

УДК 628.1

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВОДОПІДГОТОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Ободович О.М.¹, д.т.н., Целень Б.Я.² к.т.н., Саблій Л.А.³ д.т.н., Радченко Н.Л.⁴, к.т.н.,
Недбайло А.Є.⁵ к.т.н.

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, завідувач відділу тепломасообміну в дисперсних системах, д.т.н., проф., e-mail: tdsittf@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н., с.н.с., e-mail: ittf_tds@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

³Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» просп. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна, професор кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології, e-mail: larisasabliy@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4217-3535>

⁴Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н., с.н.с., e-mail: ittf_tds@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-5315-1609>

⁵Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н., e-mail: ittf_tds@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.8>

В статті представлено огляд сучасних технологій підготовки води для підприємств теплоенергетики. На основі проведеного аналізу запропоновано ряд установок, розроблених в ІТТФ НАН України, які є ефективними при підготовці води, зокрема для живлення котлоагрегатів. В основу їх роботи закладений принцип дискретно-імпульсного введення енергії, застосування якого дозволяє інтенсифікувати тепломасообмінні і хімічні реакції. Запропоноване обладнання відповідає критеріям ефективності, енергоощадності та екологічності, так як не вимагає застосування хімічних реагентів.

This article presents an overview of water treatment technologies for powering industrial enterprises. Based on the analyzed information proposed the equipment has developed at the Institute of Engineering Thermophysics of National academy of sciences of Ukraine, which is effective at the treatment of water for powering industrial enterprises. This equipment based on the principle of discrete-pulse energy input, which allows intensifying heat and mass transfer reactions, as well as chemical. Therefore, the proposed equipment corresponds to the criteria of energy efficiency and ecological safety.

Бібл. 15, рис. 3.

Ключові слова: водопідготовка, кавітація, дискретно-імпульсне введення енергії, теплоенергетика.

Постановка проблеми. Запорукою надійної і ефективної роботи обладнання підприємств теплоенергетики є використання сучасних підходів і технологій водопідготовки. Це пов'язане з тим, що галузь є одним з основних споживачів води. Обсяги її використання сягають 25% від загальних витрат води усіх промислових підприємств [1]. Для підприємств теплоенергетики якість води є надзвичайно важливою, так як вона присутня на всіх технологічних стадіях і може використовуватись для підживлення, продувки, промивання, підтримання концентрації хімічних речовин, конденсації відпрацьованої пари, як теплоносії тощо. Тому питання якості підготовки води стає одним з першочергових.

В рамках даної роботи увага зосереджена на підготовці води для підживлення систем водопоста-

чання підприємств теплоенергетики. Основною вимогою до такої води є її демінералізація та дегазація, так як вона не повинна містити солей жорсткості, заліза та розчинених газів, таких як кисень і діоксид вуглецю. Присутність будь-якого з цих компонентів може створювати негативний вплив. Так, наприклад, присутність солей жорсткості у воді може викликати відкладення осаду на поверхнях нагріву, зниження теплопередачі та підвищення енергоспоживання. Розчинений діоксид вуглецю утворює вугільну кислоту, яка знижує рН води, провокуючи початок корозійних процесів, які з часом призводять до руйнування поверхонь металу, зупинки обладнання та необхідності його ремонту. Присутність заліза може каталізувати корозійні процеси. Окиснене у воді залізо утворює осади, які можуть блокувати трубопроводи та фільтри, знижуючи ефективність облад-

нання і підвищуючи витрати на його обслуговування. Тому вибір обладнання на кожній стадії водопідготовки вимагає дотримання не лише базових нормативних вимог, але й врахування специфічних (рН, жорсткість, лужність, солевміст та ін.), які залежать від початкового складу води. Складність також полягає в економічному обґрунтуванні комбінованих систем очищення води, що дозволяють знизити витрати на їх використання без втрати якості підготовленої води. Іншою проблемою є довгострокова стабільність і ефективність застосовуваних технологій, оскільки в процесі експлуатації можуть виникати проблеми з забрудненням фільтрувальних елементів, зниженням їхньої пропускної здатності або високими витратами на утилізацію відходів. Крім огляду існуючих технологій, дана стаття ставить за мету аналіз їхніх недоліків та пропозицію щодо шляхів удосконалення процесів підготовки води з врахуванням новітніх розробок у цій галузі. Важливим аспектом є дослідження можливості інтеграції різних методів очищення для забезпечення максимального ефекту при мінімальних витратах.

Огляд технологій підготовки води для підживлення теплоенергетичного обладнання.

Технології вилучення заліза. Присутність у воді заліза є однією з найпоширеніших проблем у водопідготовці. Залізо може бути одночасно присутнім у воді в нерозчинному вигляді (елементарне) і в розчинному - у вигляді двовалентного (Fe^{2+}), тривалентного (Fe^{3+}) чи в складі органічних речовин. Тому для його ефективного вилучення використовують комбінації різних методів. Згідно даних [2], традиційною вважається комбінація технологій окислення (киснем повітря або аерацією, хлором, озоном, перекисом водню тощо) з наступним осадженням хімічними речовинами-коагулянтами та фільтрацією. Так під час аерації воду спочатку насичують киснем, що спричиняє окислення розчиненого двовалентного заліза (Fe^{2+}) до тривалентного (Fe^{3+}), після чого осаджують з подальшою фільтрацією утворених нерозчинних гідроксидів заліза. Однак, використання цих технологій пов'язане зі значною тривалістю через реакцію окислення та необхідністю резервуарів великих об'ємів. Для прискорення процесу вилучення заліза використовують спеціальні окиснювачі. Найбільш доступним на теперішній час є хлор, так як він не вимагає значних витрат та одночасно вирішує проблему знезараження води. Більш дорогим, але перспективним вважається використання озону. Проте складність обладнання та значні витрати електроенергії обмежують його широке впровадження. Досить поширеною є технологія каталітичного окислення з подаль-

шою фільтрацією. При цьому реакція окислення заліза відбувається на поверхні гранул фільтруючого матеріалу, що виступає каталізатором. Після окислення залізо осідає на поверхні гранул фільтруючого середовища і згодом вимивається при зворотному промиванні. Для інтенсифікації процесу у воду додають додатково різні хімічні окисники. Ефективним для вилучення заліза вважається також використання іонообмінних фільтрів на основі синтетичних смол для заміни іонів заліза на нешкідливі іони, зазвичай натрію. До того ж ці фільтри дозволяють видаляти інші небажані іони, такі як кальцій і магній. Вони не утворюють тверді відкладення, що спрощує обслуговування, однак потребують регулярної регенерації смол та можуть підвищувати вміст натрію у воді, що є обмежуючим фактором. Згідно [3], відомо про ефективність технології біологічного видалення заліза, яка передбачає залучення мікроорганізмів, котрі здатні окислювати залізо, перетворюючи його на нерозчинні форми, які потім видаляються фільтрацією. На думку авторів, перевагою є ефективність і екологічність технології, оскільки вона не потребує використання хімічних реагентів. Проте існує складність контролю за умовами для підтримки життєдіяльності мікроорганізмів, яка ускладнюється довго тривалістю процесу порівняно з хімічними методами. Високою ефективністю вирізняються мембранні технології, до яких відносять ультрафільтрацію та зворотний осмос. Вони застосовуються для видалення заліза з води та здатні видаляти колоїдні та органічно зв'язані форми. Проте їх основний недолік пов'язаний з необхідністю значних капіталовкладень та високим енергоспоживанням. Також існує потреба регулярного очищення та заміни мембран. Отже, вибір оптимальної технології видалення заліза залежить від його концентрації у воді, хімічного складу, обсягу споживання та економічних міркувань. Комбінація різних методів може забезпечити найкращі результати з урахуванням специфічних умов експлуатації.

Технології вилучення солей жорсткості. За даними [4], на сьогоднішній день іонообмінні технології є одними з найефективніших для зниження жорсткості води оскільки дозволяють видаляти до 99% іонів кальцію та магнію. Їх основне завдання полягає у заміні іонів кальцію та магнію на іони натрію. Це досягається за допомогою іонообмінних синтетичних смол. Однак, їх основними недоліками є необхідність застосування агресивних хімічних реагентів (сірчаної кислоти, вапна тощо), потреба у системній регенерації смол та утворення регенераційних розчинів, які негативно впливають на навколишнє середовище та

потребують нейтралізації. Крім того, виникає небезпека підвищеного вмісту натрію у воді, який є небезпечним для промислових процесів. До цього додається необхідність постійного контролю параметрів процесу та їх коригування. Останні дослідження та сучасні розробки спрямовані головним чином на удосконалення іонообмінних матеріалів та технологій для підвищення їх ефективності та зменшення екологічного впливу. Наприклад, використання цеолітових монолітів показало перспективні результати у підвищенні продуктивності процесу. На сьогодні іонообмінні технології є основним засобом зниження жорсткості води у теплоенергетиці, проте їх застосування потребує ще й врахування економічних та екологічних аспектів. Ефективним [4] вважається поєднання одно- або двоступеневої схеми зворотного осмосу з На-катіонуванням, що дозволяє досягти зниження жорсткості води, її лужності і загального солемісту. До екологічно безпечних відносяться баромембранні методи, які побудовані на пропусканні води під тиском через напівпроникні мембрани. На сьогодні до інноваційних економічно ефективних технологій відносять ультрафільтрацію, зворотноосмотичну демінералізацію, електродеіонізацію, технологію підготовки води, що включає попередню фільтрацію. Новизна останньої, за даними [5], полягає у використанні технології вихрового вакуумного сканера з щітковими форсунками для високоефективної очистки фільтруючого елемента. При цьому вирішується питання скорочення витрат води на промивання. Стадія ультрафільтрації використовується для вилучення колоїдних домішок, частинок органічних забруднень, бактерій і мікроорганізмів. Ультрафільтрація є аналогом коагуляції, проте позбавлена недоліків, властивих традиційним технологіям. Зокрема, немає необхідності контролю параметрів ведення процесу (рН, температури, часу) порівняно з освітлювачами, є можливість скорочення виробничих площ, простота експлуатації. Однак виникає потреба періодичного кислотного та лужного промивання модулів. Технологія електродеіонізації використовується для фінішної демінералізації води. Вона є аналогом фільтрів змішаної дії, однак регенерацію фільтрів проводять в процесі очищення за рахунок проходження через шар завантаження електричного струму.

Технології вилучення розчинених газів. Ефективне вилучення розчинених газів найчастіше потребує поєднання кількох методів залежно від умов експлуатації та економічної доцільності. Традиційною і ефективною вважається [6] технологія вилучення розчинених газів з води з використанням декарбонізаторів. Процес базується на вилученні розчиненого газу при його

контакті з повітрям. Однак, разом з цим, він є одним з найскладніших масообмінних процесів для підготовки води в теплоенергетиці, бо його перебіг пов'язаний зі значною кількістю взаємозалежних факторів, котрі здатні змінюватись в широкому діапазоні. Як, наприклад, залежність розчинності газу від температури, яка в процесі декарбонізації змінюється. Згідно даних [7] конструктивно декарбонізатори поділяють на протитечійні та прямоточні. Перші найчастіше є апаратами з насадкою, наприклад, з керамічними кільцями Рашига, при цьому потік повітря подається вентилятором знизу. Їх основним недоліком є великі габарити, складність в обслуговуванні та висока вартість. Як прямоточні декарбонізатори застосовують ежекційні апарати, зокрема, водоструминні ежектори і прямоточні розпилювальні тепломасообмінні апарати. Використання водоструминних ежекторів як декарбонізаторів обмежене початковою концентрацією газу (до 20 мг/кг). Відомі також багатоступеневі ежектори з коефіцієнтом ежекції від 20 до 30, принцип дії яких побудований на ежекції струмини води по мірі її руху від одного ступеня до іншого. Прямоточні розпилювальні тепломасообмінні апарати можуть бути в різному конструктивному виконанні, а коефіцієнт ежекції може досягати 1000. Можливість застосування модульного підходу дозволяє збільшити продуктивність до сотень м³/год, проте при цьому зростають габарити і маса. Загальним недоліком усіх типів декарбонізаторів є необхідність індивідуального розрахунку з врахуванням початкових умов внаслідок фактичної неповторюваності вихідних даних. Через ці недоліки їх використання намагаються уникати. Для видалення з води розчинених газів широкого розповсюдження набули технології деаерації. Серед найпростіших – технологія теплової деаерації, яка передбачає нагрівання води до температури кипіння під тиском, що знижує розчинність газів, після чого відбувається їх видалення. Цей процес ефективний, проте через високі енергетичні витрати та потребу у спеціальному обладнанні вимагає пошуку альтернативних шляхів дегазації. Технологія вакуумної деаерації теж вважається [8] ефективною, однак розрахована для роботи при низьких температурах та передбачає створення вакууму для зниження тиску в системі, що сприяє вивільненню розчинених газів. Метод ефективний для систем з невеликим обсягом води. Високу ефективність при низьких енергетичних витратах показали технології мембранної деаерації [9]. Однак на сьогодні проблемою залишається висока вартість обладнання та необхідність регулярного очищення мембран. Поєднання деаерації з хімічними методами дозволяє досягти більш ефектив-

ного зниження концентрації кисню і діоксиду вуглецю у воді. Ефективним реагентом є гідразин (N_2H_4), який реагує з киснем, утворюючи азот і воду, що запобігає корозії, проте він токсичний. Застосовується також сульфід натрію (Na_2SO_3), який утворює з ним нешкідливі сполуки, проте потребує точного дозування.

Сучасною альтернативою та ефективними методами фізичної дегазації вважаються [10] акустичні методи з використанням високочастотних ультразвукових генераторів. Їх перевага полягає у швидкому і ефективному вилученні з води розчинених газів. Процес відбувається внаслідок того, що значна частина розчиненого газу під впливом ультразвукових коливань переходить всередину бульбашок, які в подальшому зливаються і виходять з води через поверхню поділу фаз. Перевагою акустичних методів є можливість вилучення з води не лише діоксиду вуглецю та кисню, але й інших газів. Однак, в промислових умовах ці методи не знаходять широкого впровадження через значні питомі енергетичні витрати.

Протягом останніх років все більше уваги з боку науковців та спеціалістів [11-14] приділяється можливості і перевагам застосування гідродинамічної кавітації для дегазації води. Численні лабораторні та аналітичні дослідження і впровадження отриманих результатів у різних областях виробництва довели, що гідродинамічну кавітацію слід розглядати як вагому альтернативу акустичній кавітації як з погляду продуктивності, так і з погляду проблеми енергозбереження. Відомо, що для підвищення ефективності роботи деаераторів їх додатково обладнують кавітаційними пристроями. Найчастіше вони є соплами змінного діаметра і довжини. Внаслідок збільшення швидкості потік турбулізується, а при зниженні тиску утворюються кавітаційні парогазові бульбашки. Довжина кавітаційного пристрою залежить від умов забезпечення розвитку кавітаційних бульбашок. У пристрої потік перебуває у вигляді двофазної пароводяної суміші, яка на виході з нього, потрапляючи в деаератор, внаслідок перегріву закипає. В деаераторі за рахунок створюваного кавітаційним пристроєм ефекту дроблення потоку кавітаційними бульбашками забезпечується диспергування води і турбулізація потоку. Створювані за допомогою кавітаційного пристрою ефекти дозволяють інтенсифікувати процес та досягати більш глибокої деаерації води. Отже, їх використання є перспективним завдяки високій ефективності, екологічності та енергозбереженню. Крім цього, за даними досліджень Федоткіна І.М., Немчишина А.Ф., Комарова А.А., Вітенько Т.М., Sun H. [15-18], метод гідродинамічної

кавітації дозволяє створювати ефект знезараження води, впливати на структуру, активуючи її, та змінювати фізико-хімічні властивості. Одночасно з цим, важливим є вибір оптимальних режимів ведення процесу та конструктивне виконання кавітатора.

В ІТТФ НАН України в межах започаткованого напрямку дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) в гетерогенні середовища проводяться дослідження підготовки води для різних галузей, зокрема, теплоенергетики. В роботах [19] досліджено можливість підвищення ефективності видалення гідрокарбонату кальцію та зниження жорсткості води за допомогою дискретного імпульсного введення енергії. У дослідженнях [20] доведено ефективність вилучення заліза з води. У роботах [21-23] вивчено особливості перебігу процесу вилучення розчинених газів методом гідродинамічної кавітації не лише з води, але й з кислого конденсату продуктів згоряння природного газу. Особливість ведення процесу кавітаційної дегазації полягає у створенні умов для інтенсивного зростання парогазових бульбашок з наступним їх вилученням з рідини, уникаючи їхнього колапсу на другій стадії процесу кавітації.

В рамках продовження даного напрямку розроблено дослідну (рис. 1) та на її основі дослідно-промислово (рис. 2) аераційно-окиснювальні установки роторного типу (АОРТ) для вилучення з води заліза продуктивністю 20-40 м³/год [24]. Запропоноване обладнання є ефективним для очищення води не лише від іонів заліза, але й для вилучення марганцю, сірководню, діоксиду вуглецю, сульфатів і нітратів. За рахунок можливості регулювання гідродинамічних параметрів процесу та зміни конструктивних особливостей роторно-пульсаційного вузла аератора-окиснювача, можна регулювати динаміку і якість очищення води та коригувати її рН. Обладнання дозволяє інтенсифікувати швидкість тепломасообміну і хімічних реакцій у воді та водних системах на 25-30 %, скоротити тривалість перебігу процесів у 2-3 рази. Такий результат досягається за рахунок спеціальної конструкції робочого органу роторно-пульсаційного апарата (конструкція типу ротор-статор-ротор) та створюваних у ньому гідродинамічних ефектів. Під час обробки вода проходить крізь щільні отвори та зазори роторно-пульсаційного вузла і піддається дії ударних хвиль, міжфазної турбулентності, мікрокавітації, кумулятивних струменів, вихорів, що призводить до інтенсивного диспергування бульбашок повітря, значного збільшення сумарної поверхні контакту фаз та інтенсифікації процесів масо- і теплопереносу. Подібні ефекти, зазвичай, недосяжні при використанні традиційних методів при обробці дисперсних середо-

вищ навіть при значно вищому рівні питомих енерговитрат.

Пропонована дослідно-промислова установка АОРТ є найменш енергозатратним аераційним пристроєм, а її питомі енерговитрати на обробку 1 м³ води на 40 % нижчі, ніж для водоповітряного ежектора і в 2,5 рази нижчі, ніж для вентиляторної градирні. Це пояснюється більш високою швидкістю окиснення іонів Fe²⁺ в установці АОРТ, ніж в порівнюваних пристроях. Її безумовною перевагою є можливість зниження енерговитрат на 30-35 %, собівартості на 20-25 % та підвищення швидкості розчинення кисню в порівнянні з існуючими аераційними пристроями у 2-3 рази. Пропонована дослідно-промислова установка АОРТ пройшла успішні виробничі випробування. В перспективі планується її використання не лише для вилучення з

води заліза, але й для інтенсифікації процесів дегазації, розчинення, перемішування, нагрівання, диспергування, аерації тощо.

Для інтенсифікації вилучення розчинених газів з води і рідких середовищ, зокрема для вилучення вуглекислоти з водного конденсату (з метою його нейтралізації) розроблено дослідно-промислову установку нейтралізації конденсату (УНК) (рис.3) [23, 25]. Її принцип роботи базується на використанні сукупності гідродинамічних кавітаційних ефектів, створюваних за допомогою принципу ДІВЕ та реалізованих в роторно-пульсаційному апараті спеціальної конструкції. Особливість установки в тому, що роторно-пульсаційний апарат працює в контурі рециркуляції з вакуумною камерою дегазації. При цьому роторно-пульсаційний апарат з'єднаний безпосередньо з вакуумною камерою, в якій



Рис. 1. Дослідна установка АОРТ для вилучення з води заліза: 1 – реактор; 2 – роторно-пульсаційний апарат; 3 – триходовий кран; 4 – контур рециркуляції; 5 – фільтрувальна колона; 6 – розпилювальна головка; 7 – блок управління

Fig. 1. Installation AORT for removal of iron from water: 1 – reactor; 2 – rotary-pulsation apparatus; 3 – three-way crane; 4 – contour of recirculation; 5 – filtration column; 6 – spray head; 7 – control unit



Рис .2. Дослідно-промислова установка АОРТ продуктивністю 20-40 м3/год: 1 – АОРТ; 2 – блок управління; 3 – ємність подачі води на фільтр; 4 – фільтр; 5 – збірник готової продукції

Fig. 2. Pilot industrial installation AORT with a productivity of 20-40 m3/hour: 1 – AORT; 2 – control unit; 3 – water supply tank to the filter; 4 – filter; 5 – tank for finished products



Рис. 3. Дослідна установка нейтралізації конденсату продуктивністю до 450 м³/год
Fig. 3. Installation for neutralization of condensate with a productivity of up to 450 m³/h

за допомогою вакуумного насоса підтримується тиск нижчий за атмосферний з паралельним відведенням вилучених газів.

Комплексний вплив механізмів принципу ДІВЕ дозволяє знижувати поріг кавітації і створювати інтенсивний динамічний вплив на оброблювану рідину. Перевагою дослідно-промислової установки УНК є можливість швидкого і ефективного вилучення розчинених газів без застосування хімічних реагентів і досягнення при цьому ефекту знезараження води. Крім цього, існує можливість впливу на фізико-хімічні показники води, зокрема, електропровідність, окисно-відновний потенціал, водневий показник рН, органолептичні характеристики тощо. Запропоноване обладнання може застосовуватись на підприємствах теплоенергетики для зниження витрат на підготовку води для живлення обладнання та зменшення кількості стічних вод, які можуть потрапляти в навколишнє середовище.

Висновки. Водопідготовка для підживлення обладнання підприємств теплоенергетики є важливим та необхідним фактором. Вибір комплексу енергоефективних методів очищення води і раціональних режимів залежить від її початкового складу (джерела надходження), типу підприємства, обладнання, яке на ньому функціонує, потужності та рівня експлуатації. У роботі наведено критерії оцінювання якості води для теплоенергетичних підприємств та характерні забруднювачі. Представлено класифікацію традиційних і інноваційних технологій і методів підготовки води для підживлення підприємств теплоенергетики. Запропоновано нове енергоефективне обладнання, за допомогою якого можна очищати воду від солей жорсткості, заліза та розчинених газів до їх гранично допустимих концентрацій та нижче

ЛІТЕРАТУРА:

1. Т. С. Айрапетян, І. М. Чуб (2024). Водопідготовка на підприємствах теплоенергетики з використанням Накаціонітових фільтрів: Монографія, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. 151 с.
2. *Iron removal the natural states of iron* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/drinking-water-treatment/specifics-water-treatment/Iron-removal> . Дата звернення 15.01.2025 р.
3. Tekerlekopoulou A., Vasiliadou I., Vayenas D. Biological manganese removal from potable water using trickling filter. *Biochemical Engineering Journal*. 2008. Vol. 38. P. 292-301. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.07.016>
4. *Veolia Chapter 08- Ion Exchange, Water Demineralization & Resin Testing* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.watertechnologies.com/handbook/chapter-08-ion-exchange> . Дата звернення 06.01.2025 р.
5. *Сучасні технології підготовки води в енергетиці* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mtechnology.com.ua/suchasni-texnologii%dl%97-pidgotovki-vodi-v-energetici/> Дата звернення 08.01.2025 р.
6. *High Efficiency, Low Cost Decarbonator* [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://heilprocessequipment.com/products/decarbonator?utm_source=chatgpt.com . Дата звернення 10.01.2025 р.
7. Р.В. Пономаренко (2020). Науково-теоретичні основи зниження техногенного навантаження на системи водопостачання регіону з урахуванням основних принципів басейнового управління водними ресурсами: Монографія, Харків. Планета-Прінт. 112 с.

8. Harbold G., Park J. (2008). Single-stage vacuum deaeration technology for achieving low dissolved gas in process water [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://gastransfer.com/wp-content/uploads/2023/08/IWC2008.pdf>. Дата звернення 15.01.2025 р.
9. Петренко О., Луговський О. Огляд методів дегазації робочих тіл. Mechanics and advanced technologies. 2023. №7.3 (99). С.301-308 <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.3.290444>
10. Ivanitsky G., Tselen B., Nedbailo A., Radchenko N., Gozhenko L. Some problems of modeling the liquid cavitation degassing. I. Acoustic cavitation. Physics of aerodisperse systems. 2023. № 61. С.227-240 <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.292236>
11. Sun X, Xuan X, Song W, Jia X, Ji L, Zhao S, et al. Experimental and numerical studies of cavitation in an advanced rotary hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. Ultrasonics Sonochemistry. 2021. 70, 105311 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105311>
12. Dutta N., Kopparthi P., Mukherjee A., Nirmalkar N., Boczkaj G. Novel strategies to enhance hydrodynamic cavitation in a circular venturi using RANS numerical simulations. Water Research. 2021. 204, 117559 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117559>
13. Гоженко Л., Іваницький Г., Лимарь А., Ободович А., Радченко Н., Сидоренко В., Целень Б. Дискретно-імпульсне введення енергії в технологіях підготовки води. Scientific Environment of Modern Human. 2021. 1 (sua19-01), 47–62. <https://doi.org/10.30888/2663-5569.2021-19-01-008>
14. J. Haque Chaudhuri, D. Chatterjee. Modelling of chemical kinetics in the presence of hydrodynamic cavitation for wastewater treatment applications. Chemical Engineering Science. 2024. 295. 2024, 120167 <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120167>
15. Cerecedo L., Dopazo S, Gomez-Luz R. Water. Disinfection by hydrodynamic cavitation in a rotor-stator device. Ultrasound technology. 2018. 48, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.015>
16. Вітенько Т., Гащин О. Гідродинамічна кавітація як один із способів активації рідких середовищ. Наукові праці ОНАХТ. 2006. № 28. Т.2, С.20-23
17. Sun, H., Jia, H., Liu, J., Wang, G., Zhao, S., Zi, L. et al. Investigation on the characteristics of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. Cleaning technology Sep. 2020. 251(15), 117252. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117252>
18. Целень Б., Ободович О., Недбайло А., Гоженко Л., Радченко Н. Оптимізація процесу водопідготовки для відновлення соків за допомогою гідродинамічної кавітації. Продовольчі ресурси. 2024. Т. 12. №23 С. 189-198 DOI: <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-22>
19. Obodovych O., Sablii G., Tselen B., Sydorenko V. Improving the efficiency of calcium hydrocarbonate removal and reducing water hardness through discrete pulse energy input. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. 4/6 (124), PP. 28-34 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286005>
20. Ободович О., Сидоренко В., Целень Б., Шейко Т. Аераційно-окислювальне обладнання для підготовки питної і технологічної води. Продовольчі ресурси. 2023. 11(21), С. 122–132. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-12>
21. Tselen B., Ivanytskyi G., Obodovych O., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N. Discrete-pulsed energy input based method for neutralisation of the acidic condensate. Rocznik Ochrona Środowiska. 2023. Vol. 25, PP. 215-221 <https://doi.org/10.54740/ros.2023.021>
22. Obodovych O., Tselen B., Sydorenko V., Ivanytskyi G., Radchenko N. Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers Acta Periodica Technologica. 2022. 53, С. 123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
23. Долінський А., Целень Б., Іваницький Г., Коник А., Радченко Н., Гартвіг А. Застосування способу дискретно-імпульсного введення енергії для нейтралізації конденсату продуктів згоряння природного газу Наукові праці. 2017. 81(1), С. 9-14 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.663>
24. Ободович О., Сидоренко В., Булій Ю., Степанова О. Очищення стічних вод теплових електростанцій (ТЕС). Теплофізика і теплоенергетика 2023. 45 (2), С. 69-76. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.8>
25. Долінський А., Коник А., Радченко Н., Целень Б., Гоженко Л. Перспективність та напрямок розвитку апаратів принцип роботи яких ґрунтується на механізмах дискретно-імпульсного введення енергії. Теплофізика і теплоенергетика. (2017). 39 (5), С.7-11. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.01>

MODERN WATER TREATMENT TECHNOLOGIES FOR THERMAL POWER ENGINEERING

Obodovych O.¹, Tselen B.2, Sabliy L.³, Radchenko N.⁴, Nedbailo A.⁵

¹*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Dr of Sc., Engineering, Head of Department, <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>*

²*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, Leading researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>*

³*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Beresteiskyi ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056, Dr of Sc., Engineering, Professor of the Department of Bioenergy, Bioinformatics and Ecobiotechnology, <https://orcid.org/0000-0003-4217-3535>*

⁴*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, Senior researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5315-1609>*

⁵*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, Senior researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.8>

This article presents an overview of new technologies water treatment for powering industrial enterprises. The main requirement is the absence of hardness salts, iron and dissolved gases. These criteria used for analyze the advantages and disadvantages of traditional and innovative technologies. Among them, membrane technologies compared and evaluated, which include ultrafiltration, reverse osmosis, and ion exchange. In addition, baromembrane methods, electrodeionization, water treatment technology, including prefiltration and, as a significant alternative, acoustic methods using high-frequency ultrasonic generators and hydrodynamic cavitation are considered. Technologies that involving using of various chemical reagents also reviewed. On its basis, using complex processing with involvement of innovative approaches were priority. In this area, we propose devices created at the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, which is effective at the treatment of water for powering industrial enterprises. This equipment has based on the principle of discrete-pulse energy input. Its implementation in the proposed equipment

allows intensifying heat and mass transfer reactions, as well as chemical. In particular, using of aeration and oxidation equipment rotor type with a productivity of 20-40 m³/hour compared to other devices allows reducing energy consumption by 15-20 times and intensify the process of preparing water. Additionally, installation for neutralization of condensate with a productivity of up to 450 m³/h, consumes no more than 3.75 kWh of electricity. At the same time almost complete removal dissolved gases from water occurs during the first two minutes of processing. Therefore, the proposed equipment is efficient, energy saving and ecological safety for use in water treatment technologies for powering industrial enterprises.

References 15, figures 3.

Key words: water treatment, hydrodynamic cavitation, discrete-pulse energy input, thermal power engineering.

1. T. S. Airapetian, I. M. Chub (2024). Vodopidhotovka na pidpriemstvakh teploenerhetyky z vykorystanniam Na-kationitovykh filtriv [Water treatment at thermal power companies using Na-cationic filters]. Monohrafiia, Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova. 151p. (in Ukr.)

2. Iron removal the natural states of iron [Electronic resource]. Access mode: <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/drinking-water-treatment/specifics-water-treatment/Iron-removal>

3. Tekerlekopoulou A., Vasiliadou I., Vayenas D. Biological manganese removal from potable water using trickling filter. Biochemical Engineering Journal. 2008. Vol. 38. pp.292-301. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.07.016>

4. Veolia Chapter 08- Ion Exchange, Water Demineralization & Resin Testing [Electronic resource]. Access mode: <https://www.watertechnologies.com/handbook/chapter-08-ion-exchange>

5. Suchasni tekhnologii pidhotovky vody v enerhetytsi [Advanced water treatment technologies in the energy sector] [Electronic resource]. Access mode: <https://mtechnology.com.ua/suchasni-tekhnologi%dl%97-pidgotovki-vodi-v-energetici/> (in Ukr.)

6. High Efficiency, Low Cost Decarbonator [Electronic resource]. Access mode: https://heilprocessequipment.com/products/decarbonator?utm_source=chatgpt.com

7. R.V. Ponomarenko (2020). Naukovo-teoretychni osnovy znyzhennia tekhnohennoho navantazhennia na systemy vodopostachannia rehionu z urakhuvanniam osnovnykh pryntsyviv baseinovoho upravlinnia vodnymi resursamy [Scientific and theoretical foundations for reducing the anthropogenic load on the region's water supply systems, taking into account the basic principles of basin water management]. Monohrafiia, Kharkiv. Planeta-Print. 112p. (in Ukr.)

8. Harbold G., Park J. (2008). Single-stage vacuum deaeration technology for achieving low dissolved gas in process water [Electronic resource]. Access mode: <https://gastransfer.com/wp-content/uploads/2023/08/IWC2008.pdf>

9. Petrenko O., Luhovskyi O. Ohliad metodiv deghazatsii robochykh til [Overview of methods for degassing process liquids]. *Mechanics and advanced technologies*. 2023. No.7.3 (99). pp.301-308 <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.3.290444> (in Ukr.)
10. Ivanitsky G., Tselen B., Nedbailo A., Radchenko N., Gozhenko L. Some problems of modeling the liquid cavitation degassing. I. Acoustic cavitation. *Physics of aerodisperse systems*. 2023. No. 61. pp.227-240 <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2023.61.292236>
11. Sun X, Xuan X, Song W, Jia X, Ji L, Zhao S, et al. Experimental and numerical studies of cavitation in an advanced rotary hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. 70, 105311 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105311>
12. Dutta N., Kopparthi P., Mukherjee A., Nirmalkar N., Boczkaj G. Novel strategies to enhance hydrodynamic cavitation in a circular venturi using RANS numerical simulations. *Water Research*. 2021. 204, 117559 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117559>
13. Hozhenko L., Yvanytskyi H., Lyamar A., Obodovych A., Radchenko N., Sydorenko V., Tselen B. Dyskretno-impulsne vvedennia enerhii v tekhnolohiiakh pidhotovky vody [Discrete-pulse energy input in water treatment technologies] *Scientific Environment of Modern Human*. 2021. 1 (sua19-01), pp.47–62. <https://doi.org/10.30888/2663-5569.2021-19-01-008> (in Ukr.)
14. J. Haque Chaudhuri, D. Chatterjee. Modelling of chemical kinetics in the presence of hydrodynamic cavitation for wastewater treatment applications. *Chemical Engineering Science*. 2024. 295. 2024, 120167 <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120167>
15. Cerecedo L., Dopazo S, Gomez-Luz R. Water. Disinfection by hydrodynamic cavitation in a rotor-stator device. *Ultrasound technology*. 2018. 48, pp.71–78. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.015>
16. Vitenko T., Hashchyn O. Hidrodynamichna kavitatsiia yak odyin iz sposobiv aktyvatsii ridkykh seredovyskh [Hydrodynamic cavitation as a method of activating liquids]. *Naukovi pratsi ONAKhT*. 2006. № 28. Vol.2, pp.20-23 (in Ukr.)
17. Sun, H., Jia, H., Liu, J., Wang, G., Zhao, S., Zi, L. et al. Investigation on the characteristics of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor for water treatment. *Cleaning technology Sep*. 2020. 251(15), 117252. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117252>
18. Tselen B., Obodovych O., Nedbailo A., Hozhenko L., Radchenko N. Optymizatsiia protsesu vodopidhotovky dlia vidnovlennia sokiv za dopomohoiu hidrodynamichnoi kavitatsii [Optimisation of the water treatment process for juice recovery using hydrodynamic cavitation] *Prodovolchi resursy*. 2024. Vol. 12. №23, pp.189-198 DOI: <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-22> (in Ukr.)
19. Obodovych O., Sablii G., Tselen B., Sydorenko V. Improving the efficiency of calcium hydrocarbonate removal and reducing water hardness through discrete pulse energy input. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. No. 4/6 (124), pp.28-34 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286005>
20. Obodovych O., Sydorenko V., Tselen B., Sheiko T. Aeratsiino-okysliuvalne obladnannia dlia pidhotovky pytnoi i tekhnolohichnoi vody [Aeration and oxidation equipment for the preparation of drinking and process water]. *Prodovolchi resursy*. 2023. 11(21), pp.122–132. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-12> (in Ukr.)
21. Tselen B., Ivanytskyi G., Obodovych O., Nedbailo A., Gozhenko L., Radchenko N. Discrete-pulsed energy input based method for neutralisation of the acidic condensate. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. Vol. 25, pp.215-221 <https://doi.org/10.54740/ros.2023.021>
22. Obodovych O., Tselen B., Sydorenko V., Ivanytskyi G., Radchenko N. Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. *Acta Periodica Technologica*. 2022. 53, pp.123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
23. Dolinskyi A., Tselen B., Ivanytskyi H., Konyk A., Radchenko N., Hartvih A. Zastosuvannia sposobu dyskretno-impulsnoho vvedennia enerhii dlia neutralizatsii kondensatu produktiv zghoriannia pryrodnoho hazu. *Naukovi pratsi [Application of the method of discrete-pulse energy input for neutralisation of condensate of natural gas combustion products]*. 2017. 81(1), pp.9-14 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.663> (in Ukr.)
24. Obodovych O., Sydorenko V., Bulii Yu., Stepanova O. Ochyshchennia stichnykh vod teplovykh elektrostantsii (TES). *Teplofizyka i teploenerhetyka [Treatment of wastewater from thermal power plants (TPPs)]*. 2023. 45 (2), pp.69-76. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.8> (in Ukr.)
25. Dolinskyi A., Konyk A., Radchenko N., Tselen B., Hozhenko L. Perspektyvnist ta napriamky rozvytku aparativ pryntsy roboty iakykh gruntuetsia na mekhanizmach dyskretno-impulsnoho vvedennia enerhii [Perspectiveness and development of apparatus the principle of work is based on the mechanisms of discrete-pulse energy input]. *Teplofizyka i teploenerhetyka*. (2017). 39 (5), pp.7-11. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.01>

Отримано 24.01.2025

Received 24.01.2025

Прийнято до друку 18.02.2025
Accepted for publication 18.02.2025