

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВАСИЛЬЄВА СВІТЛАНА МИХАЙЛІВНА



УДК 620.197.3

**ЗАХИСТ ВІД КОРОЗІЇ ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ В УМОВАХ  
НАКИПОУТВОРЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ  
ОБРОБКИ**

05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2020

*Дисертацією є рукопис*

Робота виконана на кафедрі технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Герасименко Юрій Степанович**  
КПІ ім. Ігоря Сікорського,  
провідний науковий співробітник  
кафедри технології електрохімічних виробництв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Хома Мирослав Степанович**  
Фізико-механічний інститут  
ім. Г.В. Карпенка НАН України  
завідувач відділу корозійного розтріскування металів

кандидат технічних наук  
**Клименко Анатолій Володимирович**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України  
старший науковий співробітник відділу зварювання  
газонафтопровідних труб

Захист дисертації відбудеться 12 лютого 2020 р. о 14:30 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.13 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ-56, пр. Перемоги 37, корп. 4, велика хімічна аудиторія.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ-56, пр. Перемоги 37.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент



Т.І. Мотронюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Корозія енергетичного обладнання призводить до його передчасного виходу з ладу, є причиною аварій і перебоїв у постачанні тепла та гарячої води, а також вимагає значних витрат на ліквідацію наслідків – ремонт або повну заміну спрацьованого обладнання. Іншою проблемою теплоенергетики України, яка гостро постала останнім часом, є вартість енергоносіїв, особливо природного газу. При нагріванні природних вод на теплообмінних поверхнях осідає накип – важкорозчинні солі карбонатів кальцію. Це призводить до перевитрати теплоносіїв, що в умовах жорсткої економії енергоресурсів є недопустимим. Вирішення вказаних проблем окремо лише погіршує ситуацію, оскільки пом'якшена вода без солей твердості має високу корозійну агресивність, а деаерування води для зниження корозії потребує додаткових витрат теплової енергії. Саме тому комплексне рішення проблеми утворення накипу та корозії теплообмінного обладнання, в основі якого лежить використання модифікованих карбонатних шарів з високими захисними властивостями, є актуальним завданням, що дозволить одночасно скоротити капітальні витрати енергетики на заміну теплоенергетичного обладнання та знизити вартість теплової енергії шляхом зменшення теплових втрат.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» згідно з планами держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки: №2044 «Високоефективна модифікація поверхні металу екологічно-безпечними сполуками для надання нових функціональних властивостей» (2017 – 2020 рр., номер державної реєстрації 0117U003854), № 2827п «Комплексне фізико-хімічне гальмування корозійних процесів і підвищення ефективності теплообміну у водному середовищі для енергозбереження ресурсів України» (2015 – 2016 рр., номер державної реєстрації 0115U002324), № 2662п «Протикорозійний захист конструкційних сталей у воді з високим вмістом продуктів згорання газу та твердого палива в теплогенераторах» (2013 – 2014 рр., номер державної реєстрації 0113U001593), № 2461п «Захист сталі від корозії в умовах роботи нових енергозберігаючих генераторів тепла – контактних водонагрівачів» (2011 – 2012 рр., номер державної реєстрації 0111U002174), № 2285п «Електрохімічне формування захисних фазових шарів на поверхні кородуючого металу за участю компонентів корозивного середовища» (2009 – 2010 рр., номер державної реєстрації 0109U001541).

**Мета і задачі дослідження.** Комплексне вирішення проблем корозії та накипоутворення в теплообмінному обладнанні шляхом застосування методу ультразвукової обробки теплообмінної поверхні для одночасного підвищення протикорозійного захисту та поліпшення теплопередачі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

- Розробити комплекс лабораторних установок для моделювання роботи теплоенергетичного обладнання;

- Дослідити кінетику формування накипу як при термічному накипоутворенні, так і кристалізації карбонатних осадів за умови перебігу електрохімічного процесу відновлення кисню;
- Визначити протикорозійну ефективність карбонатного осаду, що утворюється на поверхні сталі в умовах теплообміну;
- Встановити вплив складу та походження води на кінетику формування та властивості накипного шару;
- Дослідити вплив ультразвуку на формування та властивості карбонатних осадів;
- Встановити можливість видалення надмірного шару накипу ультразвуком та визначити режими ультразвукової обробки для підтримання товщини накипу на допустимому рівні.

Практичними завданнями є:

- Встановити режим роботи апарату ультразвукової обробки теплообмінної поверхні для протикорозійної модифікації та підтримки допустимої товщини карбонатних осадів;
- Виробити комплекс рекомендацій з експлуатації водогрійного обладнання в умовах ультразвукової обробки без пом'якшення води, при якій товщина накипу не перевищує допустимої 0,5 мм, а швидкість корозії сталі не перевищує 0,05 мм/рік.

*Об'єкт дослідження* – корозія теплообмінного обладнання в умовах накипоутворення.

*Предмет дослідження* – вплив ультразвуку на кінетику формування, протикорозійні властивості та вилучення надмірних карбонатних осадів з поверхні теплообміну.

**Методи дослідження.** Для дослідження протикорозійних властивостей карбонатних осадів було використано електрохімічні методи поляризаційного опору та хроноамперометрії. Для аналізу структури та складу поверхневих фазових шарів, сформованих на теплообмінній поверхні в умовах осадження накипу, використовували методи оптичної та скануючої електронної мікроскопії (SEM), енергодисперсійної спектроскопії (EDX), метод порошкової рентгенівської дифракції (XRD).

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. В результаті застосування методу поляризаційного опору для вимірювання швидкості корозії металу при термічній кристалізації накипу на його поверхні отримані нові дані зі зниження швидкості корозії сталі до нормативного значення 0,05 мм/рік, що забезпечується формуванням шару накипу товщиною 0,2 мм із води з твердістю 4,5 ммоль/л за 90 год.

2. Вперше показано, що під дією ультразвуку відбувається посилення протикорозійних властивостей карбонатних осадів на теплообмінній поверхні. Так, при амплітуді коливань магнітострикційного випромінювача 6 мкм захисний шар накипу, за якого швидкість корозії не перевищує 0,05 мм/рік, формується у 2 рази швидше і має в 2 рази меншу товщину та більшу щільність. Методами рентгеноструктурного аналізу та растрової електронної мікроскопії встановлено, що

карбонатні осади на поверхні сталі утворені переважно карбонатом кальцію в модифікації кальцит. Розмір кристалів карбонату кальцію зменшується у 6-8 разів при використанні в процесі осадження накипу ультразвуку.

3. Встановлено, що під дією ультразвуку відбувається підвищення протикорозійного захисту і збільшення теплопровідності накипу, що зумовлено однією спряженою групою факторів – зменшенням товщини та підвищенням щільності осаду карбонату кальцію, внаслідок чого, з огляду на вищу теплопровідність кристалічних фаз, відбувається збільшення теплопровідності в більшій мірі, ніж лише завдяки зменшенню товщини.

4. Встановлено, що при видаленні надлишкового накипу ультразвуком, на поверхні металу залишається захисний підшар осаду. Відкол накипу відбувається не від поверхні металу, а від міцно зчепленого з металом захисного підшару, який виявляє достатні захисні властивості і швидкість корозії теплообмінної поверхні не перевищує 0,05 мм/рік.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

- Розроблено ультразвуковий апарат УЗА для ультразвукової модифікації карбонатних осадів на теплообмінному обладнанні;
- Проведено випробування апарата УЗА та відпрацьовано його основні технічні характеристики для подальшого практичного застосування;
- Експериментально доведено посилення протикорозійного захисту металевої поверхні за умови покращення теплообміну при застосуванні ультразвукової технології модифікації карбонатних осадів;
- Широке застосування розробленої техніки дозволить зменшити збитки від перевитрати палива внаслідок зниження теплових втрат в процесі теплообміну та продовжить термін служби теплообмінного обладнання.

**Особистий внесок здобувача.** Основний обсяг експериментальної роботи, розробка та конструювання лабораторних установок, проведення корозійно-електрохімічних експериментів, обробка та аналіз результатів, формулювання висновків та підготовка матеріалів до публікацій, апробація результатів роботи на наукових конференціях виконані здобувачем особисто. Постановка мети і формулювання завдань дослідження, обговорення результатів та висновків проводились спільно з науковим керівником д.т.н., професором Ю.С. Герасименком. Дослідження морфології поверхні зразків методами растрової електронної мікроскопії та енерго-дисперсійної спектроскопії проведено в центрі електронної мікроскопії інженерно-фізичного факультету НТУУ «КПІ» під керівництвом провідного інженера кафедри ВТМПМ Романенка Ю.М. Дослідження структури карбонатних осадів виконано в КНУ ім. Тараса Шевченка разом з н.с., к.х.н. Бабариком А.А. Розробка ультразвукових генераторів виконана за участі ст. викладача РТФ КПІ ім. Ігоря Сікорського Новосада А.А та інженера Гаркавенка В.П.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень представлені на конференціях: Міжнародні конференції «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів «Корозія-2010», «Корозія-2012», «Корозія-2014» та «Корозія-2016» (Львів, 2010, 2012, 2014, 2016); «Електрохімічний захист і корозійний контроль» (Сєверодонецьк, 2013), I-VI

Міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології (Київ, 2009, 2010, 2012, 2014, 2016); IV, VI Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології» (Дніпропетровськ, 2011, 2015).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 17 наукових праць, у тому числі 8 статей наукових фахових виданнях (з них 2 статті у виданнях інших держав), 9 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, висновків, бібліографії та додатків. Загальний обсяг дисертації 174 сторінки. Робота містить 66 рисунків, 9 таблиць. Список використаних літературних джерел включає 100 найменувань (на 11 сторінках).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** висвітлено актуальність теми роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, показано наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів.

У **першому розділі** представлено аналіз сучасної наукової літератури щодо конструкційних особливостей, режимів роботи та основних проблем експлуатації теплообмінного обладнання систем гарячого водопостачання. Розглянуті сучасні механізми зародження та росту карбонатних осадів на поверхні металу в умовах теплообміну. Проаналізовано методи вирішення проблем утворення накипу та корозії в теплообмінниках, та підтверджено, що дана проблема потребує комплексного вирішення. Показано, що найбільш перспективним методом боротьби з накипом є застосування ультразвуку, наведено сучасні механізми видалення накипу з поверхні теплообміну. Визначено невирішені проблеми і пов'язані з ними основні завдання даної роботи. Зокрема, відзначено відсутність в літературі даних щодо впливу ультразвуку на корозійну стійкість сталі під накипом, оскільки обробку ультразвуком використовували лише для повного відшарування накипу, тоді як захисні властивості тонкого шару накипу на металевій поверхні залишилися поза увагою дослідників.

У **другому розділі** описано матеріали і реагенти для проведення дослідів, представлено методики досліджень та методи аналізів, охарактеризовано використане обладнання. Обґрунтовано склад модельних розчинів та концентрації компонентів, марки досліджуваних сталей. Для дослідження протикорозійних властивостей накипу в процесі термічної кристалізації було розроблено лабораторну установку (рис. 1). Робочий електрод складається із скляної трубки 1, на якій встановлено два сталеві циліндри 2 з струмопідводами і таким чином утворювався двохелектродний датчик, що дозволяв оцінювати швидкість корозії сталі методом поляризаційного опору в процесі осадження накипу. В середині скляної трубки розміщувалася ніхромові спіраль, що підключалася до трансформатора. Робочий електрод розміщувався в ємності, заповненій досліджуваним розчином. В дослідях, де вивчався вплив ультразвуку, випромінювач вводили в розчин через верхню кришку або розміщували установку на ультразвуковій ванні. Для забезпечення рівноважної концентрації кисню у воді в процесі кипіння в колбу додатково подавали повітря від компресора.

Другий більш універсальний та швидкісний метод дослідження впливу різних факторів на процес кристалізації карбонатних осадів – електрохімічний метод. Суть методу полягає у наступному. Під час катодної поляризації робочого електрода відбувається відновлення розчиненого у воді кисню, зсув вуглекислової рівноваги та утворення аніонів карбонату. Іони карбонату утворюють осад карбонату кальцію, що осаджується на поверхні робочого електрода, блокуючи поверхню від доступу кисню. Лабораторна установка (рис. 2) складалася із ємності, розміщеній в ультразвуковій ванні. В ємності розміщувався сталевий робочий електрод, що приводився в рух електродвигуном, допоміжний електрод – платинова сітка, електрод порівняння хлорид-срібний. Постійну температуру в установці підтримували за допомогою електронагрівача з терморегулятором. В дослідях, де вивчався вплив ультразвуку, випромінювач приєднували до дна ультразвукової ванни. Потенціал робочого електрода підтримувався на рівні  $-1,1$  В/х.с.е. операційним підсилювачем. Зміна сили струму в часі реєструвалася в ході дослідження.

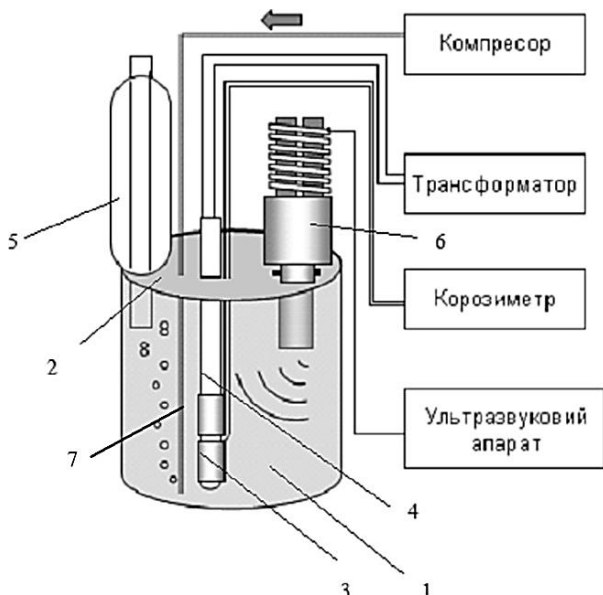


Рисунок 1 – Схема установки для термічної кристалізації:

1 – скляна ємність, наповнена робочим розчином,  $1 \text{ дм}^3$ ; 2 – фторопластова кришка; 3 – сталеві кільця; 4 – запаяна скляна трубка; 5 – зворотний холодильник; 6 – ультразвуковий випромінювач; 7 – трубка подачі повітря.

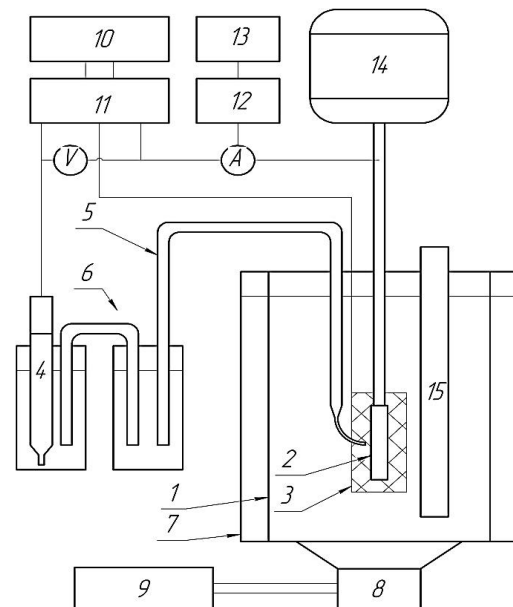


Рисунок 2 – Схема установки для катодної кристалізації: 1 – скляна комірка; 2 – робочий електрод; 3 – допоміжний електрод (платинова сітка); 4 – електрод порівняння; 5 – капіляр Лугіна; 6 – сольовий місток; 7 – ультразвукова ванна; 8 – ультразвуковий випромінювач п'єзострикційного типу; 9 – генератор ультразвуку; 10 – джерело струму (акумулятор); 11 – потенціостат; 12 – аналогово-цифровий перетворювач; 13 – ПК; 14 – електродвигун; 15 – електронагрівач з терморегулятором.

**Третій розділ** присвячений дослідженню електрохімічної поведінки маловуглецевих сталей типу Ст20 в умовах накипоутворення. Отримані поляризаційні залежності, що показують вплив накипу на хід катодних та анодних поляризаційних

кривих (рис. 3 та рис. 4). Так, з ростом товщини накипу відбувається зниження струму відновлення кисню на катодній кривій. В свою чергу на анодній кривій спостерігається значний вплив омічної складової падіння напруги. В цілому, механізм корозії в присутності шару накипу не змінюється, сталь кородує з кисневою деполаризацією, лімітуючою стадією процесу залишається транспорт кисню до поверхні електрода. Шар накипу не впливає на нахил анодних поляризаційних кривих і метод поляризаційного опору може бути застосований для визначення миттєвої швидкості корозії без додаткових поправок.

Осадження шару накипу на поверхні сталі призводить до її блокування від доступу кисню та зміщення корозійного потенціалу в анодний бік на 160 мВ. Розподіл поверхні на катодні і анодні ділянки призводить до перебігу катодної і анодної реакції корозії в різних порах шару накипу, а отже концентрація іонів  $\text{Fe}^{2+}$  вже не буде визначатися добутком розчинності  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , а входить напряму в рівняння Нернста. Збільшення товщини осаду призводить до збільшення довжини та звивистості пор, відповідно кількість іонів  $\text{Fe}^{2+}$ , що накопичуються біля поверхні електрода збільшується. Зміщення потенціалу в анодну сторону пояснюється накопиченням іонів заліза в порах карбонатного осаду.

Дія ультразвуку на досліджувану систему призводить до значного (до 10 разів) зростання катодного струму відновлення кисню внаслідок інтенсивного перемішування розчину під дією акустичних коливань та схлопування кавітаційних бульбашок. В той же час механізм протікання корозійного процесу в цих умовах не змінюється.

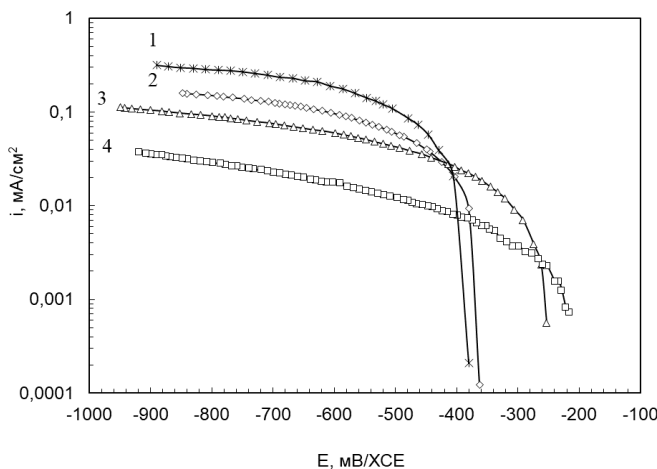


Рисунок 3 – Катодні поляризаційні криві сталі Ст20 у водогінній воді при різних тривалостях осадження накипу: 1 – чиста поверхня, 2 – 6 годин кипіння, 3 – 18 годин кипіння, 4 – 30 годин кипіння. Температура 25 °С. Швидкість розгортки потенціалу – 2 мВ/с.

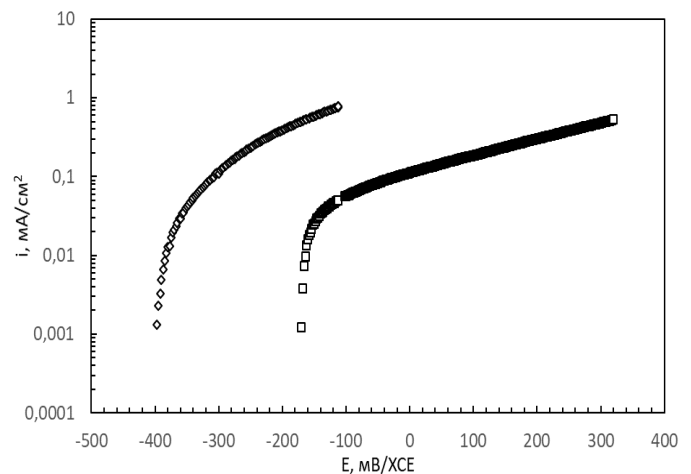


Рисунок 4 – Анодні поляризаційні криві сталі Ст20 у водогінній воді: 1 – чиста поверхня; 2 – поверхня вкрита карбонатним осадом. Температура 25 °С. Швидкість розгортки потенціалу – 2 мВ/с.

**Четвертий розділ** містить результати дослідження впливу умов формування карбонатного осаду на його захисні властивості. Так, при кристалізації карбонатних осадів за умови перебігу електрохімічного процесу відновлення кисню досліджено вплив твердості води на формування захисного шару (рис. 5). Як і очікувалося, вихідний струм відновлення кисню не залежить від твердості води.



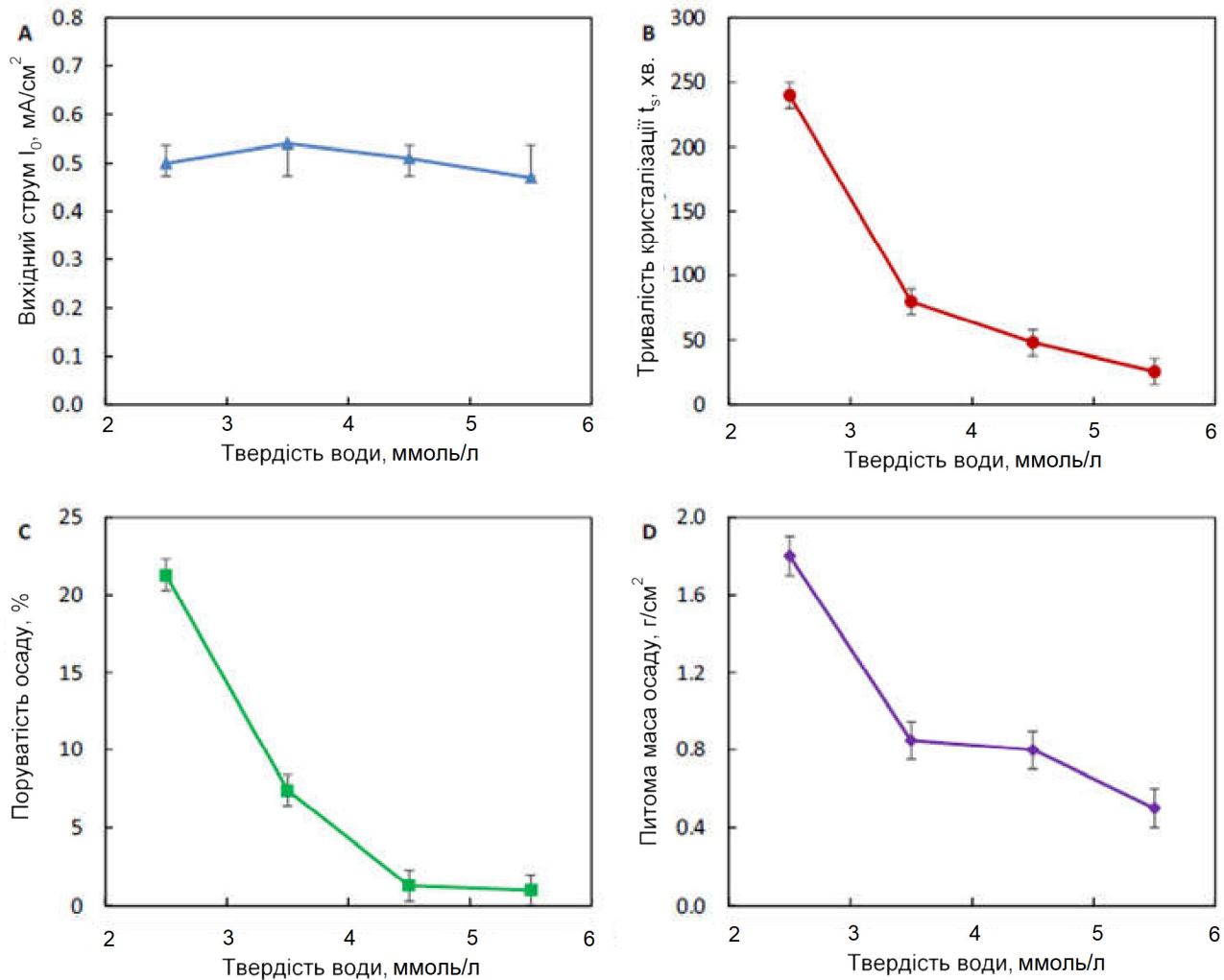


Рисунок 5 – Вплив твердості води на формування та властивості карбонатного осаду

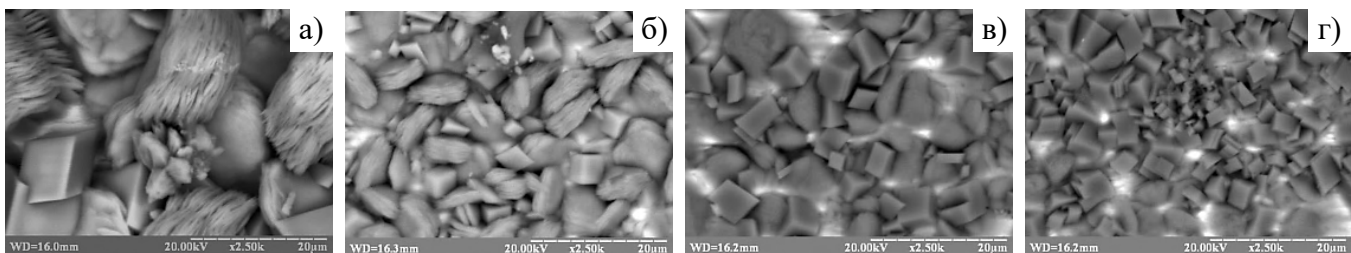


Рисунок 6 – Мікрофотографії осаду, сформованого з води різної твердості, ммоль/л:

а) – 2,5; б) – 3,5; в) – 4,5; г) – 5,5.

При зростанні твердості від 3,5 до 5,5 ммоль/л час кристалізації скорочується від 250 до 50 хв, а поруватість осаду досягає мінімальних значень – менше 1%. Також зменшується маса захисного шару. Зростання захисних властивостей осаду підтверджено на мікрофотографіях (рис. 6) – зі зростанням твердості зменшується розмір кристалів внаслідок утворення більшої кількості центрів кристалізації.

На рисунках 7 та 8 представлені результати дослідження температури на формування та властивості карбонатного шару як фактору інтенсифікації процесу. Дослідження проведено в модельній воді з твердістю 5 ммоль/л. Зростання температури в межах 15-35 °С призводить до підвищення вихідного струму в 2 рази внаслідок зниження в'язкості розчину.

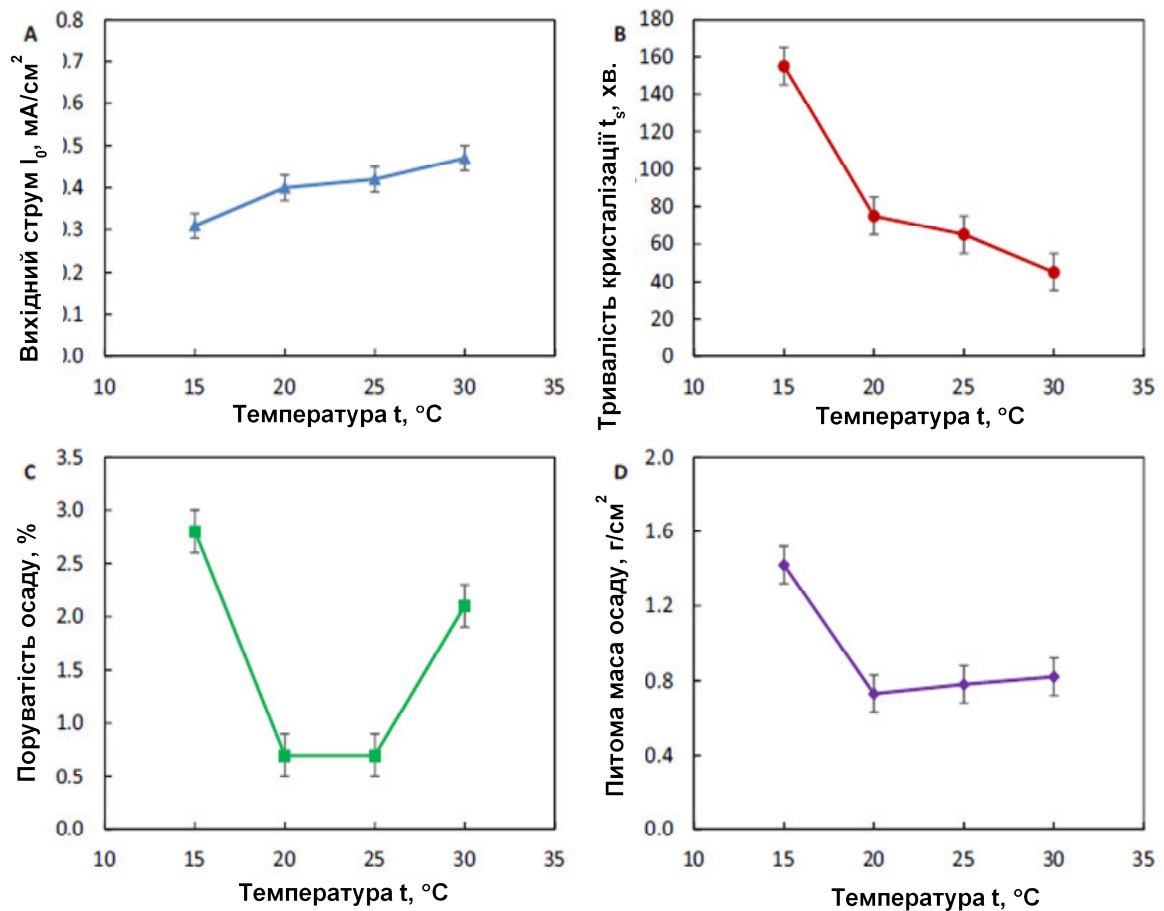


Рисунок 7 – Вплив температури води на формування та властивості карбонатного осаду.

Ріст вихідного струму сприяє інтенсифікації процесу осадження. Час кристалізації знижується у 4 рази, маса захисного шару – у 2 рази. Проте, поруватість осаду має екстремальну залежність. Мінімум поруватості приходить на інтервал температур 20-25  $^{\circ}\text{C}$  – менше 1%. Зростання температури збільшує поруватість осаду. Така залежність є наслідком досягнення максимальної швидкості осадження при даній твердості. Швидкість осадження є більшою, ніж концентрація кальцію, тому в осаді з'являються пори. Методом растрової електронної мікроскопії встановлено, що ріст температури (15-35  $^{\circ}\text{C}$ ) практично не впливає на розміри кристалів.

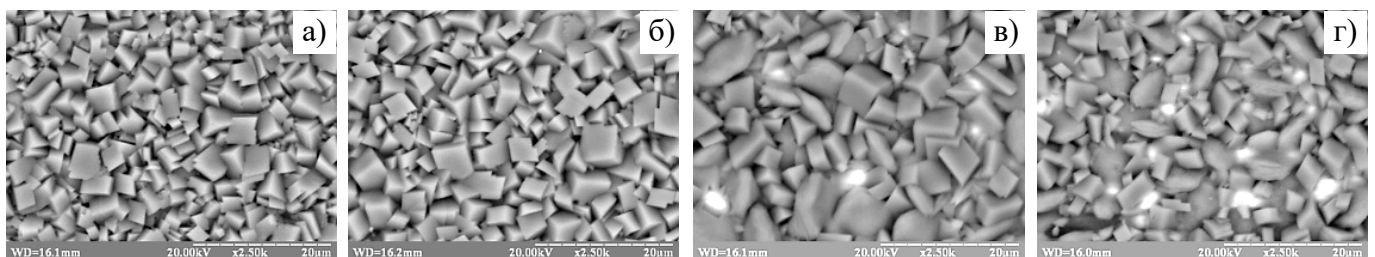


Рисунок 8 – Мікрофотографії осаду, сформованого при різній температурі,  $^{\circ}\text{C}$ :

а) – 15; б) – 20; в) – 25; г) – 30.

Результати впливу твердості води на властивості карбонатного шару, які були отримані методом кристалізації карбонатних осадів за умови перебігу

електрохімічного процесу відновлення кисню, було підтверджено і методом термічної кристалізації. У водах із низькою твердістю – до 2,5 ммоль/л захисний шар взагалі не формується, швидкість корозії тримається на досить високому рівні. З ростом твердості води від 5 до 20 ммоль/л відбувається прискорення формування захисного шару (рис. 9). Так, час формування шару накипу, що дозволяє знизити швидкість корозії до 0,05 мм/рік і нижче, скорочується з 200 до 15 годин, а товщина захисного шару – з 90 до 10 мкм. Аналіз мікрофотографій поверхні осаду карбонату кальцію після осадження показує, що зростання твердості води призводить до зменшення розмірів кристалів від 120 до 40 мкм (рис. 10).

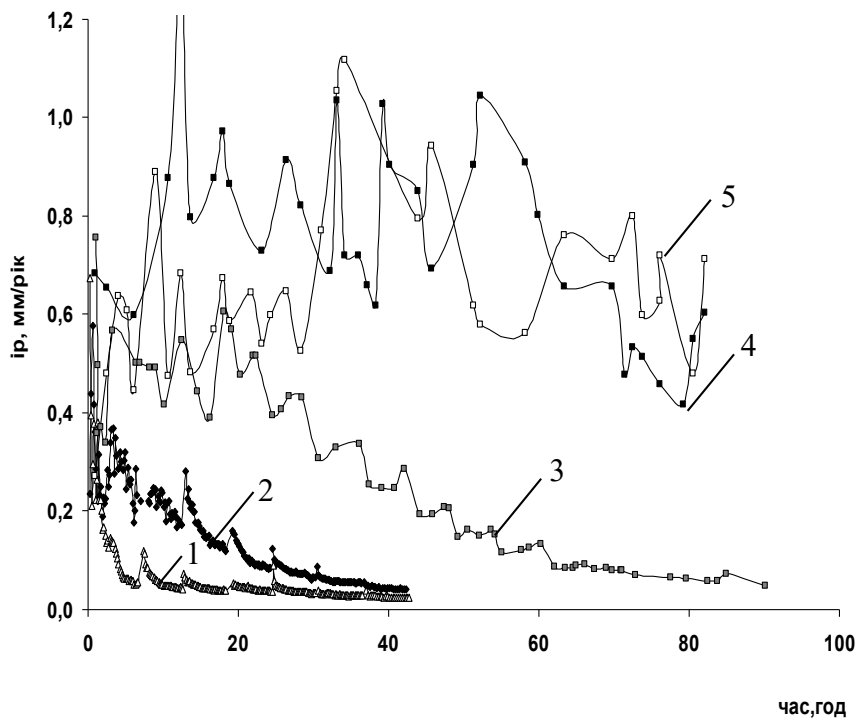


Рисунок 9 – Зміна швидкості корозії сталі з часом, при осадженні накипу з вод різної твердості, ммоль/л:

- 1 – 20;
- 2 – 10;
- 3 – 4,5;
- 4 – 2,25;
- 5 – 1,1.

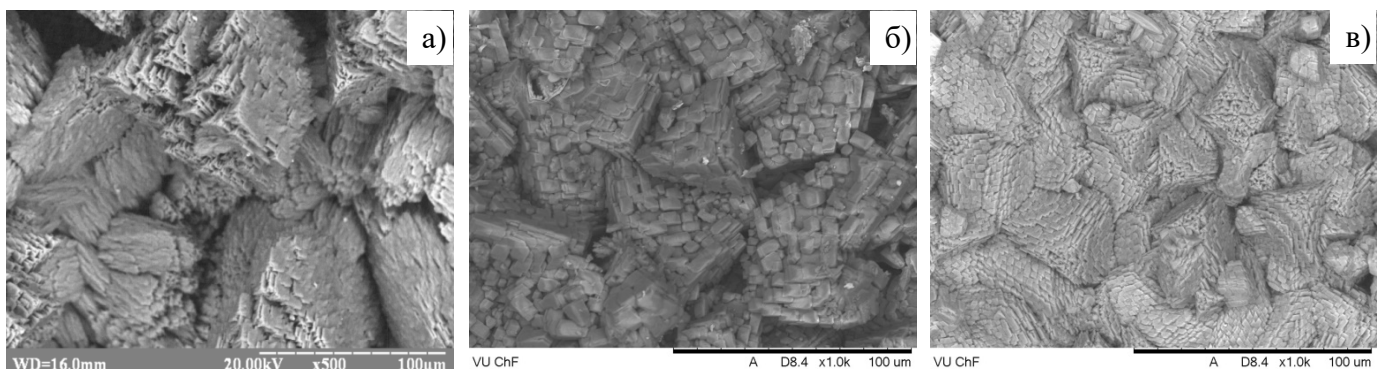


Рисунок 10 – Мікрофотографії осаду, за яких швидкість корозії досягає 0,05 мм/рік, сформованого з вод з різною твердістю, ммоль/л: а) – 4,5; б) – 10, в) – 20 .

На відміну від кристалізації карбонатних осадів за умови перебігу електрохімічного процесу відновлення кисню, термічне осадження не припиняється після закриття поверхні осадами. В реальному теплообмінному апараті також відбувається неперервний ріст накипу аж до повного закриття каналу теплообмінника. Саме тому надлишковий накіп слід видаляти після формування захисного шару.

**П'ятий розділ** присвячений впливу ультразвукових коливань на формування та властивості шару накипу. В роботі було використано 2 способи генерації ультразвуку – магнітострикційний та п'єзострикційний. Магнітострикційні апарати працюють в імпульсному режимі подачі коливань, а п'єзострикційні – генерують неперервні ультразвукові коливання.

У дослідженні використано ультразвукові апарати розробки КПІ ім. Ігоря Сікорського – «ЗВУК-3» з частотою 18 кГц та амплітудою коливань вільного кінця випромінювача 1,5-3 мкм, апарат «УЗА» з частотою коливань 28 кГц та змінною амплітудою в межах 1-15 мкм (1-8 Вт/см<sup>2</sup>). Також були використані апарати закордонного виробництва – «Акустик-Т1» з амплітудою 6 мкм та частотою 18 кГц, апарат «Proskit» з амплітудою коливань 15 мкм та частотою 46 кГц.

Вплив ультразвуку на процеси кристалізації накипу у водогінній воді досліджено методом катодної поляризації (рис. 11). Встановлено, що вплив ультразвуку подібний до впливу температури на процес кристалізації – а саме відбувається інтенсифікація процесу осадження.

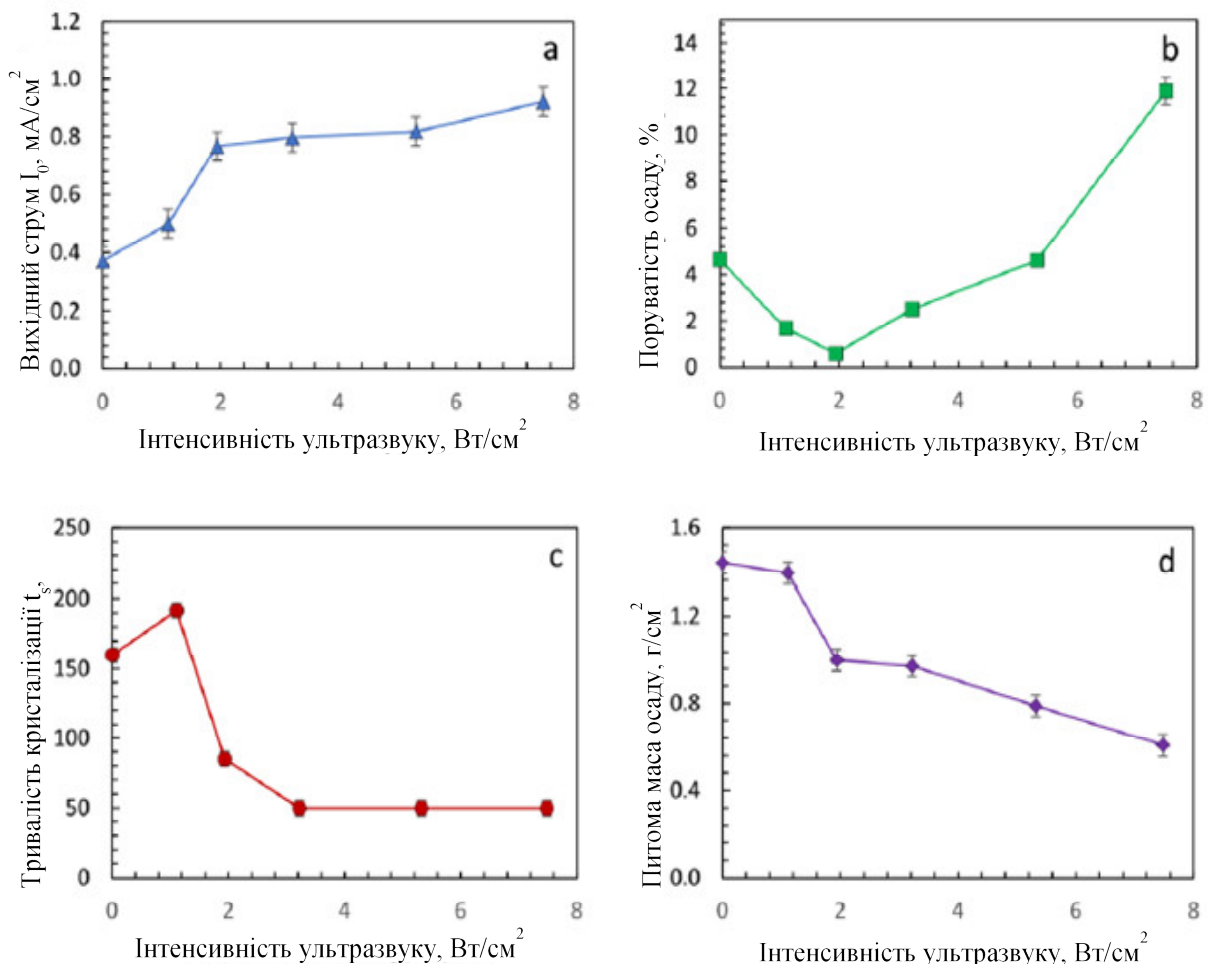


Рисунок 11 – Вплив інтенсивності ультразвуку на формування та властивості карбонатного осаду

Ультразвукові коливання та явище кавітації прискорює масообмінні процеси. Внаслідок цього прискорюється доставка кисню до поверхні електрода і вихідний струм з ростом інтенсивності ультразвуку збільшується. Час кристалізації зменшується у 3 рази, маса захисного шару зменшується в 2 рази. В той же час,

поруватість осаду проходить через мінімум. Найвищі захисні властивості осаду досягаються при інтенсивності 2-4 Вт/см<sup>2</sup>. Зростання інтенсивності ультразвуку вище 6 Вт/см<sup>2</sup> призводить до кавітаційного руйнування осаду. В осаді з'являються непокриті ділянки, поруватість зростає до 12 %.

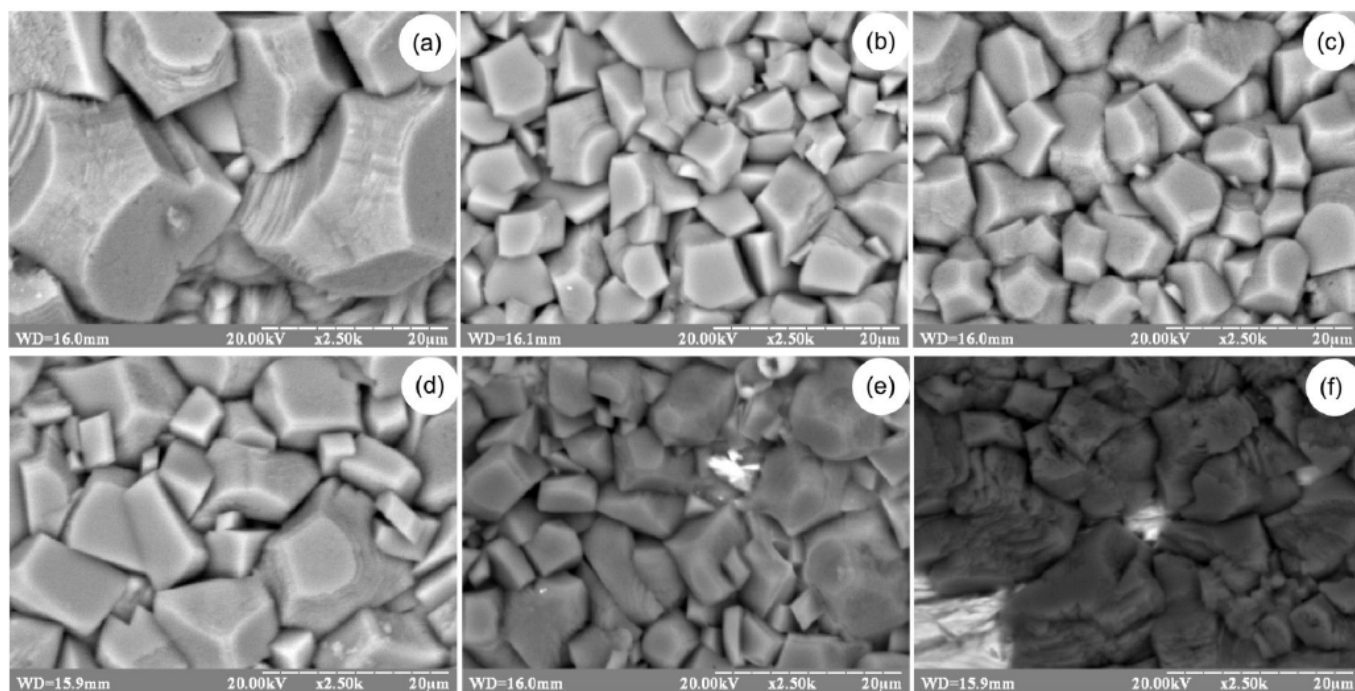


Рисунок 12 – Мікрофотографії поверхні осаду, сформованого на сталі при катодній поляризації із водогінної води при різній Інтенсивності ультразвуку. Збільшення у 2500 разів. Прикладена інтенсивність ультразвуку, Вт/см<sup>2</sup> :а – 0, b - 1,1; c- 1,9; d - 3,2; e - 5,3; f - 7,5.

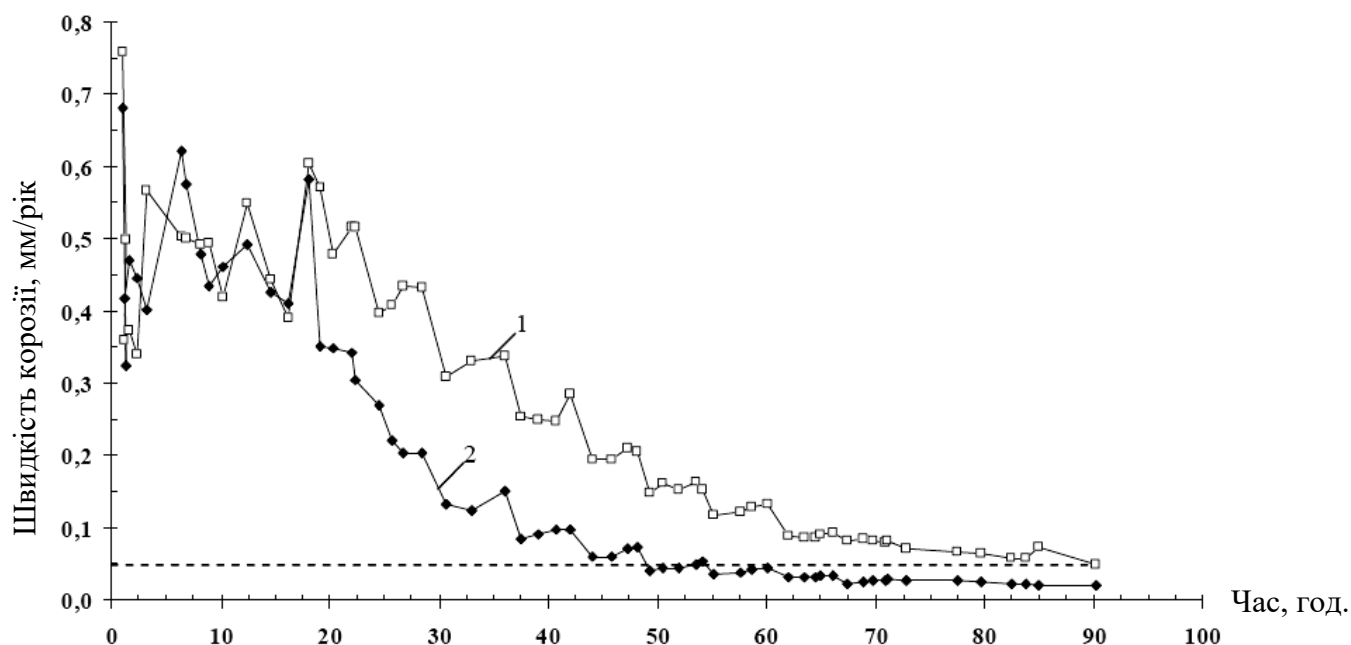


Рисунок 13 – Зменшення швидкості корозії по мірі нарощення накипу в артезіанській воді: 1) без дії ультразвуку; 2) під дією ультразвуку з амплітудою коливань 6 мкм.

Зовнішній вигляд осадів добре узгоджується із даними електрохімічних вимірювань. Введення в процесі кристалізації ультразвуку веде до зменшення



розмірів кристалів від 20 до 2-4 мкм (рис. 12). Найменш поруваті осади отримано при інтенсивності 2-4 Вт/см<sup>2</sup>. Зростання інтенсивності призводить до утворення пор в осаді внаслідок руйнування кристалів кавітацією. При меншому збільшенні зображення можна побачити незакриті осадом ділянки поверхні. Отже, при найвищій інтенсивності є можливість повного видалення осаду з поверхні.

Досліджено вплив ультразвуку амплітудою 6 мкм на процес формування і при термічній кристалізації (рис. 13). Так, при формуванні накипу з водогінної води з твердістю 4,5 ммоль/л захисний шар формується за 90 годин кипіння, має товщину 0,2 мм та складається з кристалів розміром 80-120 мкм. При осадженні накипу в полі ультразвуку захисний шар формується за 40 годин, має товщину 0,05 мм, а розміри кристалів 10-20 мкм. Таким чином, накип, сформований під дією ультразвуку, має вищі захисні властивості при меншій товщині. Рентгеноструктурний аналіз осадів показав, що карбонат кальцію формується в модифікації кальцит і не змінюється при дії ультразвуку.

Проаналізовано вплив твердості води на кристалізацію накипу в полі ультразвуку для апаратів з амплітудою коливань 6 та 15 мкм. Встановлено, що на відміну від водогінної води, в артезіанській воді з твердістю 20 ммоль/л вплив ультразвуку нівелюється. Формування захисного шару відбувається швидко, і осад уже має достатні захисні властивості при малій товщині.

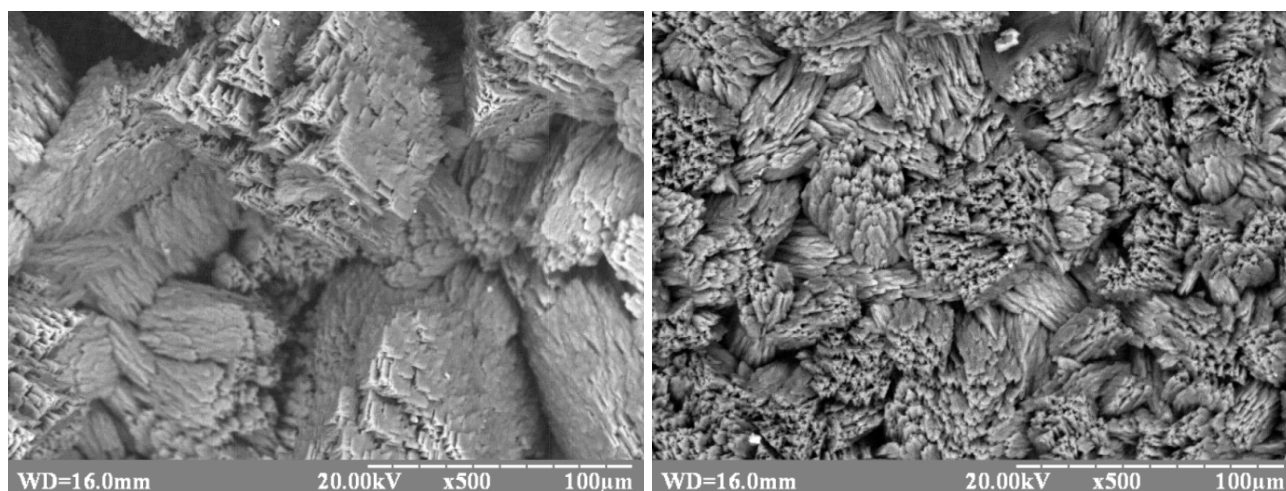


Рисунок 14 – Мікрофотографії осаду, сформованого з водогінної води після 115 годин досліду а) без дії ультразвуку, б) під дією «Акустик-Т» з амплітудою коливань 6 мкм.

Аналіз морфології осаду (рис. 14) показує, що не залежно від твердості води ультразвук сприяє зменшенню розмірів кристалів. У водогінній воді розміри кристалів становлять 80-120 мкм і зменшуються до 10-20 мкм під дією ультразвуку, а у більш твердій артезіанській воді 40-60 мкм, і зменшуються до 5-10 мкм під дією ультразвуку. Отже, ультразвукова обробка середовища в процесі термічної кристалізації сприяє посиленню захисних властивостей карбонатного осаду шляхом зменшення розмірів кристалів та формування більш щільного шару осаду на теплообмінній поверхні.

Проведено оцінку теплопровідності шару накипу в залежності від впливу ультразвуку. Методика заснована на використанні рівняння Фур'є для теплопровідності стінки. Було виготовлено лабораторну установку, що складається

із нагрівальної поверхні, вкритої шаром накипу, та чутливого мідного зразка, що нагрівається шляхом передачі тепла від труби через накип. Із залежності зміни температури зразка від часу визначали час, необхідний для нагрівання зразка від 20 до 60 °C (час теплопередачі).

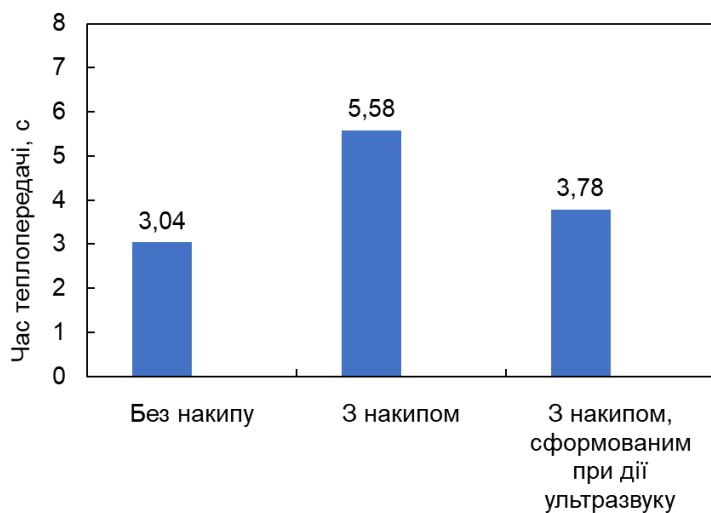


Рисунок 15 – Результати оцінки відносної теплопровідності сталі з накипом, утвореним за 250 годин.

Згідно отриманих даних (рис. 15), час теплопередачі для поверхні без накипу становить близько 3 с. Наявність шару накипу, сформованого за 250 годин у водогінній воді, збільшує час теплопередачі до 5,6 с. В той же час, накип, сформований при дії ультразвуку (за 250 год.), має час теплопередачі – 3,8 с. Таким чином, було встановлено, що ультразвук забезпечує утворення накипу, що має у 1,5 рази вищу теплопровідність.

**Шостий розділ** присвячений дослідженням впливу ультразвуку на регулювання товщини накипу на теплообмінній поверхні. На рисунку 16 представлені результати впливу ультразвуку на накип з товщиною, яка вища за нормативну – 0,5 мм. Починаючи з товщини накипу 0,5 мм на робоче середовище почали діяти ультразвуком (апарат «ЗВУК-3», амплітуда коливань 1,5 мкм). Впродовж перших 30 годин накип продовжує нарощуватись із попереднім темпом.

Аналіз поверхні під мікроскопом показав наявність тріщин на поверхні покриття. Через 40 годин було збільшено амплітуду коливань випромінювача до 3 мкм. Накип починає відколюватись – товщина зменшилася на 0,15 мм. А швидкість корозії при цьому не зростає, оскільки на поверхні залишається значний захисний шар. Отже, амплітуда коливань ультразвукового випромінювача має вирішальне значення для видалення осадів із поверхні.

В наступному досліді при дії ультразвуку з більшою амплітудою (6 мкм, «Акустик-Т1») на осад товщиною 0,95 мм тріщини і сколи в осаді спостерігаються через 10 годин досліду. Товщина накипу зменшується до 0,6 мм і нижче, досягаючи нормативного значення. При відколі накипу від поверхні спостерігається незначне зростання швидкості корозії, проте вона досить швидко зменшується нижче 0,05 мм/рік.

Мікроскопічний аналіз ділянки сколу осаду показав, що на поверхні сталі залишається тонкий шар накипу (рис. 17). Цей шар не видаляється під дією ультразвуку і слугує бар'єром для доступу кисню. Вважаємо, що механізм руйнування накипу – втомний злам. Шар накипу значної (більше 0,5 мм) товщини має відмінний від металу акустичний опір. При дії звукових хвиль амплітуда

коливань металу та накипу відрізняються, що веде до виникнення напружень між ними. Внаслідок тривалих багаторазових коливань в шарі накипу накопичуються напруження, що спочатку призводить до виникнення тріщин, а в подальшому до відколу частини накипу.

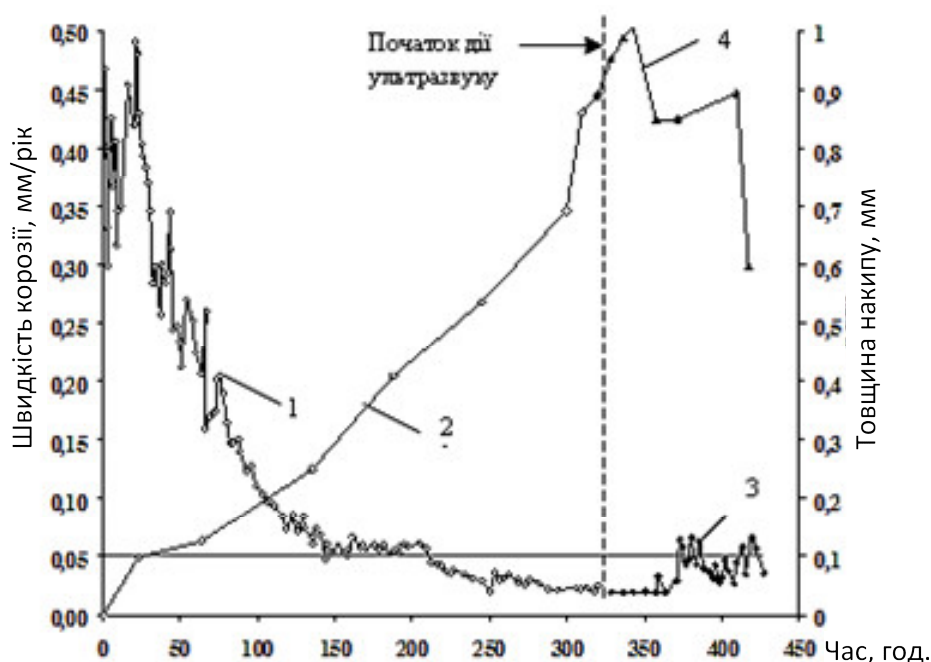


Рисунок 16 – Зміна швидкості корозії сталі 20 та товщини накипу протягом всього дослідження: 1 – зміна швидкості корозії при нарощенні накипу до 0,90 мм; 2 – динаміка росту товщини накипу; 3 – зміна швидкості корозії сталі при дії ультразвуку; 4 – зміна товщини накипу на електроді при дії ультразвуку.



Рисунок 17 – Поверхня електроду зі сколотим накипом.

Промислові випробування ультразвукової технології видалення накипу проведені на бойлерній Київських теплових розподільчих мереж по вул. Антоновича, 165. Характеристика об'єкта наступна: число секцій 1-ого ступеня 5 ВВП-200; число секцій 2-ого ступеня 6 ВВП-200; площа теплопередачі однієї секції 12 м<sup>2</sup>; площа теплопередачі 1-ого ступеня 60 м<sup>2</sup>. Вихідний стан поверхні бойлера – наявність шару осадів, утворений за 1 рік експлуатації. Були встановлені два апарати «ЗВУК-3». Ультразвукові випромінювачі наварювались на зовнішні стінки калачів обох ступенів водопідігрівачів.

За відомою методикою було виконано розрахунок коефіцієнта теплопередачі в залежності від витрати води. Після 2-х місяців роботи ультразвуку були зроблені повторні заміри та розрахунки (рис. 18). В результаті випробувань встановлено, що ультразвукова обробка дозволяє підвищити коефіцієнт теплопередачі на 40% за рахунок очищення поверхні від накипу.

Розрахунковий термін окупності апарата «ЗВУК-3» за періодичності очищення бойлерів 1 раз у два роки становить 2 місяці. Економія коштів досягається за рахунок збільшення коефіцієнту теплопередачі, збільшення ККД бойлера та зниженню витрат на перекачування води за рахунок збільшення прохідного перетину каналів теплообмінника.



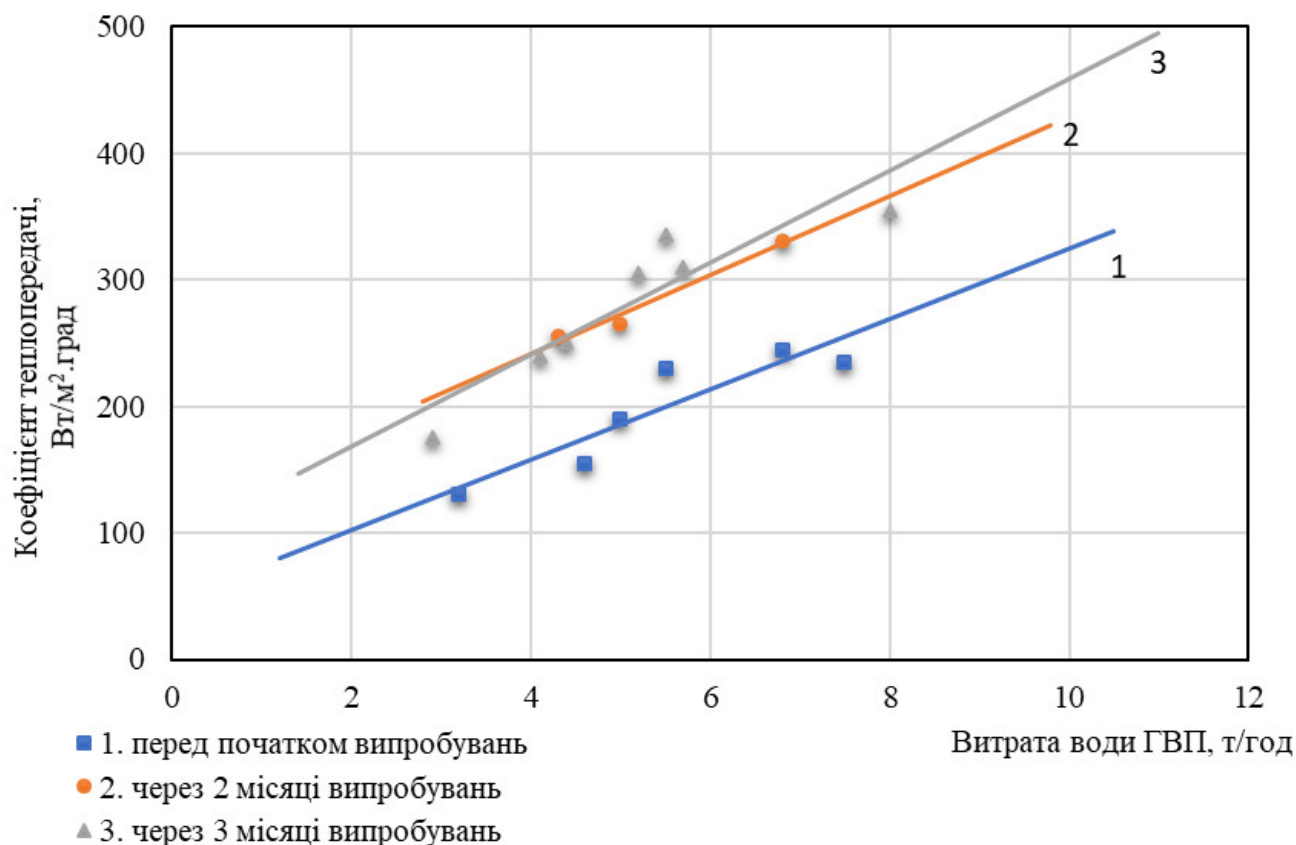


Рисунок 18 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від витрати води в ході промислових випробувань.

В роботі вдалося вирішити технічне протиріччя при експлуатації теплообмінного обладнання – підвищення коефіцієнту теплопередачі в умовах накипоутворення та зниження швидкості корозії. Введення ультразвукових коливань у воду призводить до виникнення кавітації, що сприяє інтенсифікації процесів масообміну та збільшенню кількості центрів кристалізації. Осадження накипу прискорюється, осад формується компактним та менш поруватим. З ростом товщини шару накипу під впливом ультразвуку в ньому накопичуються внутрішні напруження, що при досягненні певної товщини шару призводять до утворення втомних тріщин та відколу накипу. Відкол відбувається не від поверхні металу, а від тонкого підшару карбонатів, що залишається на поверхні та продовжує захищати метал від корозії, навіть коли надлишковий осад відколовся.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну задачу захисту енергетичного обладнання від корозії та накипу.

1. Осадження карбонатних осадів на сталевій теплообмінній поверхні веде до формування фазового шару, що виявляє протикорозійні властивості і зменшує доступ кисню до металу внаслідок блокування поверхні. Струм катодного

відновлення кисню зменшується більше, ніж на порядок. Накопичення іонів заліза в порах осаду призводить до зміщення корозійного потенціалу в анодний бік на 160 мВ.

2. Методом поляризаційних кривих було встановлено, що перебіг корозійного процесу на сталі практично не змінюється під шаром накипу як під впливом ультразвуку, так і без. Таким чином, метод поляризаційного опору може бути застосований для визначення захисних властивостей шару накипу в процесі його формування та впливу на цей процес ультразвуку.

3. Застосування в процесі кристалізації ультразвуку сприяє підвищенню захисних властивостей шару осаду за рахунок інтенсифікації масообмінних процесів в пристінному шарі. Розміри кристалів накипу в 6-8 разів менші, осад формується більш щільним, товщина його менша на 50-70%, час формування захисного шару скорочується у 2 рази у порівнянні з аналогічними дослідженнями без ультразвуку.

4. Аналіз структури та складу осаду показує, що покриття утворене кристалами карбонату кальцію в модифікації кальцит і не змінює склад та структуру під впливом ультразвуку, змінюється лише його кристалічність і, відповідно, захисні властивості.

5. Шар накипу, що формується на теплообмінній поверхні під дією ультразвуку має швидкість теплопередачі в 1,5 рази більшу ніж осад, що формується без дії ультразвуку. Таким чином, ефективність теплопередачі і продуктивність роботи теплообмінного обладнання в присутності ультразвуку вища.

6. Ультразвукова обробка при амплітуді коливань випромінювача 1,5-6 мкм з частотою 18-27 кГц дозволяє вилучати надлишковий накіп, коли товщина осаду на поверхні перевищує 0,5 мм. При дії ультразвуку внаслідок різної амплітуди коливань накипу та сталі в осаді виникають тріщини, які при тривалому повторенні коливань ведуть до відколу товстих шарів осаду. В місці відколу залишається тонкий шар кристалів, що створює надійний бар'єр для доступу кисню та захищає поверхню від корозії.

7. Застосування апарату «ЗВУК-3», розробленого в КПП ім. Ігоря Сікорського, на бойлерній привело до очищення водопідігрівача від карбонатних відкладень та збільшення коефіцієнту теплопередачі на понад 40%. Розрахунковий термін окупності апарату «ЗВУК-3» за періодичності очищення бойлерів 1 раз у два роки становить 2 місяці. Економія коштів досягається за рахунок збільшення коефіцієнту теплопередачі, збільшення ККД бойлера та зниженню витрат на перекачування води за рахунок збільшення прохідного перетину каналів теплообмінника.

8. Застосування отриманих результатів дослідження з модифікації карбонатних шарів ультразвуком для захисту теплообмінного обладнання від корозії та поліпшення теплообміну дозволить комплексно вирішити проблеми передчасного виходу обладнання з ладу та перевитрати енергоносіїв, що матиме значний позитивний ефект на збереження металофонду країни від корозії та економію енергетичних ресурсів країни.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Vasyliiev, G.S., **Vasylieva S.M.** The Influence of Ultrasound on the Carbonate Cathodic Crystallization in Artificial Potable Water // Journal of The Electrochemical Society. – 2017. – V. 164. – I. 4. – H250-H256. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментів, участі в аналізі та узагальненні результатів. Видання входить до наукометричної бази SCOPUS.*
2. Vasyliiev, G., **Vasylieva, S.**, Novosad, A., Gerasymenko, Y. (2018). Ultrasonic modification of carbonate scale electrochemically deposited in tap water // Ultrasonics Sonochemistry. – 2018. – V. 48. – p. 57-63. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментів, участі в аналізі та узагальненні результатів. Видання входить до наукометричної бази SCOPUS.*
3. Герасименко Ю. С. Протикорозійні властивості накипу на сталевих поверхнях теплообміну / Ю. С. Герасименко, **С. М. Пагер (Васильєва)**, Г. С. Васильєв. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спеціальний випуск. – 2010. – №8. – С. 727–733. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментів, участі в аналізі та узагальненні результатів, а також у написанні статті.*
4. Герасименко Ю. С. Інгібіторна дія накипу, що формується в ультразвуковому полі на теплообмінній поверхні / Ю. С. Герасименко, **С. М. Пагер (Васильєва)** // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спеціальний випуск. – 2012. – №9. – С. 272–278. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментів, участі в аналізі та узагальненні результатів, а також у написанні статті.*
5. **Пагер (Васильєва) С. М.** Модифікація карбонатно-накипних осадів для захисту від корозії теплообмінної поверхні / **С. М. Пагер**, Ю. С. Герасименко. // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2013. – №13. – С. 54–65. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментів, участі в аналізі та узагальненні результатів, а також у написанні статті.*
6. **Васильєва С. М.** Вплив ультразвуку на формування карбонатних осадів при катодній поляризації / **С. М. Васильєва**, Ю. С. Герасименко. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спеціальний випуск. – 2014. – №10. – С. 465–472. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментів, участі в аналізі та узагальненні результатів, а також у написанні статті.*
7. Розвиток електрохімічних методів вимірювання швидкості корозії металів наукової школи професора Л.І. Антропова / [Ю. С. Герасименко, Н. А. Білоусова, **С. М. Васильєва** та ін.]. // Наукові вісті Національного технічного університету. – 2013. – №6. – С. 89–102. *Особистий внесок здобувача полягає у експериментальній апробації двоступінчатого методу поляризаційного опору, а також у написанні відповідного розділу статті.*
8. Методичні аспекти дослідження процесів формування та аналізу протикорозійних властивостей карбонатного осаду в ультразвуковому полі / Г. С.Васильєв, **С. М. Васильєва**, А. А. Новосад, Ю. С. Герасименко. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спеціальний випуск. – 2016. – №11. – С. 271–275. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментів, участі в аналізі та узагальненні результатів, а також у написанні статті.*

9. **Пагер (Васильєва) С.М.,** Харченко І.С., Виштомова А.В., Білоусова Н.А., Герасименко Ю.С. Ефективність поліфосфатного інгібітору SeaQuest у воді теплових мереж м. Кривого Рогу // Збірка тез доповідей I міжнародної (III всеукраїнської) конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології. Київ. 2008
10. **Пагер (Васильєва) С.М.,** Васильєв Г.С., Герасименко Ю.С. Вплив накипу на швидкість корозії маловуглецевої сталі // Збірка тез доповідей II міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології. Київ. 2009.
11. **Пагер (Васильєва) С.М.,** Герасименко Ю.С. Вплив ультразвуку на протикорозійні властивості накипу на теплообмінній поверхні // Збірка тез доповідей III міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології. Київ. 2010. с.120.
12. **Пагер (Васильєва) С.М.,** Герасименко Ю.С. Осадження накипу на сталевих поверхнях теплообміну // Збірка тез доповідей V міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. I том. Дніпропетровськ. 2011.
13. **Пагер (Васильєва) С.М.,** Герасименко Ю.С. Про бар'єрні властивості карбонатно-накипного осаду на теплообмінній поверхні. Збірка тез доповідей IV міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології. Київ. 2012. с. 147.
14. **Пагер (Васильєва) С.М.,** Герасименко Ю. С. Установка для дослідження процесів накипоутворення та корозії маловуглецевої сталі в умовах теплообміну // Тези доповідей. Хімія та сучасні технології. Дніпропетровськ. 2013. с. 232-233.
15. Потапенко О.В., **Васильєва С.М.,** Васильєв Г.С., Герасименко Ю.С. Вплив шорсткості сталеві поверхні на кристалізацію карбонату кальцію при катодній поляризації // Збірка тез доповідей учасників VII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології» (Дніпропетровськ). – 2015. – С.43-44.
16. **Васильєва С.М.,** Новосад А.А., Васильєв Г.С., Герасименко Ю.С. Установка для формування та дослідження протикорозійних властивостей карбонатного осаду в ультразвуковому полі // Збірник наукових праць «Сучасні проблеми електрохімії: освіта, наука, виробництво» (Харків). – 2015. – С. 71-72.
17. Потапенко О.В., Васильєв Г.С., **Васильєва С.М.** Формування та аналіз протикорозійних властивостей карбонатного осаду в ультразвуковому полі // Збірка тез доповідей учасників VI Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології (Київ). – 2016. – С.108.

## АНОТАЦІЯ

**Васильєва С.М. Захист від корозії сталі фазовими шарами з водних середовищ під дією ультразвуку в умовах теплообміну. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню процесів корозії сталі в умовах теплообміну, впливу на цей процес карбонатних осадів та ультразвуку, розробці методів зниження швидкості корозії та підвищення ефективності теплообміну. Показано, що під дією ультразвуку відбувається посилення протикорозійних властивостей карбонатних осадів на теплообмінній поверхні. Так, при амплітуді коливань магнітострикційного випромінювача 1,5 мкм захисний шар накипу, за якого швидкість корозії не перевищує 0,05 мм/рік, формується у 2 рази швидше і має в 2 рази меншу товщину та більшу щільність. Підвищення протикорозійного захисту й одночасне збільшення теплопровідності накипу зумовлені зменшенням товщини й підвищенням щільності осаду карбонату кальцію. При обробці поверхні ультразвуком внаслідок різної амплітуди коливань накипу та сталі в осаді виникають тріщини, які ведуть до відколу товстих шарів накипу. В місці відколу внаслідок дії ультразвуку залишається тонкий шар дрібних кристалів, що захищає поверхню від корозії. Застосування ультразвукових апаратів в промисловості дозволило збільшити коефіцієнт теплопередачі трубчатих теплообмінників більше як на 40%. Застосування отриманих результатів дослідження з модифікації накипних шарів ультразвуком дозволить комплексно вирішити проблеми передчасного виходу обладнання з ладу та перевитрати енергоносіїв, що матиме значний позитивний ефект на збереження металофонду країни від корозії та економію енергетичних ресурсів країни.

**Ключові слова:** швидкість корозії, поляризаційний опір, карбонат кальцію, накип, ультразвук, теплопередача, сталь, вода, протикорозійний захист.

## ABSTRACT

**Vasylieva S.M. Steel corrosion protection with phase layers formed in water media under the influence of ultrasound in heat transfer conditions. – Manuscript.**

The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences, specialty 05.17.14 – chemical resistance of materials and protection against corrosion. – National technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to research of processes of corrosion of steel in the conditions of heat transfer, influence on this process of carbonate sediments and ultrasound, development of methods for reducing the rate of corrosion and increasing the efficiency of heat transfer. Influence of the ultrasound intensity (28 kHz, 1.1–7.5 W/cm<sup>2</sup>) on CaCO<sub>3</sub> nucleation-growth on the surface of a cylinder mild steel electrode rotating at 500 rpm was studied. The deposition kinetics was analyzed by chronoamperometry; the calcareous layer was characterized by gravimetry, scanning electron microscopy and

XRD. The water hardness was found to determine the crystallization kinetics of calcium carbonate influencing both the deposition rate and crystal morphology, so that a porous layer of vaterite was formed in soft water and highly protective calcite scale was built up in hard water. While temperature accelerates crystallization, faster crystallization leads to the formation of a more porous layer with vaterite inclusions due to limitations in calcium supply. Ultrasound accelerates formation of a calcite at intensities lower than  $2.23 \text{ W/cm}^2$ . At higher ultrasound intensities, a significant change in carbonate crystallization occurs. Insufficient calcium concentration in the pre-electrode layer promotes formation of vaterite crystals in the growing calcite layer increasing porosity and scaling time. Application of ultrasound to calcium carbonate crystallization in tap water affects nucleation sites density, mass-transport rate and cavitation erosion of the deposits. Lower intensity ultrasound reduces scale porosity and area density by increasing nucleation site density and accelerating the mass transport. Higher intensity ultrasound promotes cavitation erosion of the formed layer, thus cleaning the surface from the scale. A scale layer with the highest blocking properties formed under applied ultrasound intensity of  $1.9 \text{ W/cm}^2$ . The ultrasound doubled crystallization rate, reduced the scale porosity 5 times and halved its area density comparing to non-sonicated conditions. A new electrode to study both scaling and corrosion processes of mild steel in tap water was developed. Two identical steel rings are placed on the outside of a glass tube which is heated from inside with an electric spiral; the rings are connected to corrometer to form a two-electrode corrosion probe. By the method of polarization curves, it was established that the course of corrosion process on steel practically does not change under the layer of scale both under the influence of ultrasound and without. Thus, the method of polarization resistance can be applied to determine the protective properties of the scum layer in the process of its formation and influence on this process of ultrasound. The corrosion rate variations with scale thickness, scale deposition time and solution composition are measured using linear polarization resistance technique. The deposited scale was formed of calcite crystals of 50-100  $\mu\text{m}$  as was established with SEM and XRD. The scale layer of 0.2 mm formed in tap water within 90 hours reduces the steel corrosion rate from 0.8 to 0.1 mm/year and serves as a barrier layer to prevent further corrosion. Increasing the corrosion protection and simultaneously increasing the thermal conductivity of the scale are caused by one fundamentally conjugated group of factors - a decrease in thickness and an increase in the density of calcium carbonate sediment, due to the higher thermal conductivity of the crystalline phases, the increase in thermal conductivity is increased to a greater extent than only due to a decrease in thickness. The coherence of these factors leads to the obligatory reliability of the proposed method of increasing anticorrosion protection when increasing the efficiency of the heat exchanger apparatus. When surface is processed by ultrasound due to different amplitude of fluctuations of scale and steel in the siege there are cracks, which, with prolonged repetition of oscillations, lead to a rejection of thick layers of scale. In the place of the crack, due to the ultrasound, a thin layer of small crystals remains, which creates a reliable barrier for oxygen access and protects the surface from corrosion. The application of ultrasonic devices in the industry has allowed to increase the heat transfer coefficient of tubular heat exchangers by more than 40%. Estimated payback period of ultrasonic devices is 2 months. Cost savings are achieved by increasing the heat

transfer coefficient, increasing the efficiency of the boiler and reducing the cost of pumping water due to increasing the through-passage of the heat exchanger channels. The application of the results of the study on the modification of carbonate layers by ultrasound to protect the heat exchange equipment from corrosion and improve heat transfer will allow solving the problem of premature failure of equipment and energy overrun, which will have a significant positive effect on the preservation of the national metal fund from corrosion and the economy of the national energy resources.

**Keywords:** corrosion rate, polarization resistance, calcium carbonate, scale, ultrasound, heat transfer, steel, water, corrosion protection.

## АННОТАЦИЯ

**Васильева С.М. Защита от коррозии стали фазовыми слоями из водных сред под действием ультразвука в условиях теплообмена. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.14 - химическое сопротивление материалов и защита от коррозии. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2019.

Диссертация посвящена исследованию процессов коррозии стали в условиях теплообмена, влияния на этот процесс карбонатных осадков и ультразвука, разработке методов снижения скорости коррозии и повышения эффективности теплообмена. Показано, что под действием ультразвука происходит усиление антикоррозионных свойств карбонатных осадков на теплообменной поверхности. Так, при амплитуде колебаний магнитострикционного излучателя 1,5 мкм защитный слой накипи, при котором скорость коррозии не превышает 0,05 мм/год, формируется в 2 раза быстрее и имеет в 2 раза меньшую толщину и большую плотность. Повышение противокоррозионной защиты и одновременное увеличение теплопроводности накипи обусловлены уменьшением толщины и повышением плотности осадка карбоната кальция. При обработке поверхности ультразвуком в результате различной амплитуды колебаний накипи и стали в осадке возникают трещины, которые ведут к сколу толстых слоев накипи. В месте скола в результате действия ультразвука остается тонкий слой мелких кристаллов, который защищает поверхность от коррозии. Применение ультразвуковых аппаратов в промышленности позволило увеличить коэффициент теплопередачи трубчатых теплообменников более чем на 40%. Применение полученных результатов исследования по модификации накипными слоями ультразвуком позволит комплексно решить проблемы преждевременного выхода оборудования из строя и перерасхода энергоносителей что будет нести значительный положительный эффект на сохранение металлофонда страны от коррозии и экономию энергетических ресурсов.

**Ключевые слова:** скорость коррозии, поляризационное сопротивление, карбонат кальция, накипь, ультразвук, теплопередача, сталь, вода, противокоррозионная защита.