

КОРОЗИМЕТРИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ОПОРУ

Г. С. ВАСИЛЬЄВ, Ю. С. ГЕРАСИМЕНКО

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

Застосовано метод поляризаційного опору для корозійного моніторингу у водних техногенних середовищах. Розширено уявлення про вплив на точність визначення поляризаційного опору електродної ємності та електрохімічних перетворень у шарі продуктів корозії. Результати теоретичних напрацювань лягли в основу створення вітчизняних засобів корозійного моніторингу. Описано українські корозиметри: лабораторний восьмиканальний P5126, портативний ІК-4п і стаціонарний ІК-4с. Застосування корозиметрів дає можливість виконувати неперервний моніторинг корозійного стану трубопроводів, оперативно вживати заходів протикорозійного захисту, визначати ресурс роботи обладнання та здійснювати своєчасні ремонтні роботи.

Ключові слова: швидкість корозії, поляризаційний опір, корозійний моніторинг, корозиметр, поляризаційна ємність.

У багатьох галузях народного господарства: нафтовій, газовій та хімічній промисловості, комунальному господарстві, енергетиці тощо використовують сталеві трубопроводи. Їх експлуатація у водних техногенних середовищах тісно пов'язана із проблемами корозії [1–3]. За даними Української асоціації корозіоністів прямі збитки від корозії сягають 5% ВВП, опосередковані збитки через ліквідацію наслідків аварій, екологічних катастроф та відновлення інфраструктури перевищують прямі в десятки разів.

Основою корозійно-безпечної експлуатації сталевих трубопроводів є застосування протикорозійного захисту на базі корозійного моніторингу в режимі реального часу. Такі інтегральні методи як масометрія або аналіз вирізок труб не можна використовувати для моніторингу, оскільки для отримання результатів необхідно багато часу і тому неможливо налагодити систему зворотного зв'язку. Застосування дефектоскопів, зокрема ультразвукових [4], дає змогу виявляти пошкодження стінок трубопроводів до виникнення аварій, але не завжди трубопровід великої протяжності легкодоступний для діагностики.

Корозійний моніторинг у режимі реального часу можливо налагодити на основі аналізу корозійної агресивності середовища. Взагалі виміряна корозивність не відповідає дійсній швидкості корозії трубопроводу через багаторічний шар осаду на його поверхні, але дозволяє оцінити агресивність середовища та керувати засобами захисту.

Для корозійного моніторингу застосовують електрохімічні методи, а саме: поляризаційного опору, електрохімічного імпедансу та шуму [5]. Всі вони мають свої переваги та недоліки, однак найбільш простим, чутливим та оперативним є метод визначення швидкості корозії металу за поляризаційним опором [6].

Розвиток методу поляризаційного опору. Метод поляризаційного опору базується на оберненій залежності між струмом корозії та поляризаційним опором, який визначають як похідну потенціалу електрода за струмом поляризації:

$$R_p = \frac{dE}{dI} \Big|_{E_{\text{сог}}} . \quad (1)$$

Вперше таку залежність запропонували в праці [7]. Пізніше отримали [8] аналогічну залежність для кородуючого електрода з водневою деполаризацією

$$R_p = \frac{b_a \cdot b_c}{2,3(b_a + b_c)} \cdot \frac{1}{i_{\text{сог}}} = B \cdot \frac{1}{i_{\text{сог}}} , \quad (2)$$

де b_a, b_c – Тафелевські нахили анодної і катодної поляризаційних кривих, mV.

Залежність (2) широко відома як основне рівняння методу поляризаційного опору. Коефіцієнту пропорційності B у літературі приділено велику увагу [9]. Незважаючи на значні зміни Тафелевських нахилів у різних умовах, B змінюється лише в межах від 13 до 52 mV для більшості проаналізованих систем. Це дає підставу використовувати метод поляризаційного опору для визначення швидкості корозії багатьох систем, яка може відрізнитись на декілька порядків.

У праці [10] розширено межі застосування методу поляризаційного опору для корозійних систем з дифузійним та пасиваційним контролем. Систематично проаналізовані та запропоновані залежності для розрахунків похибок вимірювання поляризаційного опору, які пов'язані з нелінійністю поляризаційних кривих. Показано [11], що найменші похибки під час вимірювання у водному нейтральному середовищі виникають за застосування двохелектродної комірки. Починаючи з цих робіт, двохелектродні давачі набули широкого поширення.

Точність розрахунку швидкості корозії за поляризаційним опором залежить від рівнянь, які зв'язують $i_{\text{сог}}$ та R_p . Коефіцієнт пропорційності B , що входить у ці рівняння, можна розрахувати теоретично за нахилами тафелевських ділянок поляризаційних кривих та отримати експериментально, якщо використати незалежний метод визначення швидкості корозії, наприклад, за втратою маси зразка. Чисельні літературні дані, а також дослідні результати, отримані корозіоністами кафедри електрохімії НТУУ “КПІ”, показали, що експериментальні значення досить часто не узгоджувались з теоретичними. Однією з причин розбіжностей могли бути недосконалі рівняння розрахунку B , отримані на основі кінетичної теорії Ердей-Груза та Фольмера, яка не враховувала структуру подвійного електричного шару.

Герасименком [12] на основі теорії електрохімічної перенапруги Фрумкіна виведені співвідношення методу поляризаційного опору для всіх основних корозійних систем з урахуванням тонкої структури будови подвійного електричного шару. Це суттєво знизило розбіжності між теоретичними і експериментальними результатами, особливо за корозії в розведених розчинах (природних водах) чи наявності в корозивному середовищі поверхнево-активних речовин (інгібіторів корозії), і суттєво збільшило надійність методу поляризаційного опору (рис. 1).

Подальші праці направлені на зниження впливу електродної ємності на результат вимірювання поляризаційного опору для електродів, вкритих шаром продуктів корозії [13–17]. Для визначення швидкості корозії за цих умов на основі рівняння перехідних процесів для RC-кіл виведено аналітичну залежність [18]. Її використання дає змогу скоротити тривалість вимірювання до 1 min, тоді як час повного заряду ємності може досягати 20...30 min.

Праці останніх років [18–21] присвячено дії електрохімічних перетворень продуктів корозії на поверхні давача та їх впливу на результат вимірювання швидкості корозії. Показано, що електрохімічна активність продуктів корозії особливо проявляється в холодній воді і призводить до підвищення швидкості корозії у 2–3 рази. Для цих умов знайдені скореговані коефіцієнти перерахунку поляризаційного опору у швидкість корозії.

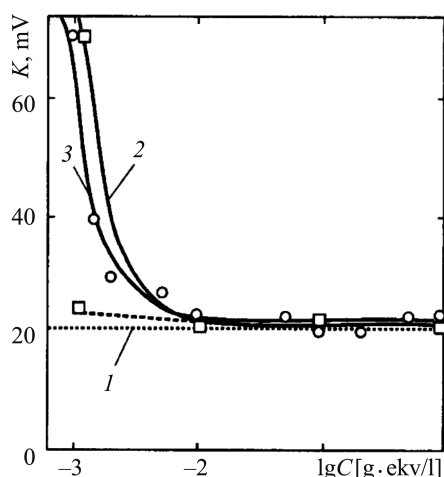


Рис. 1. Залежність коефіцієнта пропорційності K від концентрації сульфатної кислоти для залізного електрода:
 1 – теоретична без урахування структури подвійного електричного шару;
 2 – з урахуванням структури подвійного електричного шару; 3 – експериментальна.

Fig. 1. The proportionality coefficient K vs. concentration of sulphuric acid for iron electrode: 1 – theoretical curve without accounting a double layer structure; 2 – with account of the double layer structure; 3 – experimental.

Особливості вимірювання поляризаційного опору. Значення поляризаційного опору металу можна отримати різними електрохімічними методами. На сьогодні відомі методи циклічної поляризації електрода в області потенціалу корозії [22], потенціо- та гальваностатичної імпульсної поляризації [23–25]. Метод гальваностатичної поляризації дає змогу врахувати опір розчину під час вимірювання, тому він є прийнятнішим.

Принцип вимірювання ґрунтується на моделюванні меж розділу сталь/водне середовище двохелектродного давача у вигляді еквівалентної схеми (рис. 2а), де поляризаційна ємність C_p включає поляризаційні ємності кожного з електродів. Паралельно підключений резистор R_p , який моделює суму поляризаційних опорів на обох електродах давача. Резистор R_s моделює опір електроліту в міжелектродному просторі.

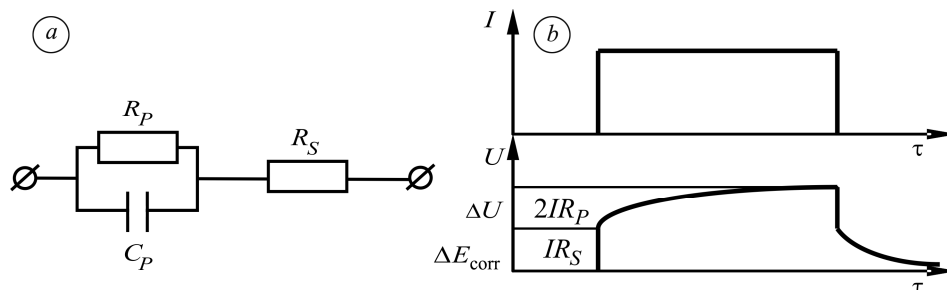


Рис. 2. Спрощена схема еквівалента двохелектродного давача (а); епюри зміни струму I та напруги U під час вимірювання поляризаційного опору R_p гальваностатичним методом (b).

Fig. 2. Simplified equivalent circuit of two-electrode probe (a); diagrams of current I and voltage U during R_p measurement in galvanostatic mode (b).

Під час вимірювання імпульсним методом гальваностатичної поляризації корозиметр генерує прямокутний імпульс струму I (рис. 2b). При цьому різниця потенціалів на електродах давача змінюється практично миттєво від початкового стаціонарного значення різниці корозійних потенціалів обох електродів ΔE_{corr} на величину IR_s і далі експоненційно зростає у часі внаслідок зарядження C_p до $\Delta U = 2IR_p$.

Після відключення струму відбувається зворотний процес миттєвого спаду омичної складової та розрядження C_p . Віднімаючи величину IR_s від загальної зміни напруги на електродах, прилад вираховує значення напруги $2IR_p$ і, відповідно, R_p .

Двохелектродні давачі швидкості корозії. Щоб визначити швидкість корозії металу за методом поляризаційного опору, застосовують спеціальні електрохімічні комірки – давачі корозії (ДК), які можна монтувати у трубопроводі. Електроди ДК виготовляють із такого ж металу, як і трубопровід, що забезпечує протікання корозійного процесу з однаковою швидкістю. Їх можна застосовувати також для виконання корозійних випробувань методом масометрії (як зразки-свідки). Однією з умов надійної роботи давача є ідентичність електродів за складом, формою, геометричними розмірами, якістю підготовки поверхні та гідродинамічними умовами взаємодії з середовищем.

Найвідоміші ДК закордонних фірм “Саргосо”, “Сормон”, “Metal samples” [26–28]. Давачі виготовляють з двома або трьома електродами. Електроди можуть бути знімними у формі циліндрів з бічною робочою поверхнею або запресованими у корпус давачів з торцевою робочою поверхнею (компланарні).

Фахівцями НТУУ “КПІ” розроблено вітчизняні ДК з двома циліндричними електродами. Розміри електродів: довжина 30 mm, \varnothing 6 mm; стандартний матеріал – маловуглецева сталь Ст20. За необхідності можна виготовити електроди з інших марок сталей або металів.

Давач корозії ДК-1 вводять у трубопровід через патрубок та притискають гайкою (рис. 3а) [29]. Такий спосіб монтажу витримує тиск до 6,4 МПа. Давачі застосовують у системах гарячого водопостачання населених пунктів, нагрівання та охолодження промислових підприємств, видобутку та транспортування нафти, а також у лабораторних дослідженнях корозії. Недоліком конструкції є необхідність зупинки роботи трубопроводу для ревізії, очищення або заміни електродів давача під час експлуатації [30].

Щоб забезпечити можливість вилучати давач для очищення або заміни електродів без зупинки роботи трубопроводу, розробили конструкцію ДК з лубрикатором – ДК-2 (рис. 3б) [31].

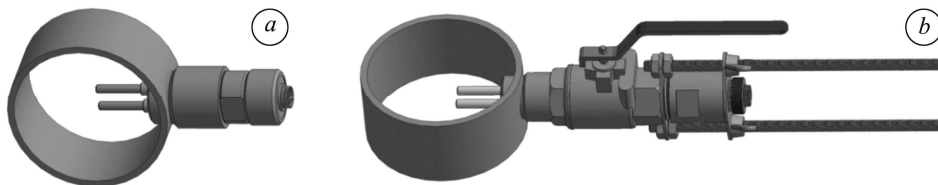


Рис. 3. Давачі корозії ДК-1 (а) та ДК-2 (б) у трубопроводі.

Fig. 3. Corrosion probes ДК-1 (a) and ДК-2 (b) in a pipeline.

Конструкція лубрикатора витримує робочий тиск до 1,6 МПа. Її особливістю є можливість переміщення давача з трубопроводу в лубрикатор під час експлуатації. Для цього достатньо послабити гайки на напрямних стрижнях і під дією внутрішнього тиску в трубопроводі давач виштовхується в лубрикатор. Коли електроди давача опиняються в лубрикаторі слід перекрити шаровий кран. Після цього тримач з електродами можна вилучити з лубрикатора для ревізії або заміни.

Основними областями застосування давача є системи тепловодопостачання, водні промислові системи охолодження та нагрівання. ДК-2 можна застосовувати в системах видобутку і транспортування нафти та інших, де протікає електрохімічна корозія металів і сплавів.

Корозиметри на основі методу поляризаційного опору. Відома низка корозиметрів, розроблених різними фірмами на основі методу поляризаційного опору. Всі засоби корозійного моніторингу можна розділити на портативні та стаціонарні прилади. Портативні – поширеніші, оскільки дешевші та дають змогу обслуговувати декілька точок збору даних. Серед них слід виділити прилади за-

хідних фірм “Cormon”, Англія [32], “Metal samples”, США [33], російські прилади “Монікор” [34], “КМ-МИСиС” [35]. Відомим вітчизняним корозиметром є прилад розроблений інститутом Патона УИСК [23].

До перших вітчизняних стаціонарних корозійних приладів належать корозиметри P5035 та P5126, які розроблені фахівцями кафедри ТЕХВ НТУУ “КПІ” спільно з інженерами ВО “Точелектроприлад” під керівництвом Ю. С. Герасименка. Корозиметр P5035 входив до складу корозійно-індикаторної установки УК-1, яка призначалася для визначення корозивності солевмісних стічних вод нафтопромислів та її зміни під впливом різних чинників (температури, швидкості потоку, рН, концентрації кисню, інгібіторів тощо) [36]. Корозивність води оцінювали за швидкістю корозії металу, яку вираховували із вимірюючого поляризаційного опору приладом P5035. Використовували мостову схему вимірювання. Наступним вітчизняним корозиметром став автоматичний восьмиканальний індикатор поляризаційного опору P5126, який ввійшов до складу корозійно-індикаторної установки УК-2 [37]. Прилад визначав поляризаційний опір електродів давача з одночасною автоматичною компенсацією опору розчину і початкової різниці потенціалів, автоматично перераховував виміряний поляризаційний опір електрода давача у швидкість корозії за встановленим коефіцієнтом перерахунку та забезпечував цифрову індикацію відліку поляризаційного опору (Ω) або швидкості корозії (mm/year). У приладі використовували гальваностатичну схему вимірювання, побудовану на інтегральних мікросхемах. Раніше [38] розроблено систему комп'ютерної реєстрації значень поляризаційного опору, отриманих індикатором поляризаційного опору P5126. Для потреб виробництва розробили одноканальні аналоги індикатора P5126: портативний індикатор ПІК-1 та стаціонарний індикатор СІК-2. У вказаних корозиметрах результат вимірювання виводився лише на екран, без автоматичної реєстрації.

Індикатор поляризаційного опору P5126 з успіхом використовують у промислових та дослідницьких лабораторіях для визначення корозивності водних техногенних середовищ та оцінки ефективності інгібіторів. Застосування цього приладу використано в ДСТУ 9.514-99 “Інгібітори корозії металів для водних систем. Електрохімічний метод визначення захисної здатності”.

Подальший розвиток вітчизняних корозиметрів – розроблення першого мікропроцесорного портативного індикатора корозії ПІК-2 [39]. Перед вимірюванням ПІК-2 програмується з персонального комп'ютера (ПК) через СОМ-порт в спеціально розробленому програмному середовищі. У прилад вносять дані про ДК, а саме, назву і коефіцієнт перерахунку поляризаційного опору у швидкість корозії. Під час вимірювання гальваностатичний струм подають на ДК, відгук напруги від нього потрапляє на підсилювач і далі в центральний процесор для фіксації і математичної обробки, згідно з алгоритмом вимірювання. Результат відображається на дисплеї і може бути занесений у довготривалу пам'ять приладу з прив'язкою до ДК, дати і часу виміру. Комп'ютерна програма забезпечує зчитування результатів вимірювання та записування їх у форматі MS Excel для подальшої обробки.

Розроблений корозиметр ПІК-2 призначений для оперативного визначення швидкості корозії металу у водних агресивних середовищах як у лабораторних, так і у промислових умовах і може бути використаний для періодичного визначення швидкості корозії на віддалених ДК (наприклад, вздовж теплотраси або нафтопроводу), де недоцільно застосовувати систему безперервного корозійного моніторингу.

ПІК-2 дослідили щодо похибок вимірювання на еквівалентній схемі двохелектродного давача. Відхилення значень швидкості корозії в робочому діапазоні індикатора від теоретичних не перевищують 5%. Але під час його експлуатації

виявили суттєвий недолік, пов'язаний із використанням уніполярного мікропроцесора – прилад чутливий до полярності підключення електродів ДК, що обмежило його подальше впровадження.

Для виконання безперервного корозійного моніторингу та реєстрації результатів вимірювання розроблено стаціонарний індикатор корозії СІК-3 [40]. Одноканальний корозиметр оснащений аналоговим перетворювачем сигналів типу напруга/струм зі стандартним струмовим виходом $I = 4 \dots 20$ mA. Це дає можливість передачі результатів вимірювання на контролер для подальшої обробки та управління засобами протикорозійного захисту. СІК-3 можна використовувати для безперервного визначення швидкості корозії на давачах, які знаходяться на відстані до 10 m від корозиметра (наприклад, в котельні).

На промислових об'єктах, котельнях, теплових пунктах доцільно встановлювати ряд ДК на різних трубопроводах: підживлення, прямих, зворотних тощо. В таких системах один корозиметр мають послідовно підключати до кожного давача і вимірювати. Для цього розроблена система автоматизованого корозійного моніторингу САКМ-1 [40], до складу якої входять ДК-1 (9 штук), СІК-3, контролер Unitronics Vision 230, реле комутації давачів 24 V, з'єднувальні кабелі.

Контролер Unitronics Vision 230 запрограмований на підключення давачів до корозиметра із заданою періодичністю, вимірювання та архівування результатів. Період опитування давачів можна задати в межах 1...59 min залежно від динаміки корозійного процесу. Архів контролера має місткість 3500 записів, що дає змогу виконувати моніторинг упродовж 4 місяців за періодичності опитування один вимір на годину.

Під час вимірювання вихідний сигнал СІК-3 передається на контролер для індикації та архівування. Дані з пам'яті контролера можна зчитати на ПК через відповідний СОМ-порт. Далі їх можна застосувати для аналізу корозійної ситуації, визначення ефективності засобів захисту, знаходження середньоінтегральних значень швидкості корозії тощо.

Промислові випробування САКМ-1 на індивідуальному тепловому пункті житлового будинку показали достатню достовірність отриманих результатів порівняно з методом масометрії. Похибка вимірювань – в межах 3...17%. З отриманих результатів можна зробити висновок, що САКМ-1 з достатньою точністю визначає миттєву швидкість у системі гарячого водопостачання та може бути застосована для корозійного моніторингу з використанням засобів протикорозійного захисту та прогнозування корозійної поведінки металу.

Новітні мікропроцесорні корозиметри серії ІК-4. Останніми розробками фахівців НТУУ “КПІ” є мікропроцесорні корозиметри серії ІК-4. Для періодичного визначення швидкості корозії металів розроблено портативний індикатор корозії ІК-4п. Корозиметр працює від елементів живлення типу ААА та призначений для оперативного визначення швидкості корозії металу у водних агресивних середовищах як у лабораторних, так і в промислових умовах. Давачами можуть бути двохелектродні ДК-1 та ДК-2.

Роботою індикатора корозії ІК-4п керує біполярний мікропроцесор. Перед вимірюваннями користувачу пропонується вибрати ДК з переліку або ввести новий зі своїм коефіцієнтом перерахунку поляризаційного опору у швидкість корозії. Під час вимірювання на ДК подають струм поляризації. Відгук потенціалу від ДК потрапляє на підсилювач напруги і далі в мікропроцесор для фіксації і математичної обробки згідно з алгоритмом вимірювання. Результат відображається на дисплеї і може бути занесений в довготривалу пам'ять приладу ІК-4п для подальшого відтворення в автономному режимі або через комп'ютер.

Для корозійного моніторингу в котельнях та теплових пунктах розроблено новий стаціонарний індикатор корозії ІК-4с. Прилад компактний, виконаний у за-

хисній електричній шафі розмірами 280×250×100 mm. ІК-4с працює в комплекті із двома двохелектродними давачами типу ДК-1 або ДК-2, які встановлюють на прямому та зворотному трубопроводах котельні. ІК-4с оснащено біполярним мікропроцесором та вбудованою пам'яттю на 1000 вимірів. Результат виводять на екран, заносять у пам'ять приладу, а також подають на промисловий інтерфейс RS-485.

Для роботи з приладами ІК-4 розроблено комп'ютерну програму, яка дає змогу створювати список здавачів, задавати константи перерахунку поляризаційного опору у швидкість корозії для кожного з них. Для спрощення аналізу результатів вимірювань на ПК прилад може записувати дані на SD-карту у форматі .txt. За допомогою програми можна завантажувати архів вимірювань на комп'ютер, одразу будувати графік залежності швидкості корозії від часу або зберігати дані у файл, який далі можна обробляти в MS Excel.

Таким чином, фахівцями НТУУ "КПІ" розроблено комплекс сучасного вітчизняного обладнання для корозійного моніторингу в різних галузях господарства, яке дає можливість виконувати неперервний моніторинг корозивної агресивності середовища в трубопроводі, оперативно вживати заходів для її зниження, визначати ресурс роботи трубопроводів та планувати вчасну заміну спрацьованих ділянок.

ВИСНОВКИ

Розглянуто розвиток методу поляризаційного опору, а саме: розширено уявлення про вплив на точність визначення поляризаційного опору нелінійності поляризаційної кривої, природи подвійного електричного шару, поляризаційної ємності та електрохімічних перетворень у шарі продуктів корозії. Результати теоретичних напрацювань лягли в основу створення вітчизняних засобів корозійного моніторингу.

Розроблено конструкції двохелектродних давачів швидкості корозії ДК-1 та ДК-2 для використання в трубопроводах різного призначення: в енергетиці, комунальному господарстві, нафтовій та газовій промисловості тощо. Налагоджено випуск та впровадження розроблених давачів.

Розглянуто розвиток українських корозиметрів на основі методу поляризаційного опору від перших вітчизняних Р5035, Р5126 до мікропроцесорних нового покоління: портативний ІК-4п та стаціонарний ІК-4с. Для зручності та оперативності аналізу результатів корозійного моніторингу розроблено спеціальне програмне забезпечення. Застосування корозиметрів дозволяє виконувати неперервний моніторинг корозійного стану трубопроводів, оперативно вживати заходів протикорозійного захисту, визначати ресурс роботи трубопроводів та здійснювати своєчасні ремонтні роботи.

РЕЗЮМЕ. Применен метод поляризационного сопротивления для коррозионного мониторинга в водных техногенных средах. Расширено представление о влиянии на точность определения поляризационного сопротивления электродной емкости и электрохимических превращений в слое продуктов коррозии. Результаты теоретических наработок легли в основу создания отечественных средств коррозионного мониторинга. Описаны украинские коррозиметры: лабораторный восьмиканальный Р5126, портативный ИК-4п и стационарный ИК-4с. Применение коррозиметров позволяет выполнять непрерывный мониторинг коррозионного состояния трубопроводов, оперативно принимать меры противокоррозионной защиты, определять ресурс работы оборудования и проводить своевременные ремонтные работы.

SUMMARY. The application of polarization resistance technique for corrosion monitoring in technogenic water media is discussed. The main contributions include an expanded understanding of the impact of non-linearity of polarization curve on the accuracy of the polarization resistance measurement, the influence of the nature of double electric layer, the electrode capacitance influence and electrochemical transformations in the layer of corrosion products. The re-

sults of theoretical developments formed the basis for design of new generation corrosion monitoring instrument. The Ukrainian corrometers: the laboratory automatic 8-channel corrometer P5126 and industrial portable ІК-4п and stationary ІК-4с corrometers are discussed. Use of corrometers allows us to carry out continuous corrosion monitoring of pipelines, promptly the take action of corrosion protection, determine the lifetime of the equipment and perform the replacement of the worn components.

1. *McNeill L. S. and Edwards M.* Iron pipe corrosion in distribution systems // *J. Am. Water Works Assoc.* – 2001. – **93**. – P. 88–100.
2. *Lin J., Ellaway M., and Adrien R.* Study of corrosion material accumulated on the inner wall of steel water pipe // *Corr. Sci.* – 2001. – **43**. – P. 2065–2081.
3. *Physico-chemical characteristics of corrosion scales in old iron pipes / P. Sarin, V. L. Snoeyink, J. Bebee, W. M. Kriven, and J. A. Clement // Water Research.* – 2001. – **35**. – P. 2961–2969.
4. *Хейфец А. И.* Внедрение системы мониторинга состояния технологического оборудования тепловых сетей, опыт и перспектива использования // *Новости теплоснабжения.* – 2008. – № 4 (92). – С. 40–44.
5. *Andrade C. and Alonso C.* Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site // *Construction and building materials.* – 1996. – **10**, № 5. – P. 315–328.
6. *Герасименко Ю. С.* Развитие метода поляризационного сопротивления и разработка на его основе коррозионно-измерительной техники: Дис. ... д-ра техн. наук. – К., 1981. – 383 с.
7. *Wagner C. and Traud W.* Über die Deutung von Korrosionsvorgängen durch Überlagerung von elektrochemischen Teilvorgängen und über die Potentialbildung an Mischelektroden // *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie.* – 1938. – **44**, № 7. – P. 391–402.
8. *Stern M. and Geary A. L.* Electrochemical polarization: I. A. theoretical analysis of the shape of polarization curves // *J. Electrochem. Soc.* – 1957. – **104**, № 1. – P. 56–63.
9. *Мансфелд Ф.* Определение тока коррозии методом поляризационного сопротивления / Под ред. М. Фонтана, Р. Стэйл // *Достижения науки о коррозии и технологии защиты от нее.* – М.: Металлургия, 1980. – **6**. – С. 259–265.
10. *Антропов Л. И., Герасименко М. А., Герасименко Ю. С.* Определение скорости коррозии и эффективности ингибиторов методом поляризационного сопротивления // *Защита металлов.* – 1966. – **2**, № 2. – С. 115–121.
11. *Герасименко Ю. С.* Нелинейность поляризационной кривой и точность определения поляризационного сопротивления // *Защита металлов.* – 1979. – **15**, № 6. – С. 673–677.
12. *Герасименко Ю. С.* Учет структуры двойного электрического слоя в методе поляризационного сопротивления // *Защита металлов.* – 1984. – **20**, № 6. – С. 898–907.
13. *Борискин А. В., Герасименко Ю. С.* Поляризационная емкость корродирующих стальных электродов // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2004. – Спец. вип. № 4. – С. 41–46.
14. *Герасименко Ю., Борискин А.* Измерение скорости коррозии в системах с большой поляризационной емкостью // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2002. – Спец. вип. № 3. – С. 351–354.
15. *Prazak M.* The polarization resistance method for corrosion testing // *Mater. and Cor.* – 1974. – **25**. – P. 104–112.
16. *Azzeri N.* Corrosion rate measurements by polarization resistance on hindered surfaces exhibiting pseudo-capacitance // *J. Appl. Electrochem.* – 1976. – **6**. – P. 139–146.
17. *Ijsseling F.* Application of electrochemical methods of corrosion rate determination to systems involving corrosion product layers: P. 1: Linear polarization resistance measurement as an example of a simple method that can be performed with commercially available instruments // *British Cor. Journal.* – 1986. – **21**. – P. 95–101.
18. *Герасименко Ю. С., Васильев Г. С.* Двухступінчатий метод визначення швидкості корозії металів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2009. – **45**, № 6. – С. 122–126.
(*Herasymenko Yu. S. and Vasyly'ev H. S.* A two-step method for the evaluation of corrosion rate in metals // *Materials Science.* – 2009. – **45**, № 6. – P. 899–904.)
19. *Васильев Г. С., Бровченко А. В., Герасименко Ю. С.* Вплив продуктів корозії на вимірювання поляризаційного опору у холодній водогінній воді // *Вісник Східноукраїн. нац. ун-ту ім. Володимира Даля.* – 2013. – № 13 (202). – С. 201–211.
20. *Zou Y., Wang J., and Zheng Y.* Electrochemical techniques for determining corrosion rate of rusted steel in seawater // *Cor. Sci.* – 2011. – **53**. – P. 208–216.

21. *Electrochemical techniques correlation study of on-line corrosion monitoring probes* / J. Wu, D. Bai, A. Baker, Z. Li, and X. Liu // *Mater. and Cor.* – 2015. – **66**. – P. 143–151.
22. *Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering* / R. G. Kelly, J. R. Scully, D. W. Shoemsmith, and R. G. Buchheit. – N.-Y.: Marcel Dekker, 2003. – 436 p.
23. Поляков С. Г., Котлов Ю. Г. Применение коррозиметров поляризационного сопротивления в лабораторной и промышленной практике // *Физ.-хим. механика материалов.* – 1988. – **24**, № 5. – С. 95–97.
(Polyakov S. G. and Kotlov Y. G. Using corrosion meters of polarization resistance in laboratory and industrial practice // *Materials Science.* – 1988. – **25**, № 5. – P. 528–529.)
24. Чвірук В. П., Поляков С. Г., Герасименко Ю. С. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ. – К.: Академперіодика, 2007. – 324 с.
25. Jones D. A. and Greene M. D. Electrochemical measurement of low corrosion rates // *Corrosion.* – 1966. – **22**, № 7. – P. 198–216.
26. Retractable Linear Polarization Resistance (LPR) Probe [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.caproco.com/catalog/pdf/Probes-Instruments/Linear-Polarization-Resistance/Low-Pressure-Retractable/Retractable-LPR-2-or-3-Element.pdf>.
27. Common Intrusive Measurement Probes [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: http://www.teledyneoilandgas.com/_document/TDY_317_IntrusiveMeasure_IFS321931_RevC_1.pdf
28. Linear Polarization Resistance Probe Model LP1000 [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.alspi.com/lp1000>.
29. Коррозионно-индикаторная установка типа УК-2 / Ю. С. Герасименко, Н. Ф. Кулешова, А. В. Борискин, В. И. Сорокин, Н. В. Федченко // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 1989. – **11**. – С. 23.
30. Балабан-Ирменин Ю. В., Литовских В. М., Рубашов А. М. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей. – М.: Новости теплоснабжения, 2008. – 288 с.
31. Васильев Г. С., Герасименко Ю. С. Промислові випробування засобів корозійного моніторингу систем тепlopостачання // *Зб. наук. пр. “Сучасні проблеми електрохімії: освіта, наука, виробництво”.* – Харків: НТУ “ХПР”, 2015. – С. 66–67.
32. Common Data Transmitters and Receivers [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: http://www.teledyneoilandgas.com/_document/TDY_317_DataTransmitter_IFS344988_RevB_1.
33. MS1000 Corrosion Meter [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.alspi.com/manuals/ms1000manual.pdf>.
34. Diagnostics of corrosive state of main gas pipelines with module probe technology / A. V. Popov, V. A. Zhelobetskii, S. V. Bausov, and V. A. Popov // *Russian J. Nondestructive Testing.* – 2009. – **45**, № 11. – P. 806–809.
35. Кошкин Б. В., Щербаков В. Н., Васильев В. Ю. Оценка коррозионного состояния тепловых сетей // *Новости теплоснабжения.* – 2004. – № 4 (44). – С. 32–36.
36. Измеритель скорости коррозии Р 5035 / Л. И. Антропов, В. М. Бабенков, Е. А. Будницкая, Ю. С. Герасименко, М. А. Герасименко, И. А. Король // *Защита металлов.* – 1976. – **12**, № 2. – С. 234.
37. Коррозионно-индикаторные установки типа УК для нефтяной отрасли / Ю. С. Герасименко, В. И. Сорокин, Н. Ф. Кулешова, А. В. Борискин, Н. В. Федченко // *Научн.-производ. достижения нефтяной отрасли в новых условиях хозяйствования.* – 1989. – № 2. – С. 16–17.
38. Герасименко Ю. С., Васильев Г. С. Двоступінчатий метод визначення швидкості корозії металів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2012. – **48**, № 5. – С. 124–126.
(Vasyl'ev H. S. Measurement of polarization resistance with computer logging of results // *Materials Science.* – 2013. – **48**, № 5. – P. 694–696.)
39. Патент 52523 Україна, МПК G01N 27/28. Мікропроцесорний вимірювач поляризаційного опору / Ю. С. Герасименко, Г. С. Васильев. – u201003235; заявл. 23.03.2010. – Опубл. 25.08.2010, Бюл. № 16.
40. Васильев Г. С., Герасименко Р. Ю., Герасименко Ю. С. Система автоматизованого корозійного моніторингу трубопроводів гарячого водопостачання багатопверхового житлового будинку // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2014. – Спец. вип. № 10. – С. 487–493.

Одержано 30.05.2016