановлюється безструмовий потенціал близько -0,1...0 В, який відповідає перебігу спряжених реакцій відновлення розчиненого кисню



та збільшення стехіометрії поверхневих оксидів на титані



Анодна поляризація титанового електрода призводила до виникнення незначних струмів (рис. 3), пов'язаних із подальшим зростанням товщини пасивуючих шарів на поверхні титану за реакцією (7), і лише за потенціалів позитивніше 0,8 В спостерігалось зростання струму, зумовленого початком процесу виділення кисню. Введення в розчин формальдегіду у концентрації 0,01 моль/дм<sup>3</sup> не призводило до появи на поляризаційній кривій яких-небудь струмів (поляризаційна крива була ідентична отриманій у розчині без додавання формальдегіду, тому тут не наведена), що свідчить про повну інертність титану та підтверджує можливість його застосування як струмопровідної основи електрода.

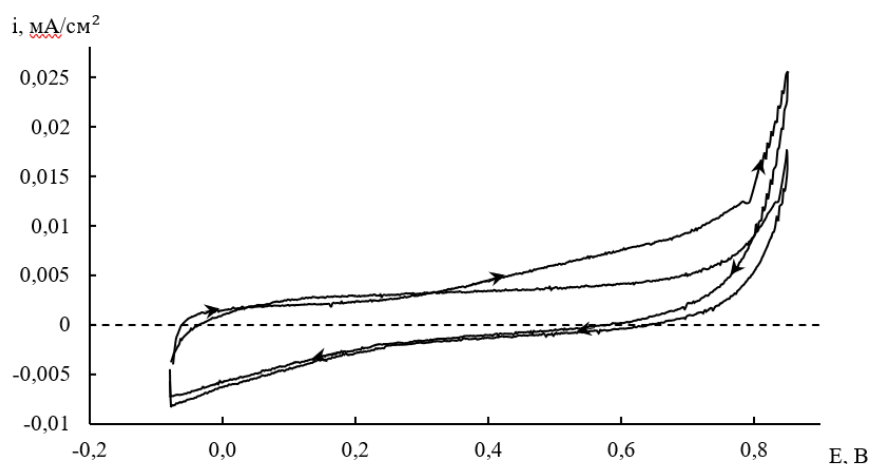


Рис. 3. Потенціодинамічна поляризаційна крива на титановому електроді в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH

Джерело: розроблено авторами.

*Електрохімічна поведінка платинованого титану (ПТА).* На поверхні титанового електрода, активованого платиною, в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH встановлюється безструмовий потенціал 0,1...0,15 В, який відповідає рівноважній реакції (1). Поведінка електрода за анодної поляризації (рис. 4) повністю ідентична такій для платинового електрода, але густини струмів, які реєструвались, значно нижчі, через те, що фактична площа електродів на порядок перевищувала геометричну. Лише за потенціалів позитивніше 0,8 В реєструються струми, пов'язані із початком виділення кисню.

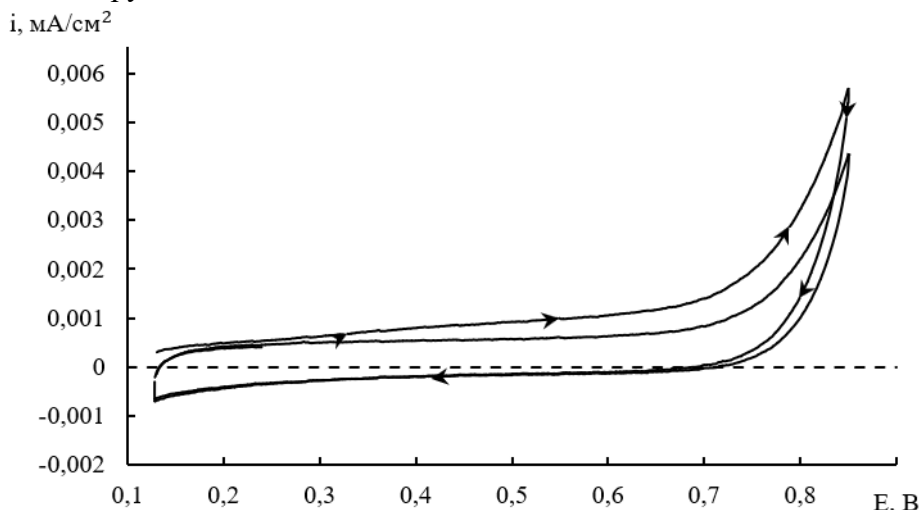


Рис. 4. Потенціодинамічна поляризаційна крива на електроді ПТА в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH

Джерело: розроблено авторами.

Введення в лужний розчин формальдегіду в концентрації 0,01 моль/дм<sup>3</sup> призводить до появи на циклічній вольт-амперній кривій двох хвиль окиснення (рис. 5) за потенціалів -0,1 В та 0,3 В, які, найбільш імовірно, відповідають стадійному окисненню формальдегіду.

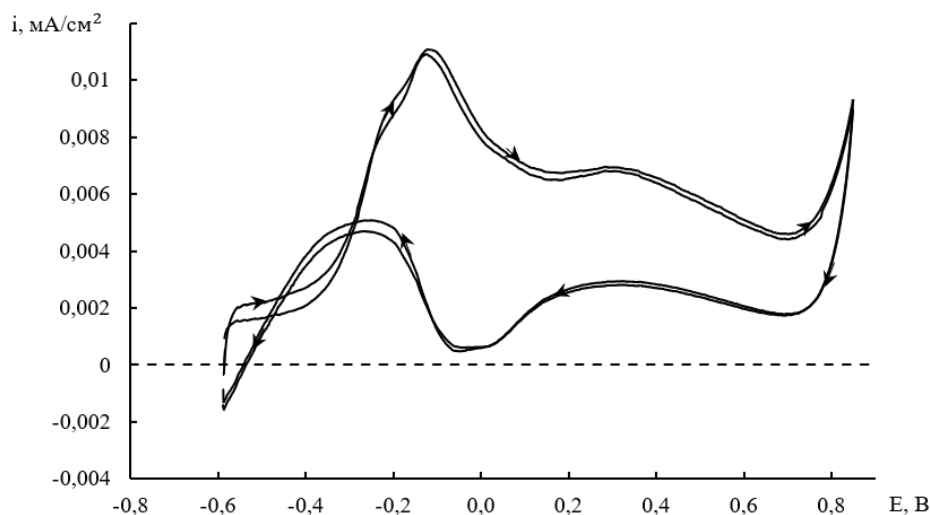


Рис. 5. Потенціодинамічна поляризаційна крива на електроді ПТА в розчині 0,1 моль/дм<sup>3</sup> NaOH + 0,01 моль/дм<sup>3</sup> HCHO

Джерело: розроблено авторами.

Як для платинового електрода, так і для ПТА, величини густини струму збільшувались з підвищенням концентрації формальдегіду в лужному розчині. За результатами ци-

клічних поляризаційних досліджень обрано потенціали максимум струмів, за яких відбувається окиснення формальдегіду – вони відповідали  $E = 0,0$  В на платиновому електроді (рис. 2) та  $E = 0,3$  В на ПТА (рис. 5). З метою встановлення характеру залежності величин струмів від концентрації проведено дослідження в потенціостатичному режимі за визначених потенціалів, і за значеннями струмів, які встановлювались впродовж 5...15 хвилин, побудовано відповідні залежності для платинового електрода (рис. 6) та платиновитанового електрода (рис. 7).

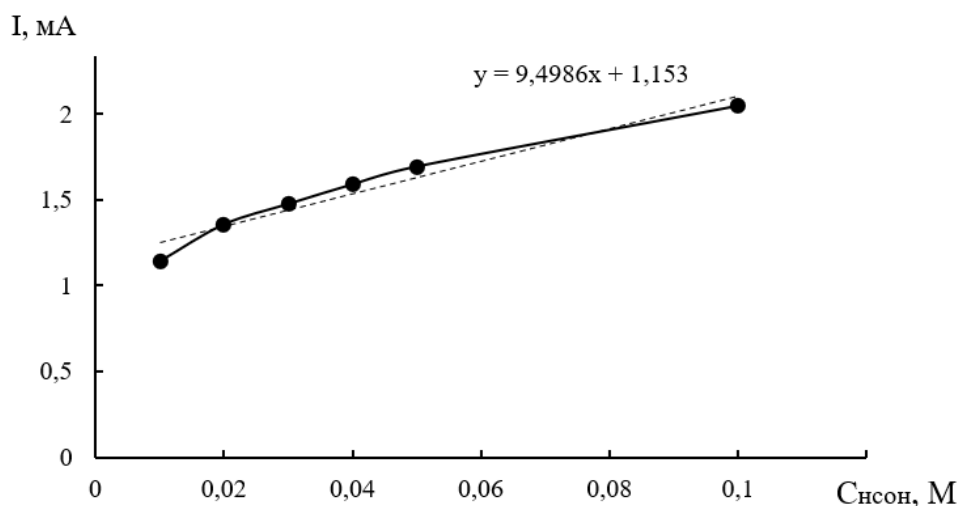


Рис. 6. Лінійна залежність сили струму на платиновому електроді від концентрації формальдегіду в розчині  $0,1$  моль/дм<sup>3</sup> NaOH

Джерело: розроблено авторами.

Хоча для платинового електрода спостерігались більші значення струмів, залежність струму від концентрації значно відхиляється від лінійної і має скоріше напівлогарифмічний характер, що буде ускладнювати побудову двоелектродної електрохімічної системи, придатної для моніторингу формальдегіду. На платиновитановому електроді реалізується майже лінійна залежність струму від концентрації (коефіцієнт апроксимації лінійного рівняння становив понад 0,995), тому надалі використовували саме цей тип електрода.

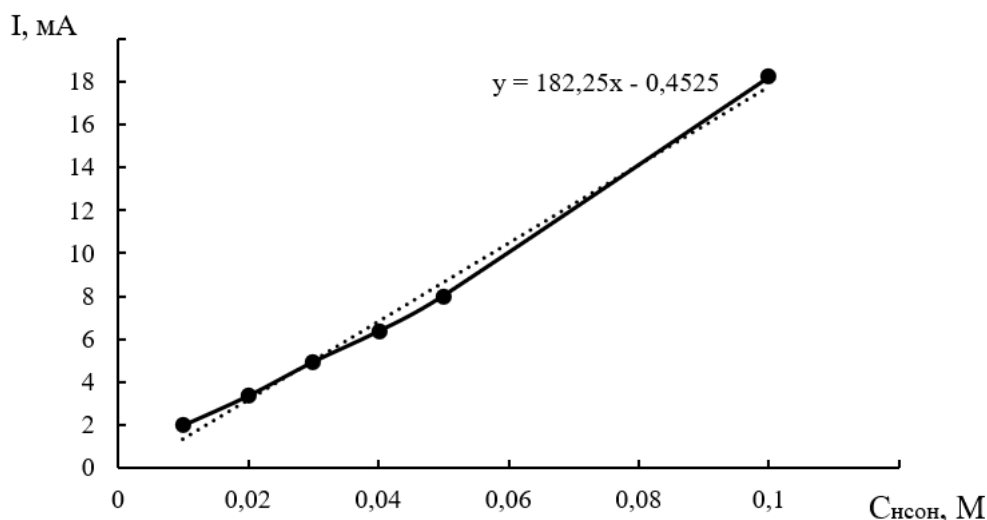
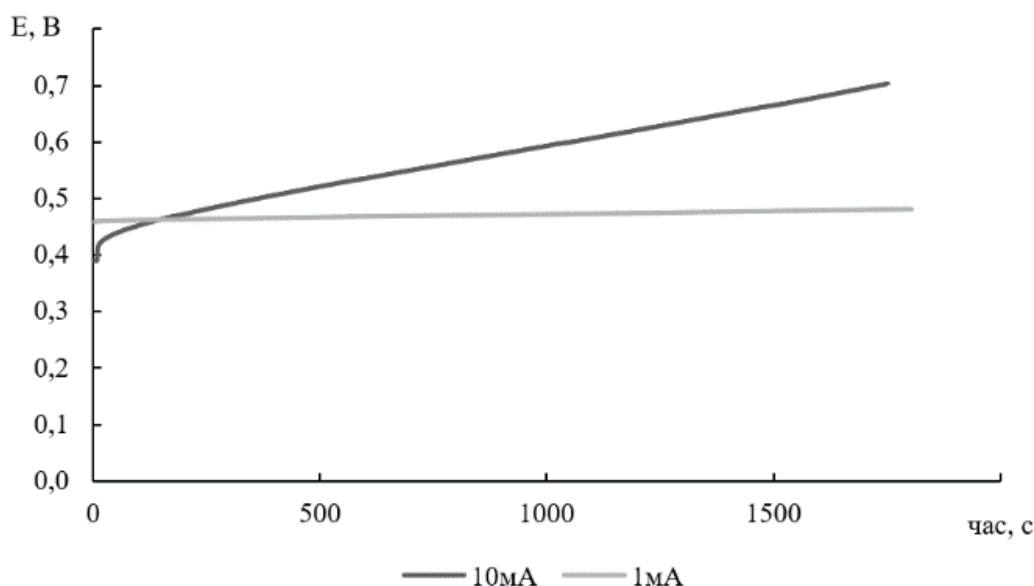


Рис. 7. Лінійна залежність сили струму на електроді ПТА від концентрації формальдегіду в розчині  $0,1$  моль/дм<sup>3</sup> NaOH

Джерело: розроблено авторами.

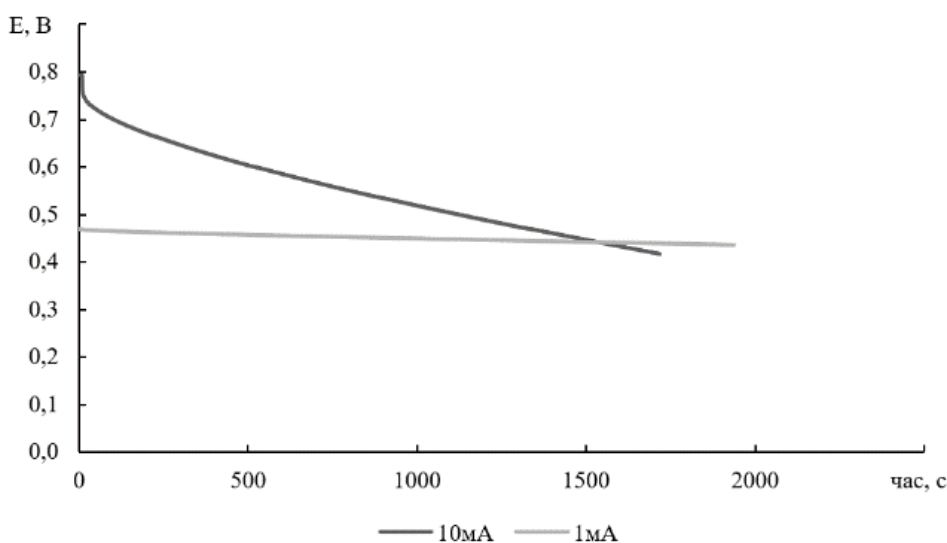
*Поляризаційні характеристики допоміжного електрода двоелектродної системи.* Як встановлено за результатами аналізу літератури, швидке визначення формальдегіду в водних та повітряних середовищах можливе з використанням електрохімічних сенсорів амперометричного типу, які у своїй конструкції містять щонайменше два електроди – робочий, потенціал якого змінюється за появи в розчині електроліту визначуваного компонента, та допоміжний, потенціал якого не повинен залежати від вмісту визначуваного компонента, однак повинен мати значення близьке до потенціалу окиснення/відновлення визначуваного речовини. Також допоміжний електрод повинен мати низьку поляризованість – не змінювати свій потенціал в результаті протікання великої кількості електрики в процесі роботи сенсора. Таким електродом може бути товстошаровий електрод, виготовлений з титанової струмопровідної основи, до складу якого введено діоксид мангану марки ЕДМ-2. Такий електрод виготовляли з 6 г порошку титану з додаванням 0,6 г  $MnO_2$ .

Як видно з отриманих даних (рис. 8, а), потенціал електрода в гальваностатичному режимі за постійного струму анодної поляризації 10 мА постійно зростає, що може бути зумовлено поступовим окисненням  $MnO_2$  та підвищенням його стехіометрії. За значення поляризуючого струму 1 мА дрейф потенціалу електрода не значний і знаходиться в діапазоні потенціалі 0,45...0,47 В. Катодна поляризація такого електрода струмом 1 мА демонструє його достатньо низьку поляризованість – потенціал електрода весь час знаходився в діапазоні 0,43...0,46 В (рис. 8, б), але за величини поляризуючого струму 10 мА в гальваностатичному режимі потенціал електрода невпинно зсувався в негативний бік через відновлення  $MnO_2$ , що супроводжується зниженням його стехіометрії. Отримані результати демонструють, що даний товстошаровий електрод може бути потенційно використаний як допоміжний електрод двоелектродної електрохімічної системи за умови, що величина струму, який проходить між електродами комірки, не буде значно перевищувати значення 1 мА. При цьому такий електрод буде «нав'язувати» іншому – робочому – електроду потенціал +0,45...+0,46 В, тобто більш позитивний, ніж достатньо для початку окиснення формальдегіду.



а





б

Рис. 8. Хронопотенціометричні залежності для товстошарового пористого електрода за анодної (а) та катодної (б) поляризації

Джерело: розроблено авторами.

Використання двоелектродної електрохімічної системи для визначення формальдегіду. На підставі проведених досліджень запропоновано електрохімічну систему, яка включає в себе робочий електрод, виготовлений з дрібнодисперсного платинованого титану, та допоміжний електрод з порошку титану з додаванням діоксиду мангану марки ЕДМ-2, і яка може бути використана для створення двоелектродного сенсора амперометричного типу для визначення формальдегіду. Методом пресування виготовлено двоелектродну комірку (рис. 9), де робочий 1 та допоміжний 3 електроди розділялися сепаратором 2 із суміші діоксиду цирконію як гідрофільного матеріалу із полімерним зв'язуючим – порошком політетрафторетилену. Спресовану комірку, яка мала вигляд таблетки діаметром 21 мм та товщиною 8 мм, встановлювали в циліндричний корпус 4 з оргскла, який містив отвір 5 діаметром 16 мм, що звернений до робочого електрода комірки. Електроди комірки за допомогою титанових струмопідводів 6 за двоелектродною схемою під'єднували до потенціостата, за допомогою якого робочому електроду задавався потенціал допоміжного електрода та який реєстрував струм, який проходив між електродами.

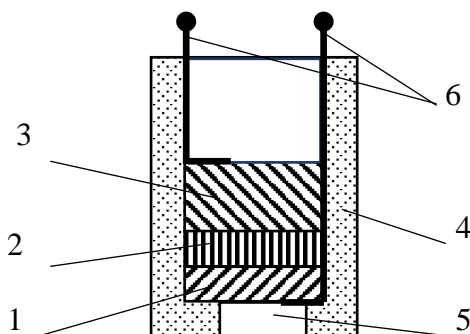


Рис. 9. Схематична будова двоелектродного пристрою для визначення формальдегіду:

1 – робочий електрод; 2 – сепаратор; 3 – допоміжний електрод; 4 – корпус;

5 – дифузійне вікно; 6 – титанові струмопідводи

Джерело: розроблено авторами.

Визначення придатності використання розробленої електрохімічної системи для визначення формальдегіду у водних розчинах проводили занурюючи нижню частину пристрою в ємність із водою, у яку додавали порціями розчин формальдегіду для створення певної концентрації. В результаті потрапляння НСОН через дифузійне вікно (поз. 5, рис. 9) між електродами електрохімічного пристрою виникав струм, який встановлювався впродовж 3...5 хвилин та реєструвався потенціостатом, до якого був підключений пристрій.

Використовуючи розчини з різною концентрацією формальдегіду, отримали залежність струму, що проходив між електродами, від концентрації формальдегіду в розчині (рис. 10).

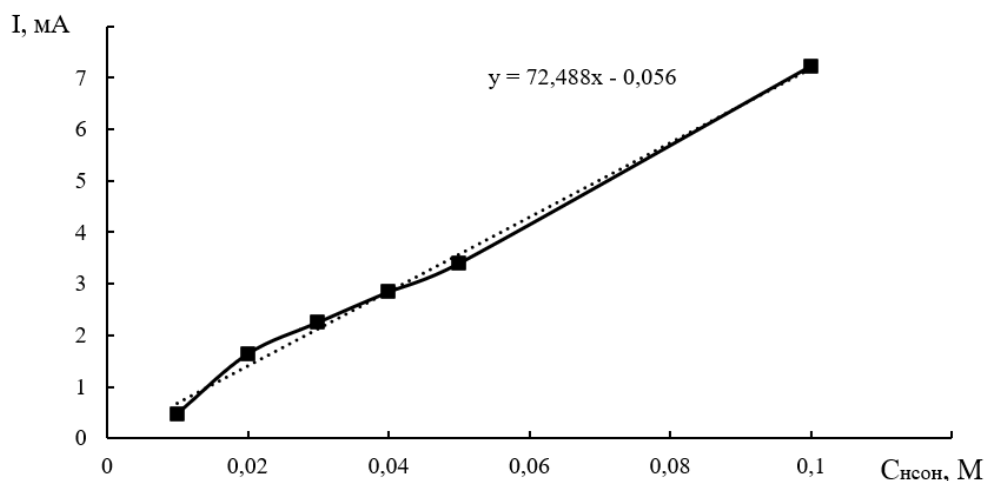


Рис.10. Залежність сили струму у двохелектродній системі від концентрації формальдегіду

Джерело: розроблено авторами.

Отримана залежність демонструє, що зі збільшенням концентрації формальдегіду в розчині спостерігається фактично лінійне зростання струму окиснення на робочому електроді розробленої двохелектродної системи, що робить її придатною до використання для створення амперометричного сенсора для моніторингу вмісту формальдегіду.

**Висновки.** У роботі методом циклічної вольтамперометрії проведено дослідження електрохімічної поведінки платини та платинованого титану у водних розчинах без та з додаванням формальдегіду. Вперше встановлено діапазон потенціалів, за яких на поверхні титану, активованого платиною, відбувається окиснення формальдегіду, при цьому струм окиснення майже лінійно залежить від концентрації формальдегіду в розчині. З метою створення двохелектродного пристрою для визначення формальдегіду запропоновано та досліджено товстопористий титановий електрод із додаванням ЕДМ-2, який характеризується низькою поляризованістю та зможе забезпечити сталий потенціал робочому електроду системи. Уперше розроблено двохелектродну систему з низьким вмістом благородних металів, яка може бути використана для моніторингу вмісту формальдегіду, та для якої встановлено лінійну залежність сили струму, що генерується на робочому електроді, від концентрації формальдегіду у воді. Отримані результати дозволяють зробити висновок про потенційну придатність створеної системи для моніторингу вмісту формальдегіду у водних, а після подальшого вдосконалення системи – і в повітряних системах.

#### Список використаних джерел

1. Bełtowska-Brzezinska, M. Electrochemical oxidation of formaldehyde on gold and silver / M. Bełtowska-Brzezinska // *Electrochimica Acta*. – 1985. – Vol. 30, No.9. – P. 1193-1198.
2. Stadler, R. Hydrogen evolution during the oxidation of formaldehyde on Au: The influence of single crystal structure and Tl-upd / R. Stadler, Z. Jusys, H. Baltruschat // *Electrochimica Acta*. – 2002. – Vol. 47, No. 28. – P. 4485-4500.

3. A New Kinetic-Mechanistic Approach to elucidate formaldehyde Electro-oxidation on Copper electrode / M. Hasanzadeh, B. Khalilzadeh, G. Karim-Nezhad, I. Kazeman, M.H. Abnosi // *Electroanalysis*. – 2010. – Vol. 22, No. 2. – P. 168-176.
4. Hasanzadeh, M. Electro-catalytic oxidation of formaldehyde on copper electrode: a new kinetics model / M. Hasanzadeh, N. Shadjou // *Acta chimica Slovenica*. – 2013. – Vol. 60, No. 1. – P. 184-189.
5. Ohno, I. Anodic Oxidation of Reductants in Electroless Plating / I. Ohno, O. Wakabayashi, S. Haruyama // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1985. – Vol. 132, No. 10. – P. 2323-2330.
6. Oxidation of formaldehyde in an alkaline medium on a polycrystalline platinum electrode / P. Olivi, L. O. S. Bulhões, B. Beden, F. Hahn, J.-M. Léger, C. Lamy // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 1992. – Vol. 330, No.1-2. – P. 583-594.
7. Electrochemical properties of titanium-based catalytically active electrodes in perchloric acid / O. V. Kosohin, A. I. Kushmyruk, Y. S. Miroshnychenko, O. V. Linyucheva // *Materials Science*. – 2012. – Vol. 48. – P. 139-146.

### References

1. Bełtowska-Brzezinska, M. (1985). Electrochemical oxidation of formaldehyde on gold and silver. *Electrochimica Acta*, 30(9), 1193-1198. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(95\)80012-3](https://doi.org/10.1016/0013-4686(95)80012-3).
2. Stadler, R., Jusys, Z. & Baltruschat, H. (2002). Hydrogen evolution during the oxidation of formaldehyde on Au: The influence of single crystal structure and TI-upd. *Electrochimica Acta*, 47(28), 4485–4500. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00521-2](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00521-2).
3. Hasanzadeh, M., Khalilzadeh, B., Karim-Nezhad, G., Kazeman, I. & Abnosi, M.H. (2010). A New Kinetic-Mechanistic Approach to elucidate formaldehyde Electro-oxidation on Copper electrode. *Electroanalysis*, 22(2), 168-176. <https://doi.org/10.1002/elan.200900294>.
4. Hasanzadeh, M. & Shadjou N. (2013). Electro-catalytic oxidation of formaldehyde on copper electrode: a new kinetics model. *Acta chimica Slovenica*, 60(1), 184–189. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23841350>.
5. Ohno, I., Wakabayashi, O. & Haruyama, S. (1985). Anodic Oxidation of Reductants in Electroless Plating. *Journal of The Electrochemical Society*, 132(10), 2323-2330. DOI 10.1149/1.2113572.
6. Olivi, P., Bulhões, L.O.S., Beden, B., Hahn, F., Léger, J.-M. & C. Lamy. (1992). Oxidation of formaldehyde in an alkaline medium on a polycrystalline platinum electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 330(1–2), 583-594. [https://doi.org/10.1016/0022-0728\(92\)80331-W](https://doi.org/10.1016/0022-0728(92)80331-W).
7. Kosohin, O.V., Kushmyruk, A.I., Miroshnychenko, Y.S. & Linyucheva, O.V. (2012). Electrochemical properties of titanium-based catalytically active electrodes in perchloric acid. *Materials Science*, 48, 139–146. <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9483-0>.

Отримано 08.12.2023

UDC 544.6:547.281.1

**Mariia Sovhut<sup>1</sup>, Oleksii Kosohin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Master-student, Department of electrochemical production technology  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [maria.sovgut@gmail.com](mailto:maria.sovgut@gmail.com)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associated Professor of the Department of electrochemical production technology  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [o.kosogin@kpi.ua](mailto:o.kosogin@kpi.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8379-9580>

Researcher ID: [1-3040-2018](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580). SCOPUS Author ID: [55463712800](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580)

### ELECTROCHEMICAL DETERMINATION OF FORMALDEHYDE

*Pollution of the air and water environment with formaldehyde as a result of anthropogenic influence is a serious problem in Ukraine and the world. Even small amounts of formaldehyde have a negative impact on human health, so it is important to regularly monitor the content of the pollutant in water environments.*

*Direct and indirect methods of analysis are commonly used to determine formaldehyde, however, such methods are expensive, require expensive reagents, and have low sensitivity. That is why there is a need to develop an electrochemical method based on oxidation/reduction processes of formaldehyde on electrodes. The use of an electrochemical method for the determination of formaldehyde makes it possible to develop sensitive devices suitable for its operational monitoring.*

*The purpose of this work is to research electrode materials suitable for electrochemical oxidation of formaldehyde and to create an electrochemical system, the use of which will allow obtaining more accurate and sensitive results, which is important for reliable control over the level of formaldehyde in solutions.*

*The studies were carried out using platinum and platinum-plated titanium as working electrodes, the working solution was sodium hydroxide  $0.1 \text{ mol/dm}^3$  and 30% formaldehyde solution as the starting solution, which was used to create the required concentration in the working solution by dilution. The study of the behavior of electrode materials in various solutions was carried out using a three-electrode circuit by the method of cyclic voltammetry with a linear sweep of the potential. As a result, the oxidation potential of formaldehyde was determined, which was  $0.3 \text{ V}$  for platinum-plated titanium. In the potentiostatic mode, the dependence of the formaldehyde oxidation current on its concentration in the solution was investigated. The composition of the auxiliary electrode is proposed - a dispersed titanium with the addition of EDM-2 manganese dioxide, and its low polarization under the action of cathodic and anodic currents is determined. On the basis of the obtained results, a two-electrode system is proposed for determining of formaldehyde content in aqueous media, using which a linear dependence of the current generated at the working electrode on the concentration of formaldehyde in the solution is obtained, which makes it possible to draw a conclusion about the suitability of the created system for monitoring the formaldehyde content in aqueous solutions.*

**Keywords:** formaldehyde; electrochemical determination; voltammetry; working electrode; auxiliary electrode; sensor; platinum-plated titanium; manganese dioxide.

*Fig.: 10. References: 7.*