

УДК 621.7.022.6

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., О.М. КРАВЧЕНКО, асп.  
Криворізький національний університет

## ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОЧИЩЕННЯ

**Мета.** Визначення основних напрямів удосконалення управління процесом ультразвукового очищення для підвищення його енергоефективності.

**Методи дослідження.** Аналіз вітчизняного та закордонного досвіду у питанні впливу різних факторів на процес ультразвукового очищення, існуючих систем керування процесом ультразвукового очищення, систем оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення, наявних алгоритмів, на основі яких приймається рішення про припинення процесу ультразвукового очищення.

**Наукова новизна.** На основі проведеного аналізу методів та технічних засобів керування процесом ультразвукового очищення виявлено необхідність удосконалення цього процесу шляхом розробки просторово розподіленої системи керування, що на основі ультразвукового оцінювання стану окремих ділянок виробу, що очищується, формуватиме керуючий вплив лише на ту ділянку, яка цього вимагає в залежності від наявної оцінки забруднення виробу.

**Практична значимість.** Визначено основні принципи і підходи автоматичного керування процесом ультразвуковим очищенням. Виявлено необхідність враховувати геометричні параметри виробу складної конфігурації при формуванні автоматичного керування. Сформуована гіпотеза про необхідність цілеспрямованого керування впливу на окремі ділянки виробу в залежності від їх забрудненості.

**Результати.** На основі аналізу динамічних ефектів високоенергетичного ультразвуку, що впливають на процес ультразвукового очищення, а саме, кавітації як найбільш значущого в цьому процесі явища, виявлено нерівномірну розподіленість кавітаційних скупчень у смості для очищення. Це свідчить про те, що на різних ділянках виробу процес очищення буде відбуватися з різною інтенсивністю. До того ж виріб має нерівномірне забруднення, що визначається його геометричними особливостями та особливостями його експлуатації. Отже, умовою ефективного керування процесом ультразвукового очищення є врахування особливостей розподіленості кавітації у просторі і забруднення об'єкта на окремих ділянках. Тому сформуовано висновок щодо необхідності автоматичного просторового керування ультразвукового очищення із врахуванням стану виробу, що очищується.

**Ключові слова:** кавітація, ультразвукове очищення, автоматичне керування.

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-3-9

**Проблема та зв'язок її з науковими та практичними задачами.** Якість і надійність виробів знаходяться в прямій залежності від ступеня їхньої чистоти, тому існує багато різних методів очищення, що застосовуються в певних галузях промисловості. Це і очищення за допомогою різних хімічних розчинників (що є потенційно небезпечним), і ручне чи механічне очищення (вимагає забагато зусиль), і також ультразвукове очищення, яке позбавлене недоліків притаманних іншим способам. Ультразвукове очищення є одним з найефективніших за показниками якості та витрат. Його популярність призводить до пошуку нових рішень, що дозволять підвищити ефективність очищення. Оскільки є досить багато факторів, що впливають на ефективність процесу очистки (розчин для миття, температура, відсутність стоячих хвиль, потужність та частота ультразвуку, розмір і форма резервуара, тип забруднення, розташування ультразвукового перетворювача тощо), то і дослідження проводяться в різних напрямках.

**Аналіз досліджень та публікацій.** *Кавітація як основне фізичний явище, що забезпечує процес ультразвукового очищення.* Ультразвук при випромінюванні в рідині викликає ряд фізичних явищ, що впливають на процес очищення: радіаційний тиск, акустичні течії та кавітацію [1, 2]. Головну роль серед них відіграє кавітація. Вона пояснюється місцевим тиском у рідині, що опускається нижче критичного тиску, який приводить в рух присутні завжди в рідині нанота мікробульбашки, що швидко збільшуються у розмірах. Коли тиск повертається до високого значення, відбувається імплізія міхурів, що генерує імпульси високого тиску і ударні хвилі.

В праці [3] розглянуто кількість кавітаційних бульбашок при ультразвуковому тестів очищення з різною концентрацією розчиненого кисню у воді та виявлено, що існує оптимальна перенасиченість газу для максимальної ефективності видалення забруднення. Ультразвукове опромінення низької інтенсивності при оптимальній перенасиченості газу в очисних розчинах дозволяє мати легку динаміку бульбашок без сильного колапсу і таким чином очищати поверх-

ні без ерозії кавітації. Процес очищення при цьому стає більш ефективний та безпечний. В праці [4] розглянуто питання виникнення різних максимумів кавітації при різних температурах під час охолодження термічно дегазованої води, після дослідження зв'язку між цим явищем, частотою та потужністю ультразвуку, виявилось, що причина у вторинному насиченні води повітрям. В праці [5] розглянуто новий самочутливий метод вимірювання наявності і рівня кавітації, який можна застосувати навіть у важкодоступних або непрозорих умовах. Виявлено, що розподіл кавітаційних бульбашок тісно пов'язаний з геометричним розташуванням та дистанцією між випромінювачем та дном контейнеру. В дослідженні [6] пропонується новий метод дослідження кавітаційної активності, що базується на аналізі спектру, що продукується коливальною хвилею. За допомогою нього виявлено наступні залежності: кавітація стає нестабільною при тривалому часі інтонації; це більш виражене при великій потужності; підвищення потужності, вмісту газу та додавання очищувального засобу посилює кавітації, але при досить високих значеннях цих параметрів кавітаційна діяльність знижується; при відносно великій потужності кавітаційна активність зростає зі збільшенням температури, досягає піку, а потім падає; окрім того, що ці параметри впливають на кавітацію, вони ще взаємозалежні: час інсонації та висока потужність впливають на температуру та вміст газу, вміст газу змінюється в залежності від температури.

Особливості розподілу зон кавітації розглянуто в праці [7], де пропонується кавітаційні скупчення кульок, що не колапсували, провокувати до колапсу за допомогою додаткового низькочастотного джерела ультразвукового випромінювання. Це дозволяє звільняти та використовувати енергію кавітаційних скупчень. Експеримент з використанням установки (рис.1) з двома несинхронізованими випромінювачами ультразвуку високої та низької амплітуди довів, що, на певних відстанях, робоча площа кавітаційної активності при двох випромінювачах більша, ніж сума робочих площ кожного випромінювача окремо. Це можна використовувати при ультразвуковій обробці виробів складної конфігурації, що мають внутрішні отвори.

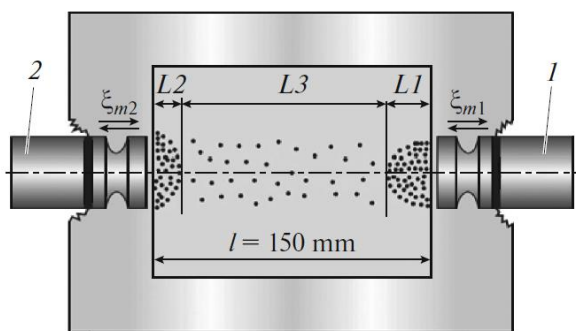


Рис. 1. Експериментальна установка з високо та низькочастотними ультразвуковими випромінювачами

Розширюються пропозиції щодо галузей застосування ультразвукового очищення. Так у роботі [8] пропонується виконувати очищення підводних нафтопроводів за допомогою ультразвуку та запропоновано методологію маринізації обладнання, в лабораторних умовах доведено ефективність підводного ультразвукового очищення.

Модельовання процесу ультразвукового очищення. Worapol Tangsofha та інші [9] на замовлення виробника ультразвукових баків моделювали процес ультразвукового очищення для підвищення його ефективності. Оскільки точного математичного рівняння, що описує процес створення кавітації, немає то за основу вони брали хвильове рівняння акустичного тиску (рівняння Гельмгольца)

$$\nabla \cdot -\frac{1}{\rho}(\nabla p) - \frac{\omega^2 p}{c^2 \rho} = 0,$$

де акустичний тиск  $p = p_0 \exp(i\omega t)$ ,  $\omega$  – кутова частота хвилі. Константи  $c$  та  $\rho$  – швидкість хвилі та густина води відповідно. З урахуванням цього рівняння математична модель для акустичного тиску була виражена як

$$([K]) - \omega^2 [M] \{U\} - [G] \{P\} = 0,$$

$$\left( \frac{1}{\rho \omega^2} [S] - \frac{1}{\rho c^2} [T] \right) \{P\} - [G]^T \{P\} = \{W\},$$

де  $[K]$  та  $[M]$  – матриці структурної жорсткості і маси, відповідно,  $[G]$  – матриця зв'язків,  $[S]$  та  $[T]$  – матриці акустичної інертності та еластичності  $\{U\}$ ,  $\{P\}$  та  $\{W\}$  – вектори структурного вузлового переміщення, вузлового тиску рідини та акустичного впливу, відповідно.

В результаті моделювання процесу ультразвукового очищення з 8 п'єзоелектричними перетворювачами, розташованими на дні баку отримано наступні результати: зміна потужності ультразвукового перетворювача впливає лише на потужність акустичного тиску, не змінюючи картину кавітаційного розподілення суттєво (рис. 2, рис 3), ефективність очищення буде залежати від розташування забрудненого виробу (найефективніше очищення в середині баку). Збільшення частоти призводить до збільшення кількості зон з максимальним акустичним тиском. Збільшення кількості перетворювачів також впливає на підвищення однорідності кавітаційного розподілу. Вплив зміни положень перетворювачів досліджений не був.

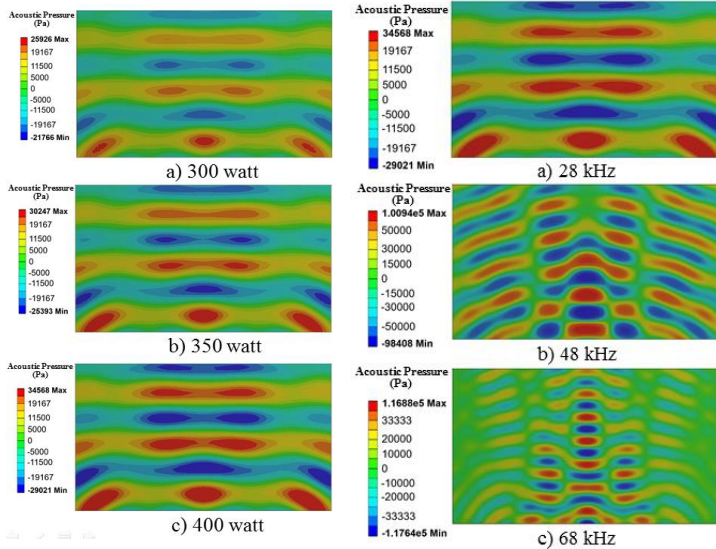


Рис.2. Акустичний тиск при зміні потужності

Рис.3. Акустичний тиск при зміні частоти

В праці [10] розглядається моделювання акустичного тиску і побудова структури поля тиску.

Процес моделювання в цьому дослідженні виконується у двох самостійних напрямках. Спочатку визначається амплітуда поля тиску на основі розв'язку, отриманого з використанням трансформованого рівняння Гельмгольца

$$\nabla \left( \frac{1}{\rho} \nabla P(r,t) \right) - \frac{1}{c^2 \rho} \cdot \frac{\partial^2 P(r,t)}{\partial t^2} = 0,$$

де  $P$  - акустичний тиск. Константи  $c$  та  $\rho$  - швидкість хвилі та густина рідини відповідно, а потім вирішуються за допомогою програмного забезпечення FLUENT. Частота коливань і швидкість хвилі мають протилежний вплив на реакцію системи на прикладений тиск

$$\nabla \left( \frac{1}{\rho} \nabla P(r,t) \right) - \frac{\omega^2}{c^2 \rho} P(r) = 0,$$

де акустичний тиск  $p = p_0 \exp(i\omega t)$ ,  $\omega$  - кутова частота хвилі. Константи  $c$  та  $\rho$  - швидкість хвилі та густина води відповідно.

Відповідно, число хвиль визначається як відношення ультразвукової частоти до швидкості хвилі ( $\omega / c$ ). Як число хвиль збільшується, тенденція рідини до більш високих градієнтів тиску підсилюється. На рис. 4 продемонстровано вплив температури, частоти коливань на поле тиску по всій області потоку. В результаті індукованого тиску на кінчику випромінювача, поля тиску коливається навколо певних середніх значень у різних місцях. Ці амплітуди тиску відіграють важливу роль у визначенні активних регіонів кавітації, які є зонами з тиском нижче конкретного рівня. конкретного рівня. Ці зони визначаються чорною лінією навколо цих регіонів на рис. 4. Для ініціювання процесу кавітації, середній ефективний тиск повинен бути знижений до певної величини і після цієї точки тиску коливання призводить до розширення кавітаційних бульбашок та їх скорочення аж до розриву. Оскільки процес кавітації розпочинається в регіонах з достатнім негативним тиском, важливо визначити зони з негативним тиском, а також величину їх тиску. Згідно цих досліджень, схема тиску сильно залежить від  $\omega$  швидкості хвилі, температура лише зміщує величини тиску.

Докладне математичне обґрунтування процесу ультразвукового очищення наведено у [11]. Розглянуто просту контактну модель, що враховує ковзання між поверхнями з урахуванням коефіцієнтів статичного та динамічного тертя, акцент при цьому зроблено на динаміці кавітаційних бульбашок та навантаженнях, що виникають при цьому. Використана модель - це модель кулонівського тертя, де коефіцієнт тертя визначається як

$$\mu = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) \exp(-\beta V_{rel}),$$

де  $\mu_s, \mu_k$  - коефіцієнти статичного та кінетичного тертя, відповідно,  $\beta$  - коефіцієнт швидкості переходу від статичного до кінетичного тертя,  $V_{rel}$  - відносна швидкість між поверхнями тертя.

Система частинка – тіло моделюється за допомогою моменту та сили балансу, що і будуть визначати відшарування частинки забруднення від поверхні тіла при перевищенні величин гідродинамічного крутного моменту та сили граничних значень. Для обчислення динаміки частинки бруду розраховується поле тиску на кожному кроці та визначаються результуючі вектори сили та моменту. Вони застосовуються до рівнянь руху твердого тіла, які інтегруються для визначення нового розташування, орієнтації та швидкості частинки.

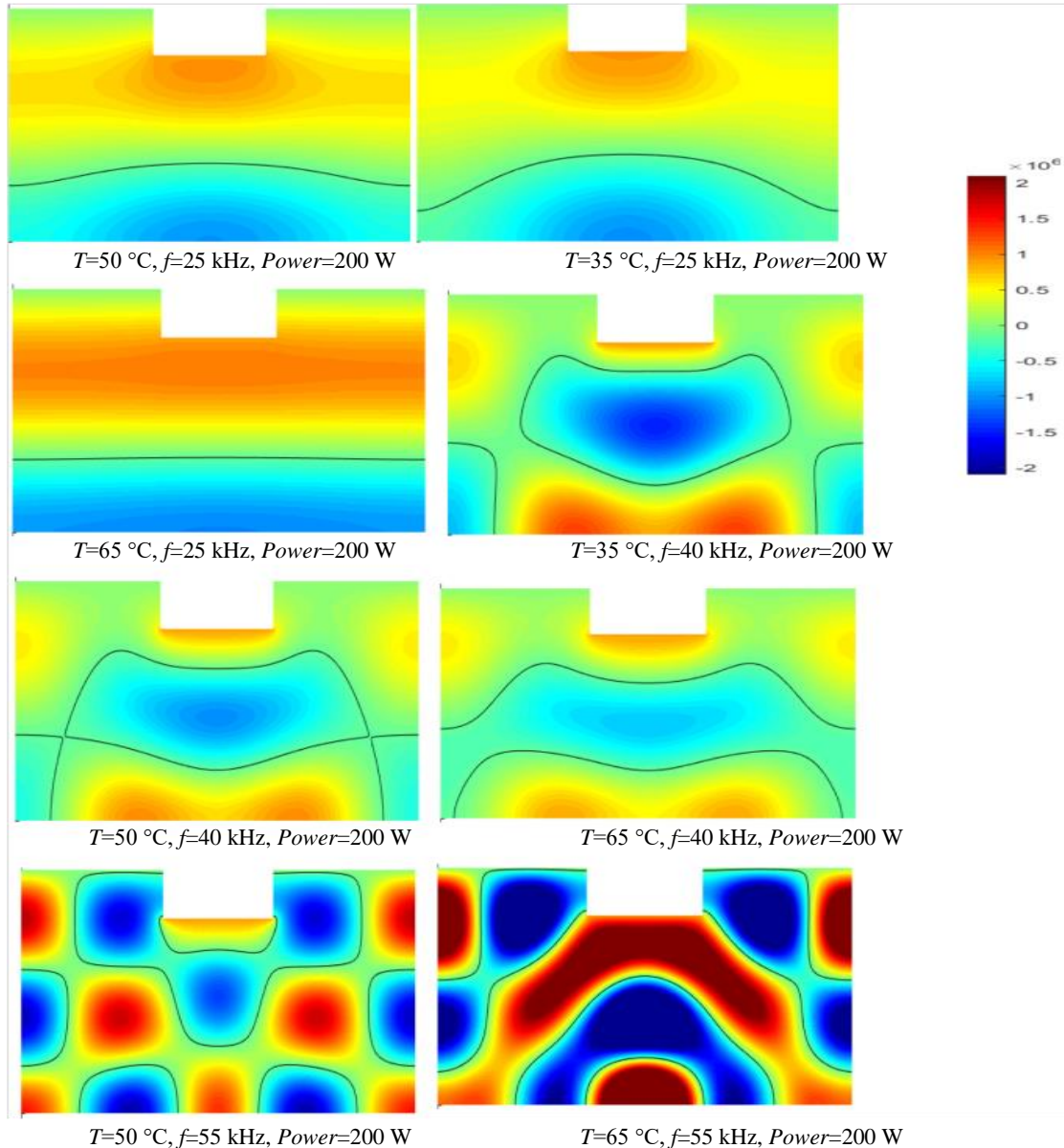


Рис. 4. Поле тиску в залежності від температури ( $T$ ), інтенсивності ( $Power$ ) та частоти ( $f$ ) ультразвуку

Рух центру мас отримується при інтегруванні тиску вздовж змоченої поверхні частинки та врахування інших сил  $F_d$ , наприклад, тертя (зумовленого силами тертя, адгезії та додатковим в'язким опором)

$$M \cdot \frac{dV_G}{dt} = - \iint_{S_B} p \cdot n \cdot dS + F_d,$$

де  $M$  - маса тіла, а  $V_G$  - вектор швидкості центру маси. Для твердого тіла, що не деформується, локальна нормальна швидкість на швидкості стінки тіла пов'язана з  $V_G$  і кутовою швидкістю тіла,  $\omega$  так

$$u_s \cdot n = (V_G + \omega \times R_G) \cdot n,$$

де  $R_G$  - вектор від центру тіла ваги до точки на поверхні тіла.

Рівняння збереження кутового імпульсу  $H$ , задається наступним чином

$$\frac{dH}{dt} = -\omega \times H - \iint_{S_B} P \cdot (R_G \times n) \cdot dS.$$

Розв'язання двох рівнянь дає змогу оновлювати положення та напрям частинок у кожен момент часу. Отже, на процес очищення впливає, де знаходиться центр мас очищувального виробу відносно випромінювачів ультразвуку.

*Аналіз наявних систем керування процесом ультразвукового очищення.* Окрім фізичних та хімічних напрямів розвитку ультразвукового очищення не менш важливим залишається розвиток систем управління цим процесом. Наріжним питанням залишаються вимірювання, на основі яких можна буде здійснювати, керування ультразвуковим очищенням. В праці [12] пропонується оцінювати завершеність процесу очищення за допомогою ультразвукових віддзеркалень, що генеруються в середині теплообмінника або труби. Важкість у цьому випадку, пов'язана із необхідністю використовувати неінвазивне ультразвукове вимірювання. Оскільки важко у таких умовах отримати експертні оцінки, на основі яких відбудеться оцінка вимірювань, використовується згортоква нейронна мережа, навчання якої засновано на основній фізичній властивості процесу: під час очищення кількість забруднення може лише зменшуватись. В лабораторних умовах підтверджено зменшення часу на ультразвукове очищення, а відповідно і енергозатрат.

Ще однією можливістю визначення тривалості процесу очищення є визначення змін електропровідності та каламутності очищувальної рідини. У праці [13] розроблено и виконано пристрій ультразвукового очищення, керування в якій базується на інформації датчиків опору очищувальної рідини, що вимірювали за допомогою металевих стрижнів (рис.5), занурених у рідину, та оптичного датчику каламутності, інтерпретація даних якого проводилась через кількість світла, що отримана від приймача до передавача (рис.6).

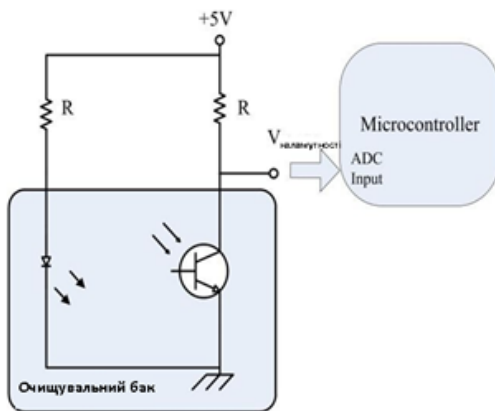


Рис. 5. Вимірювання провідності очищувальної рідини

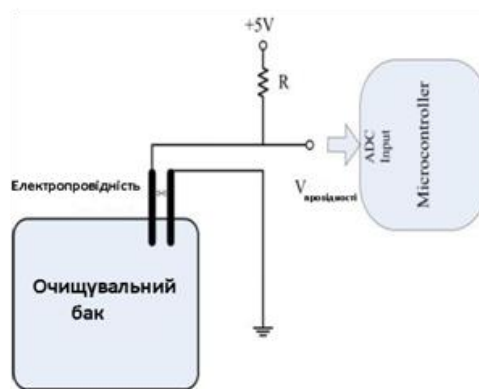


Рис.6. Вимірювання каламутності очищувальної рідини

Під час експериментів отримані графіки залежності, що вказують про існуючий зв'язок між вимірюваними параметрами та процесом очищення. Процес очищення припиняється при відсутності змін каламутності та провідності (рис.7).

В праці [14] запропонована ультразвукова система очищення із змінним частотним діапазоном від 30 кГц до 60 кГц, що змінюється автоматично в залежності від зміни температури рідини. В системі застосовано 9 п'єзоелектричних ультразвукових перетворювачів, один з яких наклеюється на дно з нержавіючої сталі сталевого баку, а решта - приклеюються до навколишнього цистерни.

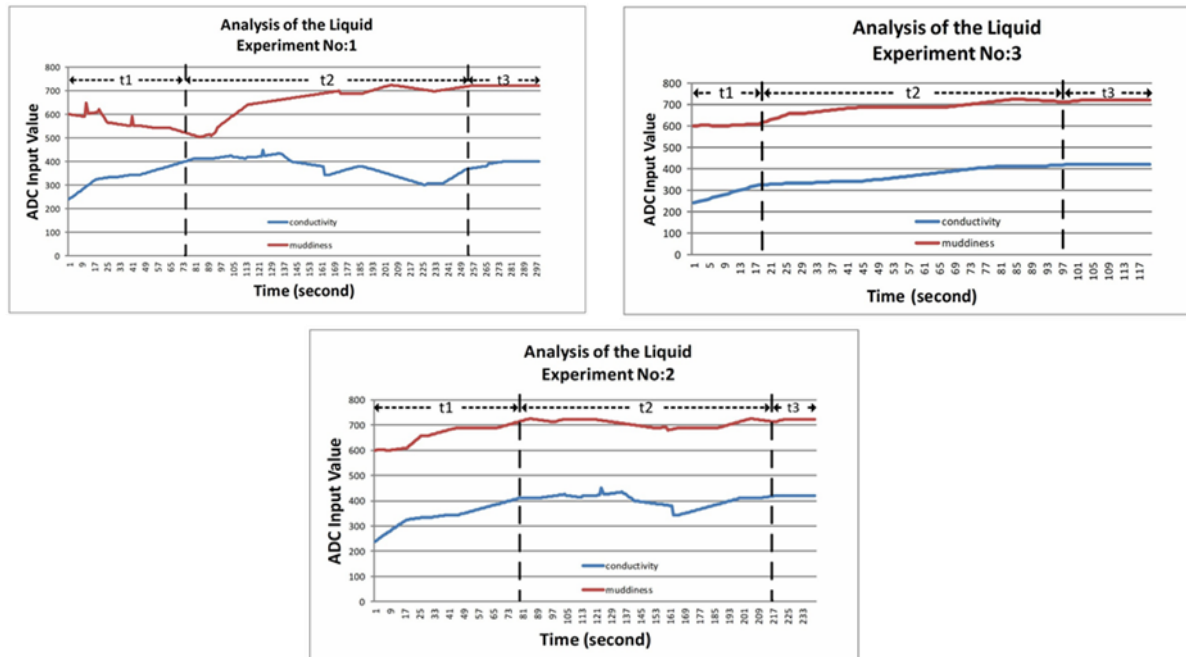


Рис. 7. Змінення значень каламутності та провідності в процесі очищування

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Питання підвищення ефективності ультразвукового очищення, як найбільш екологічного та ефективного способу очищення, дуже актуальне. Центральним постає питання збільшення безпечних кавітаційних зон. Оскільки згідно огляду, кавітація розподіляється нерівномірно у ємності, то постає необхідність створити систему керування, яка б забезпечила максимальну ефективність розподілення кавітації у просторі. І якщо феномен кавітації широко досліджується та моделюється у науковій літературі, то питання ефективних систем управління процесом ультразвукового очищення освітлений не так широко. Наявні системи оцінки стану процесу ультразвукового очищення не дають змоги визначити необхідності продовження процесу в залежності від забрудненості на окремих ділянках виробу. Отже, для створення системи керування ультразвуковим очищенням із урахуванням різної забрудненості ділянок виробу складної конфігурації необхідно розробити і системи оцінювання забрудненості об'єкта, що очищується. Також необхідно враховувати вплив таких основних показників, як частота, температура та інтенсивність ультразвукового випромінювання.

#### Список літератури

1. Morkun V.S. Ultrasonic Control of Random Heterogeneous Mediums Parameters//AMMTIAC'42, 1992.
2. Моркун В.С., Пикільняк, А. В., Подгородецкий Н. С., Касаткина И. В. Определение параметров ультразвуковой фазированной решетки для формирования управления распределением газовых пузырьков по размерам в процессе флотации железной руды. [Вісник Криворізького національного університету](#). 2014. Вип. 38. С. 77-81.
3. Yamashita T., Ando K. Low-intensity ultrasound induced cavitation and streaming in oxygen-supersaturated water: Role of cavitation bubbles as physical cleaning agents. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019. Vol. 52, №. 1. P. 268-279.
4. Niemczewski B. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21, №.1. P. 354-359.
5. Saalbach K.-A., Twiefel J., Wallasche J. Self-sensing cavitation detection in ultrasound-induced acoustic cavitation. *Ultrasonics*. 2019. Vol. 94. P. 401-410.
6. Xu H., Tu J., Niu F., Yang P. Cavitation dose in an ultrasonic cleaner and its dependence on experimental parameters. *Applied Acoustics*. 2016. Vol. 101. P. 179-184.
7. Nigmatzyanov, R. I., Kazantsev, V. F., Prikhod'ko, V. M., Sundukov, S. K., Fatyukhin, D. S. Improvement in Ultrasound Liquid Machining by Activating Cavitation Clusters. *Russian Engineering Research*. 2019. Vol. 8. P. 699-702.
8. Habiba, L., S.Lowe, P., C.Wrobel, L., & Gan, T.-h. Ultrasonic Transducer Array Performance for Improved Cleaning of Pipelines in Marine and Freshwater Applications. *Applied Sciences*. 2019, Vol. 9. P. 20-39.
9. Tangsopha, W., Thongsri, J., & Busayaporn, W. Simulation of ultrasonic cleaning and ways to improve the efficiency. 5th International Electrical Engineering Congress. 8-10 March 2017.
10. Roothia R., Abedib E., Hashemi S. M., Marszalek K., Lorenzo J. M., J. Barbae F. Ultrasound-assisted bleaching: Mathematical and 3D computational fluid. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2019. Vol. 55. P. 66-79.

11. G.L.Chahine G.L., Kapahi A., Choi J.-K., Hsiao C.-T. Modeling of Surface Cleaning by Cavitation Bubble Dynamics and Collapse. *Ultrasonic Sonochem.* 2016. Vol. 29, P. 528-549.
12. Rajani, C., A. K., Salmi, A., Rauhala, T., Hægström, E., Myllymäki, P. Detecting industrial fouling by monotonicity during ultrasonic cleaning. AALBORG:018 IEEE 28th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP). 2018. P. 6-12.
13. Duran, F. Design and implementation of an intelligent ultrasonic cleaning device. *Intelligent Automation and Soft Computing.* January. 2018. Vol.25, № 3. P. 441-450.
14. Rahim A, Bargoshadi H., Sarrafi S. Design and Manufacture an Ultrasonic Dispersion System. *Sensors & Transducers Journal.* 2011., Vol. 126, №. 3. P. 52-63.

Рукопис подано до редакції 07.10.2019

УДК 629.113-83

ALEXANDER BESHTA, Doctor of technical sciences, professor, OLEKSANDR AZIUKOVSKI, Candidate of technical sciences, professor, EUGENIA KHUDOLII, Junior researcher, SERHII KHUDOLII, Candidate of technical sciences, ALEXANDER BALAKHONTSEV, Candidate of technical sciences, National Technical University "Dnipro polytechnic" MOHAMMED BESHHERIF, HAITHAM RAMADAN, Doctors of technical sciences, professors University of Technology of Belfort-Montbeliard

**Purpose.** Assessment of economic feasibility of the 'vehicle-to-grid' technology (co-generation to the grid from the electric vehicle's battery) for the car owner. Evaluation of financial indicators and estimation of conditions when this technology may become attractive for all the stakeholders of electric mobility market.

**Research methods.** Forecasts of the National Commission for Electric Energy Regulation of Ukraine, as well as analytical data and information from manufacturers of electric vehicles are used in the study. Analysis of daily charging/travelling schedule, ratings of power vs. capacities are used for the evaluation of financial expenditures and profits of the car owners.

**Scientific novelty.** It is proven that V2G technology would become feasible if the battery capacity increases, the power rating of charging/generation stations gets bigger and the special green tariff for co-generation from electric vehicles is introduced.

**Practical value.** Electricity tariff rates as well as other data necessary for calculations of V2G feasibility are given.

**Results.** The overview of renewables in Ukraine and electric mobility in particular are carried out, their feasibility is assessed. The tariffs on electricity from renewables are analyzed, the share of renewable energy sources in Ukraine in future is forecasted. Aspects of V2G technology are analyzed in detail – the use of vehicles' batteries as intermediate energy storage, their charging during cheap night tariffs and co-generation during high demand in order to level electricity consumption on the grid level. It appears that the rated power of charging stations is a 'bottle-neck' – the main limiting factor. Besides, it is shown that reduction of batteries' service life makes the V2G idea inexpedient for the car owner, unless the green tariff will rise.

**Key words:** renewables, green tariff, electric vehicles, co-generation, feasibility study

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-9-14

**The problem and its relationship with scientific and practical tasks.** Renewables and electric vehicles (EVs) are widely discussed around the world. Both these technologies are often referred to as 'green', 'clean' or 'environmentally friendly'. Reduction of CO<sub>2</sub> emissions is also one of the incentives from international organizations like the United Nations Development Programme.

Meanwhile, it is admitted that the share of renewable energy sources in total energy generation is still small. Most countries provide themselves with energy by burning gas and coal, i.e. fossil fuels, in rare cases, like in France or Ukraine, the major energy resource is nuclear power. Electric vehicles are actually not '100% green' – they are charged with electricity, derived from 'non-green' power stations. To make our environment really cleaner, renewable energy is to be deployed at far greater scale than it is now.

It is known that both technologies in question are very expensive yet. Wind turbines and photovoltaic (PV) panels can not compete with gas stations when it comes to price of kilowatt-hours of electricity. The price for electric cars rapidly declines, but their batteries are still a limiting factor. They are expensive to buy, degrade with time quicker than other vehicle components and require recycling.