

УДК 628.164

## СПОСІБ ЗНИЖЕННЯ СОЛЕЙ ЖОРСТКОСТІ ВОДИ І ТЕПЛОМАСООБМІННЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

Ободович О.М.,<sup>1</sup> докт. техн. наук, Сидоренко В.В.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, Целень Б.Я.<sup>3</sup>, канд. техн. наук,  
Резакова Т.А.<sup>4</sup>, канд. техн. наук

*Інститут технічної теплофізики НАН України, Україна, 03057 м. Київ, вул. Марії Канніст, 2а*  
*<sup>1</sup>завідувач відділу, e-mail: tdsittf@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>*

*<sup>2</sup>с.н.с. e-mail: vrangel08@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>*

*<sup>3</sup>пров. н. с, e-mail: b0d@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>*

*<sup>4</sup>пров.н.с, e-mail: rezakova\_ittf@ukr.net*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.10>

*В роботі наведено огляд існуючих технологій та обладнання для знесолення води, визначені їх переваги та недоліки. Проведено експерименти по використанню роторно-пульсаційного апарата (РПА) для знесолення води. Встановлено оптимальні технологічні параметри обробки води в РПА і доведено ефективність її очищення застосовуючи запропоноване обладнання в порівнянні з існуючим.*

*The paper presents an overview of existing technologies and equipment for water desalination and identifies their advantages and disadvantages. Experiments were carried out on the use of a rotary-pulsation apparatus for water desalination. The optimal technological parameters of water treatment in a rotary pulsation apparatus have been established. The efficiency of water treatment using the proposed equipment in comparison with the existing one has been proven.*

Бібл.8, рис. 6.

**Ключові слова:** котел, водопідготовка, пом'якшення води, аміак, імпульс, роторно-пульсаційний апарат (РПА).

В промисловості, комунальній енергетиці та сільському господарстві країни працюють тисячі парових та водогрійних котлів середніх і низьких параметрів надійна робота який значною мірою визначається веденням раціонального водно-хімічного режиму.

Вода широко використовується як теплоносіє завдяки високій питомій теплоємності, відносній дешевизні і доступності, однак присутність в природній воді сторонніх домішок спричиняє низку проблем при експлуатації котельного обладнання починаючи з утворення різних відкладів на теплообмінних поверхнях і закінчуючи корозійними процесами обладнання і трубопроводів, що, в свою чергу, призводить до зниження ефективності роботи котлоагрегата, збільшення енерговитрат, прискореного зношування обладнання аж до повного дострокового виходу його з ладу.

Враховуючи вищенаведені причини, до живильної і котлової води встановлені певні вимоги щодо її якості, що описані «Правилами будови і безпечної експлуатації теплових і водогрійних котлів» або вимогами виробників котлового обладнання, де, зокрема, регламентується прозорість води, її жорсткість, вміст заліза і міді, кількість розчиненого у воді кисню, значення рН, вміст нафтопродуктів.

Отримання води з необхідними характеристиками у зв'язку з різним фізико-хімічним складом природних вод вимагає раціонального підходу до вибору технології та обладнання і в окремих випадках може бути складною задачею.

Домішки, що містяться у воді, можна розділити на дві групи: розчинені і нерозчинені (механічні). Висока каламутність, наявність зважених і колоїдних частинок призводить до накопичення шлама, забивання трубної системи котла і порушення циркуляції теплоносія. Залежно від джерела водозабору і кількісних показників нерозчинених забруднень вибирається метод механічного очищення і освітлення води. У найпростішому випадку застосовують механічний фільтр з рейтингом фільтрації 200-500 мкм, а при поверхневому водозаборі – додаткову обробку коагулянтами і флокулянтами з подальшим відстоюванням і освітленням.

До розчинених домішок, що впливають на роботу котлового обладнання, в першу чергу відносять солі жорсткості. При використанні жорсткої води відбувається утворення накипу на поверхні, погіршується тепловіддача, відбувається перегрів труб зі сторони нагрівання, що може привести до їх руйнування. Залежно від типу котла висуваються менш

або більш жорсткі вимоги щодо вмісту солей кальцію і магнію в живильній і котловій воді. На підставі вимог до необхідного ступеня очищення, вихідної жорсткості води і необхідної продуктивності обладнання вибирається спосіб її пом'якшення.

До основних способів пом'якшення води належать:

- а) пом'якшення води з використанням Натрієвої смоли;
- б) пом'якшення води шляхом вапнування;
- в) пом'якшення води шляхом зниження загального солевмісту на установках зворотного осмосу;
- г) пом'якшення води шляхом зниження загального солевмісту послідовним її пропусканням через Н, ОН-іонообмінні фільтри.

На сьогоднішній день проводяться дослідження в напрямку розроблення безреагентних методів, у яких для зниження жорсткості води використовується лише енергія ультразвукових коливань. За рівнем використовуваної акустичної потужності їх можна розділити на способи, де інтенсивність випромінюваного у воду ультразвуку не перевищує кавітаційного порогу в ній, і способи, що спричиняють виникнення у воді акустичної кавітації, що трансформує енергію пружної хвилі в енергію кавітаційного тиску. До перших відноситься спосіб озвучування простору котлів у вигляді закріплених ззовні джерел ультразвукових коливань – електроакустичних перетворювачів [1]. Сучасні аналоги цього способу та пристроїв для такого роду озвучування, у тому числі коливаннями, що передаються за допомогою самих стінок теплообмінного обладнання, описані в технічній літературі, а в патентній літературі практично відсутні, очевидно, завдяки інваріантності їх здійснення та широкої популярності з огляду технічних застосувань ультразвуку, зробленого у середині минулого століття Л. Бергманом та опублікованого у багатьох країнах [2]. Принцип акустичних докавітаційних способів запобігання утворенню накипу базується на збудженні у вже нагрітій воді малопотужних ультразвукових коливань. Під дією цих коливань солі жорсткості легше кристалізуються безпосередньо в товщі води, ніж на твердих стінках обладнання, якщо останні здійснюють згинальні коливання, що перешкоджають утворенню на них стабільних центрів кристалізації. Продукти об'ємної кристалізації є зваженою у воді дрібнодисперсною твердою фазою, яка або виноситься потоком, або осаджується і може бути легко видалена механічно. Випромінювачі ультразвуку кріплять до зовнішніх поверхонь котла або теплообмінника у певних точках і розташовують на них певним чином [3, 4].

Також відомі такі способи впливу, в яких крім енергії гармонійних ультразвукових хвиль, що поширюються у воді, використовують ще й енергію акустичної кавітації [5], що виникає в пружних хвилях при подоланні амплітудою звукового тиску деякого властивого воді за будь-яких конкретних фізичних умов кавітаційного порогу.

Відомі способи обробки різних рідин, включаючи воду, в кавітаційному потоці при заданій питомій об'ємній потужності енергії для ініціалізації акустичних коливань і реактори для їх здійснення, що можуть бути використані, в тому числі, і для зниження карбонатної жорсткості води. Дане обладнання розраховане на обробку рідин з широким спектром фізико-хімічних, зокрема акустичних властивостей і тому до нього не висуваються конкретні вимоги щодо рівня енергії кавітаційного впливу, що дозволив би забезпечити потрібний ефект пом'якшення води. Це перешкоджає їх використанню для гарантованого отримання результату без проведення додаткових досліджень та запровадження додаткових умов їх використання з цією метою.

Відомий спосіб обробки водних розчинів електролітів, тобто речовин, що легко дисоціюють у воді на іони, де інтенсивність ультразвуку, що викликає кавітацію, має інваріантне по відношенню до вмісту електроліту в розчині значення, тобто при будь-якому його вмісті перевищує поріг, вище якого величина виділеної за період ультразвуку потенційної енергії кавітації практично залишається постійною, оскільки досягає відомої фізичної межі, що існує для кавітації, що діє в одній пружній хвилі [6]. Ефект пом'якшення базується на переформуванні гідратних оболонок іонів розчинених електролітів та руйнуванні молекулярних кластерів води, тобто на підвищенні дисоціюючої здатності води за рахунок тимчасового переведення її в мономолекулярний стан [7].

Наведені вищеспособи безреагентного пом'якшення води в потоці реалізуються за рахунок ультразвукових хвиль та акустичної кавітації. Основним недоліком вищенаведених способів є необхідність озвучування простору водогрійних котлів шляхом закріплення на них ззовні джерел ультразвукових коливань – електроакустичних перетворювачів.

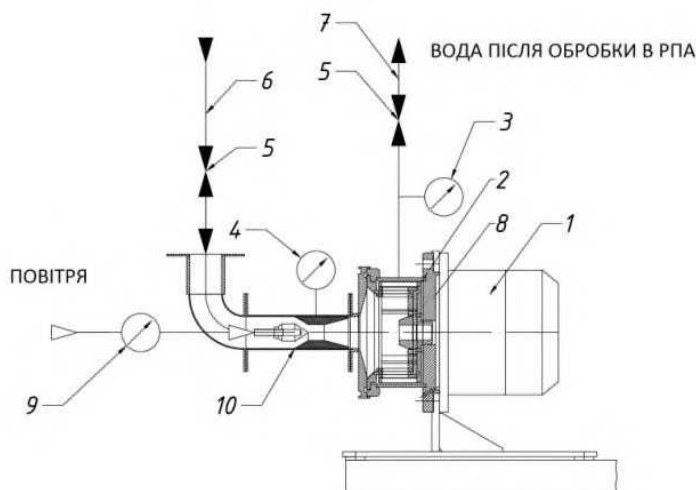
Метою роботи є підвищення якості пом'якшеної води, зниження витрати реагентів та інтенсифікація процесу пом'якшення води шляхом застосування тепломасообмінного обладнання.

Для досягнення поставленої мети розроблено тепломасообмінне обладнання, в якому передбачено створення великої кількості рівномірно розподілених

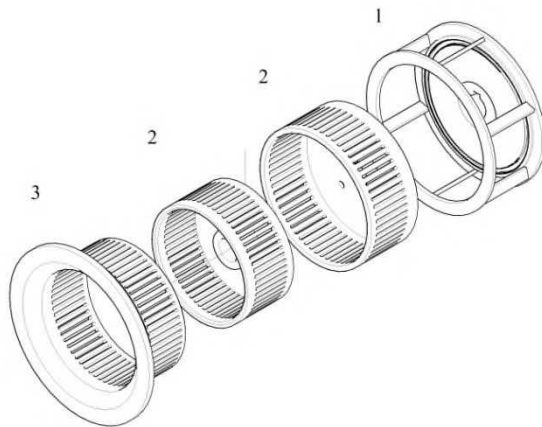
у воді робочих органів (робочих елементів), що трансформують стаціонарну теплову або інші види енергії в дискретні в часі і просторі енергетично потужні імпульси. Ударні та ультразвукові хвилі, які супроводжують ці явища, міжфазна турбулентність, акустична і гідродинамічна кавітація, проникаючі кумулятивні мікрострумини та вихори спричиняють появу на міжфазних поверхнях нестійкості типу Релея-Гейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до інтенсифікації перебігу процесу пом'якшення води, значного збільшення поверхні контакту фаз, посиленню процесів масо- і теплопереносу. Подібні ефекти у ви-

падку використання закріплених ззовні джерел ультразвукових коливань – електромагнітних перетворювачів – є недосяжними.

Розроблене тепломасообмінне обладнання для дослідження перебігу процесу пом'якшення води було виконане у вигляді роторно-пульсаційного апарата (РПА) спеціальної конструкції з реалізацією впливу на рідину методом дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Теоретичне дослідження механізмів методу ДІВЕ, технологічні та інженерні доповнення і узагальнення до нього наведені в [8–13]. Схему РПА наведено на рис. 1, а його робочі органи – на рис. 2.



**Рис. 1. Схема РПА: 1 – електродвигун; 2 – роторно-пульсаційний вузол; 3 – манометр для вимірювання тиску на виході з роторно-пульсаційного вузла; 4 – вакуумметр для вимірювання розрідження у вхідному патрубку; 5 – двоходовий кран; 6 – приймальний трубопровід; 7 – випускний трубопровід; 8 – корпус РПА; 9 – ротаметр; 10 – ежекторний вузол**



**Рис. 2. Робочі органи роторно-пульсаційного вузла: 1 – робоче колесо відцентрованого насоса; 2 – ротор; 3 – статор**

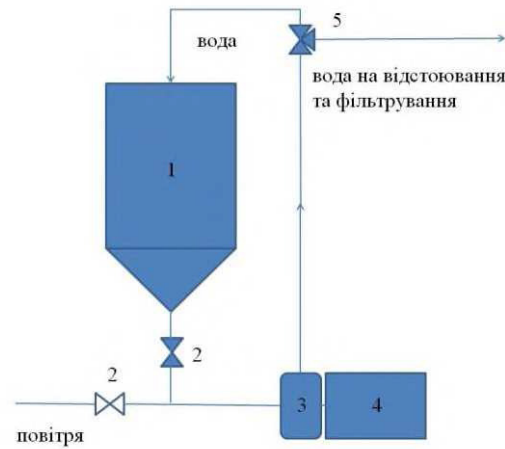
Апаратурно-технологічну схему роторно-пульсаційної установки наведено на рис. 3. Загальний вигляд роторно-пульсаційної установки зображений на рис 4.

Роторно-пульсаційна установка працює наступним чином. В приймальний бункер 1 подають воду, що очищується та, при необхідності, додаткові хімічні реагенти. Далі відкривають двоходовий кран 2. Вода або її суміш з хімічними реагентами надходить в РПА де піддається впливу вищеописаних ефектів. Після цього вода повертається в приймальний бункер 1 і знову циркулює по контуру. Після закінчення обробки шляхом

переключення трьохходового крану 5 вода подається на відстоювання та фільтрацію. У вхідний патрубок РПА також можна подаватися повітря.

Пом'якшення води здійснювали в наступним чином. Вихідну воду подавали в приймальний бункер 1, де для очищення від солей жорсткості додатково вводили водний розчин аміаку ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) в кількості 0,002...0,0052 %.

Далі вмикали РПА забезпечуючи циркуляцію суміші води з аміаком по контуру «приймальний бункер– РПА – приймальний бункер» і її обробку.



*Рис. 3. Апаратурно-технологічна схема роторно-пульсаційної установки: 1 – приймальний бункер; 2 – двоходовий кран; 3 – РПА; 4 – електродвигун; 5 – триходовий кран*



*Рис. 4. Загальний вигляд роторно-пульсаційної установки*

Водо-аміачну суміш обробляли в РПА при частоті пульсацій потоку 3...5 кГц з амплітудою перепаду тиску 360...400 кПа до досягнення температури 40°C, що спричинялось дисипативним тепловиділенням в потоці.

При проведенні експериментів було досліджено залежність ступеня пом'якшення води від масової концентрації аміаку та амплітуди перепаду тиску (рис 5). Частота пульсацій потоку залишалась незмінною і становила 4 кГц.

Встановлено, що ступінь пом'якшення води 99% спостерігається при масовій концентрації аміаку 0,022% з амплітудою перепаду тиску 400 кПа.

Зі зниженням амплітуди перепаду тиску до 380 кПа та 360 кПа ступінь пом'якшення води знижується до 90 % та 95 % відповідно.

З огляду на це концентрацію аміаку не варто підвищувати більш ніж 0,022%. В подальших

Табл. 1. Залежність ступеня пом'якшення води від масової концентрації розчину аміаку та частоти пульсації потоку  $f$

Масова концентрація розчину аміаку, %	Ступінь пом'якшення води, %		
	$f = 3,0$ кГц	$f = 4,0$ кГц	$f = 5,0$ кГц
0,000	15,0	17,0	21,0
0,012	93,0	94,0	96,0
0,022	97,0	99,0	99,0
0,032	98,0	99,0	99,0
0,042	98,0	99,0	99,0
0,052	98,0	99,0	99,0

дослідженнях незмінним параметром залишалась амплітуда перепаду тиску, що становила 400 кПа.

Залежність ступеня пом'якшення води від масової концентрації розчину аміаку і частоти пульсації потоку наведено в таблиці 1.

Дані таблиці 1 показують, що при частоті пульсації потоку 4 кГц і масовій концентрації розчину аміаку 0,022% ступінь пом'якшення води становить 99%. Подальше збільшення вказаних параметрів не дає бажаного результату, а лише підвищує енергозатрати і витрату реагентів.

Таким чином встановлено, що знесолення води застосовуючи РПА слід проводити в режимі рециркуляції розчину аміаку з концентрацією 0,022% при частоті пульсації потоку 4 кГц з амплітудою перепаду тиску 400 кПа.

Порівняльний аналіз способу знесолення води з застосуванням РПА зі способом механічної активації шляхом пропускання потоку води крізь мембранну систему з отворами діаметром не більше 1мм [13] показав ефективність першого способу.

Ефективність запропонованого способу підготовки води полягає в зниженні необхідної концентрації розчину аміаку більше ніж в два рази і підвищенні ступеня пом'якшення води з 93 % до 99 % у порівнянні з існуючим.

Доцільність застосування РПА при вилученні солей жорсткості досягається за рахунок надтеплого механізму переведення розчинних бікарбонатів в нерозчинну карбонатну форму. Механізм цих реакцій базується на руйнуванні кавітаційними імпульсами тиску, що розповсюджуються у воді гідратних оболонок розчинених у воді бікарбонатів  $\text{Ca}(\text{HCO})_2$  та  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$

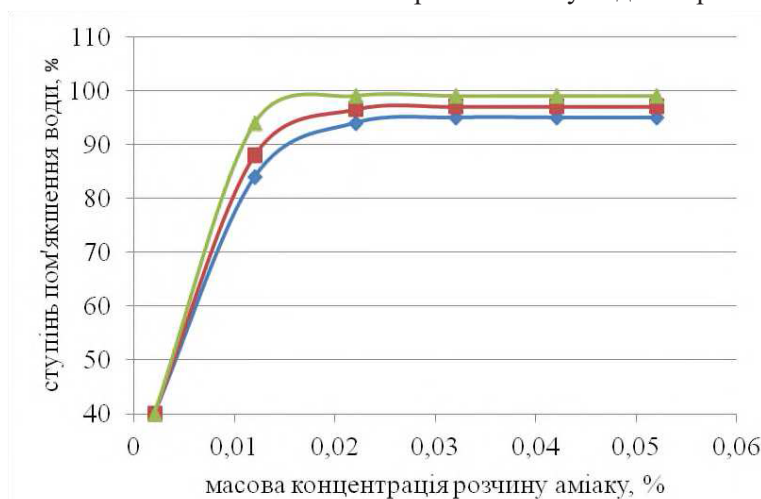


Рис. 5. Залежність ступеня пом'якшення води від масової концентрації аміаку та амплітуди перепаду тиску: ♦ - 360; ■ – 380; ▲ – 400 кПа

призводячи до гідратації іонів і стимулюванні переходу солей жорсткості в аморфну колоїдну форму  $\text{CaCO}_3$  і  $\text{MgCO}_3$ .

Деякі фізичні властивості води можуть зворотно змінюватись внаслідок її насичення бульбашками повітря. Після проходження водним потоком РПА, в якому за рахунок переходу гідростатичного тиску в динамічний напір (реалізується перехід потенційної енергії в кінетичну) виникає газорідний потік з великою площею питомої поверхні контакту фаз, що дозволяє частково вилучати з рідини розчинені гази, зокрема вуглекислоту.

Відомо, що надмірна вільна вуглекислота, на відміну рівноважної, дуже активна і називається агресивною, будучи однією з головних причин корозії трубопроводів. Частина її, діючи на карбонат кальцію, перетворює його на гідрокарбонат, а інша переходить у рівноважну вугільну кислоту для утримання його в розчині. В результаті збільшення площі поверхні контакту фаз полегшуються реакції з молекулами середовища та іншими твердими тілами, порушується кристалічна решітка, вода стає нестабільною і в результаті хімічної реакції випадає осад  $\text{CaCO}_3$  і  $\text{MgCO}_3$ . Також спостерігається поява осаду  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  внаслідок зміни рН води.

Таким чином, застосування РПА для вилучення з води від солей жорсткості може знайти промислове застосування.

#### Висновки.

Видалення солей жорсткості з води актуальне для підприємств комунального господарства, практично всіх галузей промисловості, але в першу чергу для теплоенергетики. В роботі наведено огляд існуючих технологій та обладнання для знесолення води, визначені їх переваги та недоліки. Показано доцільність застосування методу ДІВЕ для підвищення ефективності зниження жорсткості води. Описано конструкцію РПА, в котрому реалізується метод ДІВЕ. Проведено експерименти по використанню РПА для знесолення води. Встановлено оптимальні технологічні параметри обробки води в РПА. Доведено ефективність очищення води із застосуванням запропонованого обладнання порівняно з існуючим.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Патент US 10427956B2 C02F1/36 Ultrasound and acoustophoresis for water purification/Jason Dionne, Bart Lipkens, Edward Rietman
2. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Издательство Иностранной литературы, 1996. – 726 с.
3. Новик А.А. Ультразвуковые установки для борьбы с отложением накипи. URL: [www.utinlab.ru](http://www.utinlab.ru)
4. Николаевский Н.Н. Ультразвуковой метод предотвращения накипеобразования. Новости теплоснабжения. 2002, №. 10 (26). С. 44 - 45
5. Allen T. Ultrasonic water softener for pie cleaning. URL: [www.processingtalk.com](http://www.processingtalk.com)
6. Шестаков С.Д. О распределении плотности потенциальной энергии многопузырьковой кавитации относительно порождающей ее гармонической волны. Труды XVI сессии Российского акустического общества, Т.1. – М.: ГЕОС, 2005.
7. Rogov I.A., Shestakov S.D. «Надтепловое» изменение термодинамического равновесия воды и водных растворов: заблуждения и реальность (часть 1). Хранение и переработка сельхозсырья. 2004. №6. С. 39-44
8. Долинский А.А., Б.И. Басок Б.И., Гулый И.С., Накорчевский А.И., Шурчкова Ю.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в технологиях. – К.: ИТТФ НАНУ, 1996. – 208 с.
9. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. – К.: Наукова думка, 2008. – 381 с.
10. Долинский А.А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий. Инженерно-физический журнал. 1996. Т. 69, №6. С. 35 - 43.
11. Накорчевский А.И., Басок Б.И., Рыжкова Т.С. Гидродинамика роторно-пульсационных аппаратов. Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75, №2. С. 58-68.
12. Долинский А.А., Ободович А.Н., Борхаленко Ю.А. Метод дискретно-импульсного ввода энергии и его реализация: Монография. – Х.: Віровець АП “Апостроф”, 2012. – 185 с.
13. Oleksandr M. Obodovych, Bogdan Ya. Tselen, Vitalii V. Sydorenko, Heorhii K. Ivanytskyi, Natalia L. Radchenko Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. 2022. Acta Periodica Technologica. Issue.53 P.123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
14. Патент RU 2522602. МПК C02F 5/02 (2006.01) C02F 1/66(2006.01). Способ умягчения воды/ В.И. Косинцев, Н.В. Маланова, А.И. Сечин С.П. Журавков, Н.А. Яворовский

**METHOD OF REDUCING WATER HARDNESS  
SALTS AND HEAT AND MASS EXCHANGE  
EQUIPMENT FOR ITS IMPLEMENTATION**

**Obodovych O.M.<sup>1</sup>, Sydorenko V.V.<sup>2</sup>, Tselen B.Y.<sup>3</sup>,  
Rezakova T.A.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Dr. Sci. (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/https://orcid.org/0000-0001-7213-3118, e-mail: tdsittf@ukr.net*

<sup>2</sup>*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/https://orcid.org/0000-0001-7735-7719, e-mail: vrangel08@i.ua*

<sup>3</sup>*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/https://orcid.org/0000-0001-5213-0219, e-mail: b0d@ukr.net*

<sup>4</sup>*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: rezakova\_itf@ukr.net*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.10>

Thousands of steam and water boilers of medium and low parameters operate in the country's industry, municipal energy, and agriculture. Their reliable work is largely determined by maintaining a rational water-chemical regime. Dissolved impurities that affect the operation of boiler equipment primarily include hardness salts. When using hard water, scale is formed on the surfaces, heat transfer deteriorates, and pipes are overheated from the heating side, which can lead to their destruction.

The purpose of the work is to improve the quality of softened water, reduce the consumption of reagents, and accelerate the softening process due to the use of heat and mass exchange equipment.

In the work, water desalination was carried out by the method of discrete-pulse energy input in a rotor-pulsation apparatus. Ammonia was used as a reagent for removing hardness salts. The water-ammonia mixture is processed in the rotor-pulsation apparatus at a flow pulsation frequency of 3-5 kHz and a pressure drop amplitude of 360-400 kPa until the temperature rises to 40°C. The increase in temperature occurs due to the transition of mechanical energy into thermal energy.

It was determined that the degree of softening of water is 99% at a mass concentration of ammonia of 0.022%, and the amplitude of the pressure drop is 400 kPa. As the amplitude of the pressure drop decreases to 380 and 360 kPa, the degree of water softening decreases to 90 and 95%, respectively. It is also determined that water desalination using the rotor-pulsation apparatus should be carried out in the mode of recirculation of ammonia solution with a concentration of 0.022%, with a flow pulsation frequency of 4 kHz and a pressure drop amplitude of 400 kPa. As a result of the work, the optimal technological parameters of water treatment were determined and the efficiency of its purification using the proposed equipment was proved in comparison with the conventional one.

References 14, tables 1, figures 5

**Key words:** boilers, water treatment, softening, ammonia, impulse, equipment.

1. *Patent US 10427956B2 C02F1/36* Ultrasound and acoustophoresis for water purification/Jason Dionne, Bart Lipkens, Edward Rietman

2. *Bergman L.* Ultrazvuk i ego primenenie v nauke i tehnikе [Ultrasound and its application in science and technology]. – M.: Izdatelstvo Inostrannoy literatury, 1996.– 726 p. (in Rus.)

3. *Novik A.A.* Ultrazvukovyye ustanovki dlya borby s otlozheniem nakipi [Ultrasonic units for scale control]. URL: [www.utinlab.ru](http://www.utinlab.ru) (in Rus.)

4. *Nikolaevskiy N.N.* Ultrazvukovoy metod predotvrascheniya nakipeobrazovaniya [Ultrasonic scale prevention method]. [Heat supply news]. 2002, No. 10 (26). P. 44 – 45. (in Rus.)

5. *Allen T.* Ultrasonic water softener for pie cleaning. URL: [www.processingtalk.com](http://www.processingtalk.com)

6. *Shestakov S.D.* O raspredelenii plotnosti potentsialnoy energii mnogopuzyrkovoy kavitatsii otnositelno porozhdayuschey ee garmonicheskoy volni. Trudy XVI sessii Rossiyskogo akusticheskogo obschestva [On the distribution of the potential energy density of multi-bubble cavitation with respect to the harmonic wave that generates it. Proceedings of the XVI session of the Russian Acoustic Society], Vol.1. – M.: GEOS, 2005. (in Rus.)

7. *Rogov I.A., Shestakov S.D.* «Nadteplovoye» izmenenie termodinamicheskogo ravnovesiya vody i vodnyih rastvorov: zabluzhdeniya i realnost (part 1) [«Suprathermal» change in the thermodynamic equilibrium of water and aqueous solutions: delusions and reality (part 1)]. [Storage and processing of agricultural raw materials]. 2004. №6. P. 39-44. (in Rus.)

8. Dolinsky A.A., B.I. Basok B.I., Gulyiy I.S., Nakorchevsky A.I. Diskretno-impulsnyiy vvod energii v tehnologiyah [Discrete-pulse input of energy in technologies]. – K.: ITTF NANU , 1996. – 208 p. (in Rus.)
9. Dolinsky A.A., Ivanitsky G.K. Teplomassoobmen i gidrodinamika v parozhidkostnyih dispersnyih sredah Teplofizicheskie osnovy diskretno-impulsnogo vvoda energii [Heat and mass transfer and hydrodynamics in vapor-liquid dispersed media Thermophysical foundations of discrete-pulse energy input]. – K.: Naukova dumka, 2008. – 381 p. (in Rus.)
10. Dolinsky A.A. Ispolzovanie printsipa diskretno-impulsnogo vvoda energii dlya sozdaniya effektivnyih energosberegayuschih tehnologiy [Using the principle of discrete-pulse energy input to create efficient energy-saving technologies]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1996. T. 69, №6. P. 35 - 43. (in Rus.)
11. Nakorchevsky A.I., Basok B.I., Ryizhkova T.S. Gidrodinamika rotorno-pulsatsionnyih apparatov [Hydrodynamics of rotor-pulsation apparatus]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2002. T. 75, №2. P. 58-68. (in Rus.)
12. Dolinsky A.A., Obodovich A.N., Borhalenko Yu.A. Metod diskretno-impulsnogo vvoda energii i ego realizatsiya: Monografiya [Method of discrete-pulse energy input and its implementation: Monograph]. – Kharkiv: VIrovetz AP “Apostrof”, 2012. – 185 p. (in Rus.)
13. Oleksandr M. Obodovych, Bogdan Ya. Tselen, Vitalii V. Sydorenko, Heorhii K. Ivanytskyi, Natalia L. Radchenko Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. 2022. Acta Periodica Technologica. Issue.53 P.123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
14. Patent RU 2522602. МПК C02F 5/02(2006.01) C02F 1/66(2006.01). Sposob umyagcheniya vodyi [Water softening method] / V.I. Kosintsev, N.V. Malanova, A.I. Sechin S.P. Zhuravkov, N.A. Yavorovskiy. (in Rus.)

Отримано 30.03.2023

Received 30.03.2023