

УДК 621.647.23

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/01>**Омелич М.Ф.**<https://orcid.org/0000-0002-1884-1540>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Васильєв Г.С.**<https://orcid.org/0000-0003-4056-5551>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЧАСТОТНОЇ МОДУЛЯЦІЇ УЛЬТРАЗВУКУ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ВІД КАРБОНАТНИХ ОСАДІВ

Ультразвукова кавітація – це складний фізичний процес, що виникає в рідинах під дією потужних акустичних коливань. Введення ультразвукової кавітації в сучасні технологічні процеси є перспективним напрямом їх інтенсифікації за рахунок унікального впливу на різноманітні фізико-хімічні процеси. Ключовою проблемою, що обмежує ефективність об'ємної обробки середовища ультразвуком, є виникнення стоячих хвиль. Акустична хвиля, випромінювана приводом, відбивається від стінок ємності та поверхні рідини, інтерферує з прямою хвилею, що призводить до утворення стійкої картини з зонами мінімальної (вузли) та максимальної (пучності) інтенсивності коливань. Перспективним інструментом для керування інтерференційною картиною є модуляція електричного сигналу, що подається на випромінювач. Цей метод дозволяє динамічно змінювати параметри акустичного поля без механічних змін у конструкції обладнання.

Розроблено схему потужного генератора ультразвуку з частотою 27 кГц, що використовує гармонійні коливання та додатковий генератор модулятора. Така схема відрізняється тим, що на гармонійні коливання накладається частотна модуляція на частоті 500 Гц. Це дозволило підвищити дисперсність коливального поля за рахунок переміщення локальних мінімумів і максимумів коливань в об'ємі розчину з частотою 500 Гц. Проведено лабораторні випробування запропонованої схеми генерації ультразвуку на прикладі впливу на процес осадження карбонату кальцію із водного розчину. Осадження карбонату кальцію ініціювали шляхом зсуву карбонатної рівноваги при електрохімічному відновленні розчиненого у воді кисню. Ультразвук вводили в середовище у якому відбувалася катодна поляризація обертового робочого електроду, що створювало умови утворення на поверхні шару карбонату кальцію. Експериментально встановлено, що застосування ультразвуку з модуляцією дозволяє попередити осадження карбонату кальцію, в той час, як застосування ультразвуку без модуляції впливає лише на швидкість осадження та поруватість осаду, не запобігаючи його утворенню.

**Ключові слова:** ультразвук, модуляція, електроліз, карбонат кальцію, ультразвукова потужність

**Постановка проблеми.** Ультразвукова кавітація є ефективним інструментом інтенсифікації фізико-хімічних процесів і широко застосовується в різних промислових технологіях. Вона виникає в рідинному середовищі під дією ультразвукових

коливань унаслідок циклічного чергування зон розрідження та стиску, що супроводжується утворенням, ростом і схлопуванням кавітаційних бульбашок. Саме ці явища зумовлюють локальні екстремальні умови температури, тиску та швидкості



масопереносу, які визначають ефективність ультразвукового впливу на фізико-хімічні процеси.

Водночас на практиці в системах ультразвукової обробки, особливо в замкнених об'ємах, виникає суттєва проблема нерівномірності акустичного поля. Внаслідок інтерференції падаючих і відбитих ультразвукових хвиль формуються стоячі хвилі, що призводить до чергування зон з підвищеною та зниженою інтенсивністю ультразвукових коливань. Це зумовлює просторову неоднорідність кавітаційної активності та, відповідно, різну ефективність інтенсифікації фізико-хімічних процесів у різних частинах об'єму. Така нерівномірність ускладнює керування процесами, знижує відтворюваність результатів і обмежує масштабування ультразвукових технологій, що визначає актуальність досліджень, спрямованих на аналіз і мінімізацію впливу стоячих хвиль у кавітаційних системах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ультразвукова кавітація – це складний фізичний процес, що виникає в рідині під дією потужних акустичних коливань. Його фундаментальний механізм полягає в утворенні мікроскопічних парогазових бульбашок (каверн) у півперіоди розрідження звукової хвилі та їхньому стрімкому схлопуванню в наступні півперіоди стиснення. Цей, на перший погляд, простий цикл є основою для великої кількості промислових технологій, оскільки в момент схлопування бульбашки вивільнюється значна кількість локалізованої енергії. Миттєва потужність, що виділяється, може в тисячі разів перевищувати середню потужність, яку ультразвуковий перетворювач вводить у середовище, створюючи екстремальні локальні умови – високий тиск та температуру.

Стратегічна важливість ультразвукових технологій у сучасній промисловості зумовлена їхньою унікальною здатністю інтенсифікувати різноманітні фізико-хімічні процеси [1, 2]. Ефективність цих технологій базується на комплексі явищ, що супроводжують кавітацію: мікроударний вплив від схлопування каверн, формування інтенсивних акустичних течій та звукокапілярний ефект, що прискорює проникнення рідин у пористі структури. Завдяки цим механізмам ультразвукові апарати знаходять застосування у широкому спектрі застосувань, від делікатного очищення до інтенсивного диспергування. Реалізація цих різноманітних та складних процесів вимагає застосування спеціалізованого обладнання, здатного генерувати та передавати акустичну енергію в технологічне середовище з високою ефективністю.

На сьогоднішньому етапі розвитку ультразвукових технологій найбільш розповсюдженими та домінуючими є п'єзоелектричні випромінювачі [3]. Хоча в промисловості традиційно використовують два основні типи електроакустичних перетворювачів – п'єзоелектричні та магнітострикційні, саме п'єзоелектричні пристрої наразі займають лідерські позиції, які стали де-факто стандартом для сучасного ультразвукового обладнання.

Ключовою проблемою, що обмежує ефективність об'ємної обробки середовища ультразвуком, є виникнення стоячих хвиль. Акустична хвиля, випромінювана приводом, відбивається від стінок ємності та поверхні рідини, інтерферує з прямою хвилею, що призводить до утворення стійкої картини з зонами мінімальної (вузли) та максимальної (пучності) інтенсивності коливань. Це є критичним недоліком, оскільки якість обробки стає вкрай нерівномірною по об'єму. Більше того, максимальна інтенсивність кавітації часто спостерігається безпосередньо на поверхні випромінювачів, що викликає їх прискорене ерозійне руйнування.

Одним із шляхів вирішення проблеми є оптимізація геометрії самої технологічної ємності [4]. Замість простих прямокутних форм застосовуються конструкції, що сприяють формуванню більш дифузного (розсіяного) акустичного поля. Більш гнучким та ефективним інструментом для керування інтерференційною картиною є модуляція електричного сигналу, що подається на випромінювач. Цей метод дозволяє динамічно змінювати параметри акустичного поля без механічних змін у конструкції. Частотна модуляція (ЧМ) зарекомендувала себе як де-факто стандартний та найефективніший електронний метод для гомогенізації кавітаційного поля. Суть методу полягає в тому, що несуча частота сигналу збудження постійно змінюється в певних межах. Постійна зміна частоти сигналу не дозволяє стабілізуватися фізичному розташуванню зон конструктивної та деструктивної інтерференції (пучностей та вузлів). Цей постійний просторовий зсув усереднює акустичну енергію в часі, ефективно розмиваючи статичні «гарячі» та «холодні» плями та замінюючи їх більш гомогенним, усередненим у часі полем кавітації.

Зазвичай, перевірку ефективності ЧМ здійснювали простими експериментами, в яких алюмінієва фольга використовується як індикатор кавітаційної ерозії. Шляхом зміни параметрів модуляції (частоти та індексу) вдається трансфор-

мувати кавітаційне поле з локалізованої плями, що дає низьку якість обробки, в значно більшу та рівномірнішу область, яка забезпечує високу якість ерозійного очищення. Застосування ЧМ для промислових процесів очищення потребує перевірки ефективності на більш складних процесах, ніж руйнування алюмінієвої фольги. Однією із можливих сфер застосування ультразвуку є захист теплообмінного обладнання від утворення накипу [5-7].

**Постановка завдання.** Метою даної роботи було перевірити вплив ультразвуку частотою 27 кГц з частотною модуляцією в межах 500 Гц на процес осадження карбонату кальцію на сталеву поверхню як основа промислової технології попередження утворення карбонатних осадів в промислому теплообмінному обладнанні.

**Виклад основного матеріалу.** Ефективність будь-якого ультразвукового технологічного процесу безпосередньо залежить від конструкції та робочих параметрів апаратури, яка генерує та передає акустичну енергію в оброблюване середовище. Узагальнена структура сучасного ультразвукового кавітаційного апарату складається з кількох ключових блоків, що виконують взаємопов'язані функції. На рисунку 1 представлена структурна схема ультразвукового кавітаційного апарату, що складається з джерела електричного живлення, генератора потужних електричних коливань ультразвукової частоти, привода-випромінювача та кола електричного зворотного зв'язку.

Сучасні генератори для живлення ультразвукових приводів переважно будуються на базі польових транзисторів (FET), які, порівняно з біполярними, мають значно вищу швидкість та потребують менших струмів для керування, що мінімізує втрати потужності. Для передачі максимальної потужності від вихідного каскаду до привода-випромінювача критично важливим є узгодження їхніх електричних опорів (імпе-

дансів), що зазвичай досягається за допомогою вихідного трансформатора та спеціальних схем узгодження.

Досконалість на рівні апаратної генерації є необхідною, але не достатньою умовою. Фундаментальна фізика хвильових процесів у замкненому об'ємі породжує ключову технологічну проблему – нерівномірність поля, вирішення якої лежить вже у площині керування сигналом.

Для дослідження впливу модуляції на ефективність ультразвукової обробки використовували лабораторну установку (рис. 2). Для збудження ультразвукового випромінювача 14 використовується ультразвуковий генератор 15, що працює на частоті 27 кГц, оснащений блоком для формування сигналу модуляції в межах 500 Гц.

Перевірку впливу модуляції ультразвуку на процес кристалізації карбонату кальцію вивчали електрохімічним методом потенціостатичної поляризації [8, 9]. Вимірювання проводили в скляній ємності об'ємом 1 л, наповненій водопровідною водою і термостатній при температурі  $60 \pm 2,5$  °C. Циліндр з маловуглецевої сталі діаметром 6 мм і довжиною 30 мм обертався зі швидкістю 500 об / хв і слугував робочим електродом електрохімічної комірки. Поверхня електроду була підготовлена шляхом механічного полірування наждачним папером марки Р600 та знежирена. Для поляризації робочого електроду використовували допоміжний електрод із платинової сітки, а в якості електрода порівняння для визначення потенціалу робочого електроду використовувався насичений хлорид-срібний електрод (ХСЕ). Робочий електрод поляризували до потенціалу  $-1,1$  В (ХСЕ) впродовж 120 хв для створення умов осадження карбонату кальцію на його поверхні. В ході поляризації реєстрували залежність струму від часу.

Електрохімічний підхід до дослідження осадження карбонату кальцію заснований на вимі-

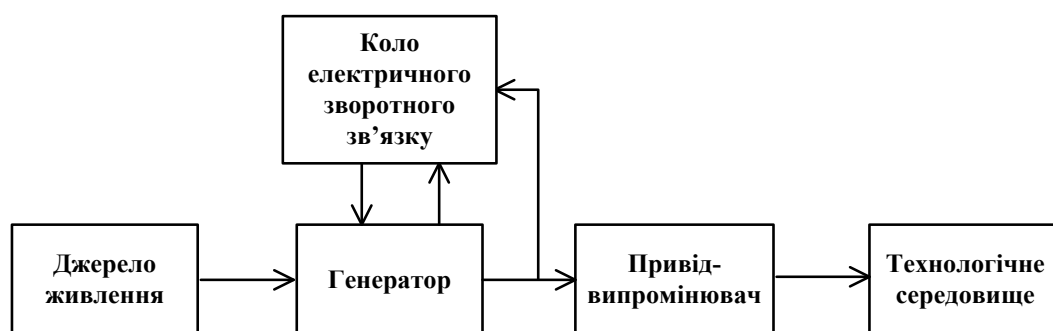
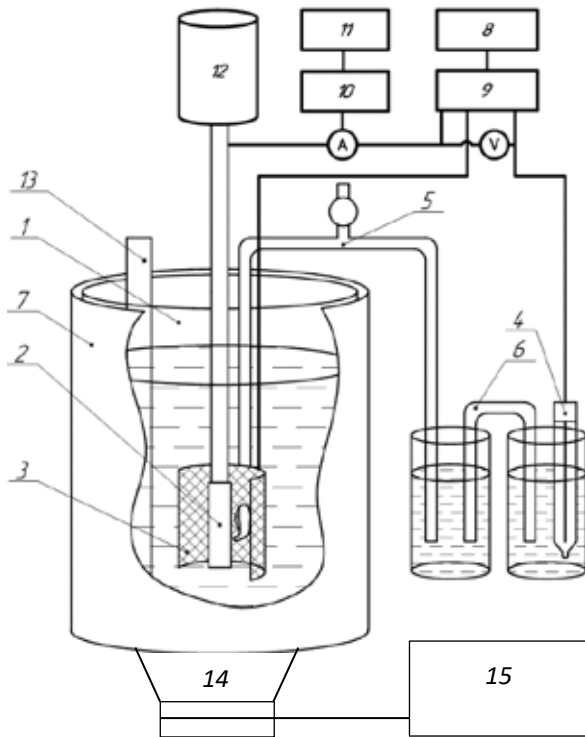


Рис. 1. Структурна схема ультразвукового кавітаційного апарату



**Рис. 2. Установа для поляризаційних випробувань процесу осадження карбонату кальцію при електрохімічному відновленні кисню**

(1) скляний стакан, (2) робочий електрод (циліндр зі сталі), (3) допоміжний електрод (платинова сітка), (4) електрод порівняння (насичений хлор срібний), (5) капіляр Луггіна, (6) соляний місток, (7) теплоізоляція, (8) джерело постійного струму, (9) потенціостат, (10) перетворювач сигналу, (11) комп'ютер, (12) електродвигун, (13) регульований водонагрівач, (14) ультразвуковий випромінювач, (15) генератор ультразвуку.

рюванні струму відновлення кисню на поверхні сталі при зародженні і утворенні кристалів карбонату кальцію. Кристали карбонату кальцію зменшують площу електрохімічно активної поверхні сталевого електрода [24, 25]. Блокуючі властивості осаду оцінювали шляхом порівняння показників для поверхні електрода з осадом і без. При утворенні осаду струм відновлення кисню  $I$  зменшується пропорційно зменшенню площі електрохімічно активної поверхні. Коли поверхня вільна від будь-яких осадів (одразу після початку поляризації), струм досягає свого найбільшого значення –  $I_0$ . Після закінчення осадження досягається найменше значення струму відновлення кисню –  $I_{\min}$ . На практиці це значення струму вимірювали в кінці кривої залежності струму від часу (після 120 хв. поляризації).

Після завершення осадження карбонату кальцію відновлення кисню може відбуватися тільки на непокритих ділянках або через пори. Звідси пористість осаду  $P$  може бути обчислена як спів-

відношення досягнутого значення струму  $I_{\min}$  до вихідного  $I_0$ .

Швидкість осадження або час осадження,  $t_s$ , було знайдено шляхом лінійної екстраполяції залежності  $I-t$  до нульового струму. Кінетика кристалізації  $\text{CaCO}_3$  в присутності ультразвуку характеризувалася значеннями  $I_0$ ,  $P$  і  $t_s$ .

Криві залежності струму відновлення кисню від часу поляризації для різних умов осадження карбонату кальцію наведено на рис. 3, а обраховані з кривих параметри наведено в таблиці 1.

Хроноамперограма процесу осадження карбонату кальцію за відсутності впливу ультразвуку, наведена на рисунку 3 (1), має типовий вигляд. На початковому етапі (до 300 с) відбувається відносно зростання струму внаслідок відновлення поверхневих оксидних шарів. На наступному етапі, між 300 та 900 с спостерігається індукційний період, коли на поверхні металу зароджуються кристали карбонату кальцію. Починаючи з 900 секунд починається активний ріст осаду, що характеризується монотонним зниженням струму відновлення кисню внаслідок формування на поверхні шару кристалів. З часом, процес осадження відбувається все повільніше, і в кінці струм відновлення кисню досягає постійного значення, що відповідає швидкості відновлення кисню через пори осаду.

При введенні в систему ультразвуку частотою 27 кГц та потужністю 10 Вт хід кривої процесу кристалізації карбонату кальцію залишається незмінним (рис. 3, крива (2), але швидкість осадження збільшується (параметр  $t_s$  зменшується на 600 с). Це відбувається внаслідок того, що під впливом ультразвуку відбувається формування більшої кількості центрів кристалізації, що в ході осадження осаду призводить до швидшого закриття поверхні осадом. Сформовані в об'ємі вузли і пучності ультразвукового поля призводять до того, що ультразвукова кавітація лише інтенсифікує процес осадження, не впливаючи на видалення осаду.

Введення в об'єм розчину ультразвуку з модуляцією (27 кГц, 500 Гц модуляція) суттєво змінює хід хроноамперограми (рис. 3, крива (3)). Так, на залежності струму від часу вже не спостерігаються індукційного періоду та кристалізації осаду, навпаки струм залишається незмінно високим впродовж всієї тривалості експерименту. Поясненням такого явища є те, що під дією ультразвуку з модуляцією кавітація, що виникає в розчині, розмиває вузли і пучності, що виникають в розчині при незмінній ультразвуковій частоті. Таким чином, поширення кавітації по всьому об'єму при

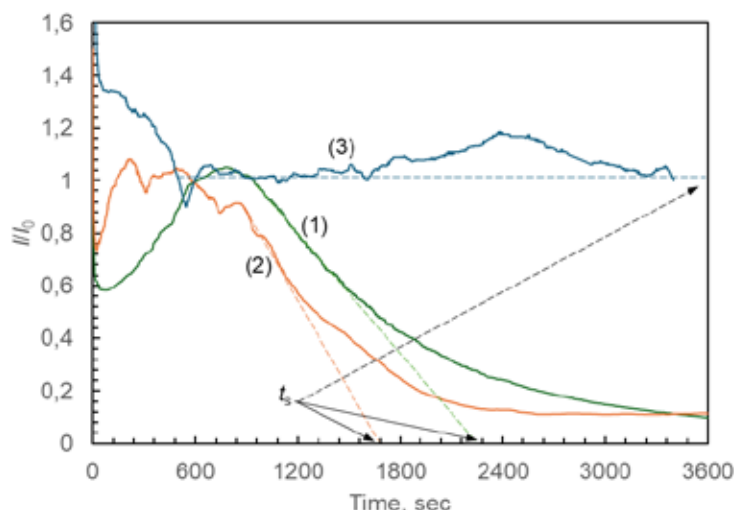


Рис. 3. Нормалізовані хроноамперограми осадження карбонату кальцію з різних умов впливу ультразвуку на процес осадження

(1) – без ультразвуку; (2) – ультразвук без модуляції; (3) – ультразвук з модуляцією.

Таблиця 1

Параметри процесу кристалізації карбонату кальцію в різних умовах впливу ультразвуку

№	Умови формування осаду	Вихідний струм, $I_0$ , мА/см <sup>2</sup>	Час осадження, $t_s$ , сек	Кінцевий струм, $I_{min}$ , мА/см <sup>2</sup>	Поруватість осаду, Р, %
1	Без ультразвуку	8	2300	0,1	1,25
2	Ультразвук без модуляції	12	1700	0,64	5,33
3	Ультразвук з модуляцією	13	∞	10	100,0

незмінній потужності ультразвуку є достатнім для того, що руйнувати та видаляти будь які зародки кристалів з поверхні, таким чином запобігаючи утворенню осаду.

Таким чином, введення в об’єм розчину ультразвуку з модуляцією має достатню ефективність щоб руйнувати кристали осаду карбонату кальцію та повністю попереджати його осадження на сталевій поверхні із водопровідної води.

**Висновки.** Розроблено електричну схему ультразвукового генератора, що дозволяє генерувати ультразвук на частоті 27 кГц з частотною модуляцією 500 Гц та потужністю 10 Вт та перевірено її ефективність для процесу запобігання утворення карбонатного накипу на сталевій поверхні.

Проведено випробування впливу ультразвуку з модуляцією на процес осадження карбонату кальцію при електрохімічному відновленні кисню на сталевому електроді у водопровідній воді. Встановлено, що ультразвукова кавітація, створена під дією ультразвуку частотою 27 кГц з частотною модуляцією в межах 500 Гц, має достатню ефективність щоб руйнувати кристали карбонату кальцію і, таким чином, запобігати утворенню осаду на поверхні сталі.

Використання ультразвуку з частотною модуляцією відкриває широкі перспективи для розробки простих та ефективних приладів для захисту промислового теплообмінного обладнання від накипу.

Список літератури:

1. Atobe M. Electrosynthesis Under Ultrasound and Centrifugal Fields *Encyclopedia of applied electrochemistry*. New York: Springer New York. 2014. P. 821–826. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6996-5\\_362](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6996-5_362)
2. Yang G., Zhu J. J. Sonoelectrochemical Synthesis and Characterization of Nanomaterials *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*. Singapore: Springer Singapore. 2016. P. 295–324. [https://doi.org/10.1007/978-981-287-278-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-287-278-4_11)
3. Мовчанюк А. В., Новосад А. А., Омелич М. Ф., Фесич В. П. Метод оцінки амплітуди коливань ультразвукових резонансних приводів, навантажених рідким середовищем. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2009. № 4 (56). С. 52–54.

4. Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В., Чорний В.І. Особливості проектування ультразвукових кавітаційних камер обмеженого об'єму, що утворені плоскими поверхнями. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія Машинобудування*. 2003. № 44. С. 228–233.

5. Heath D., Širok B., Hočevár M. The Use of the Cavitation Effect in the Mitigation of CaCO<sub>3</sub> Deposits. *Journal of Mechanical Engineering*. 2013. № 59. P. 203–215. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2012.732>

6. Pečnik B., Šturm R., Hočevár M. Cavitation erosion of the calcium carbonate deposits. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*. 2015. № 10. P. 445–462. <https://doi.org/10.1504/IJMMP.2015.074998>

7. Pečnik B., Hočevár M., Širok B. Scale deposit removal by means of ultrasonic cavitation. *Wear*. 2016. № 356. P. 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.012>

8. Vasylyev G.S., Vasylyeva S.M. The influence of ultrasound on the carbonate cathodic crystallization in artificial potable water. *Journal of The Electrochemical Society*. 2017. № 164. H250–H256. <https://doi.org/10.1149/2.0301706jes>.

9. Vasylyev G., Vasylyeva S., Novosad A., Gerasymenko Y. Ultrasonic modification of carbonate scale electrochemically deposited in tap water. *Ultrasonic Sonochemistry*. 2018. № 48. P. 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.ultrsonch.2018.05.026>

### **Omelych M.F., Vasylyev G.S. DETERMINATION OF THE EFFECTIVENESS OF FREQUENCY MODULATION OF ULTRASOUND FOR CLEANING STEEL SURFACES FROM CARBONATE DEPOSITS**

*Ultrasonic cavitation is a complex physical process that occurs in liquids under the influence of powerful acoustic vibrations. The introduction of ultrasonic cavitation into modern technological processes is a promising direction for their intensification due to its unique effect on various physicochemical processes. The key problem that limits the efficiency of volumetric processing of the medium with ultrasound is the occurrence of standing waves. The emitted acoustic wave is reflected from the walls of the container and the surface of the liquid, interfering with the direct wave, which leads to the formation of a stable pattern with zones of minimum (node) and maximum (anti-node) intensity of oscillations. A promising tool for controlling the interference pattern is the modulation of the electrical signal supplied to the emitter. This method allows you to dynamically change the parameters of the acoustic field without mechanical changes in the design of the equipment.*

*A circuit of a powerful ultrasound generator with a frequency of 27 kHz using harmonic oscillations and an additional modulator generator has been developed. This scheme differs in that frequency modulation at a frequency of 500 Hz is superimposed on harmonic oscillations. This allowed to increase the dispersion of the oscillation field by moving local minima and maxima of oscillations in the volume of the solution with a frequency of 500 Hz. Laboratory tests of the proposed ultrasound generation scheme were carried out on the example of the effect on the process of precipitation of calcium carbonate from an aqueous solution. The precipitation of calcium carbonate was initiated by shifting the carbonate equilibrium during the electrochemical reduction of oxygen dissolved in water. Ultrasound was introduced into the environment in which the cathodic polarization of the rotating working electrode occurred, which created conditions for the formation of a calcium carbonate layer on the surface. It was experimentally established that the use of ultrasound with modulation allows to prevent the precipitation of calcium carbonate, while the use of ultrasound without modulation affects only the rate of precipitation and porosity of the precipitate, without preventing its formation.*

**Keywords:** *ultrasound, modulation, electrolysis, calcium carbonate, ultrasonic power.*

Дата першого надходження статті до видання: 20.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026