

УДК 66.069.84; 66.084; 628.316; 628.32

## ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ КИСЛОГО КОНДЕНСАТУ ДИМОВИХ ГАЗІВ. ПОПЕРЕДНЄ ОЧИЩЕННЯ, ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ТА ПОДАЛЬШЕ ВИКОРИСТАННЯ

Целень Б. Я.<sup>1</sup> к.т.н., Радченко Н. Л.<sup>2</sup> к.т.н., Іваницький Г. К.<sup>3</sup> д.т.н., Недбайло А. Є.<sup>4</sup> к.т.н.,  
Щепкін В. І.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Інститут 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: b0d@ukr.net, orcid.org/0000-0001-5213-0219

<sup>2</sup>Інститут 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, orcid.org/0000-0002-5315-1609

<sup>3</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, д.т.н., проф., Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", проспект Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: gersey4@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0486-2359

<sup>4</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах, к.т.н. e-mail: anna.nedbailo18@gmail.com, orcid.org/0000-0002-8590-5823

<sup>5</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, головний технолог відділу тепломасообміну в дисперсних системах, e-mail: ittf\_tds@ukr.net, orcid.org/0009-0000-5717-4835

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2025.9>

У статті розглянуто сучасні підходи до очищення кислого конденсату димових газів, що утворюється при роботі котелень на природному газі. Запропоновано комплексну технологію очищення, яка включає знезалізнєння, декарбонізацію та видалення оксидів азоту з подальшим доочищенням до рівня дистильованої води. Проведено експериментальні дослідження та підтверджено ефективність запропонованої схеми для повторного використання очищеного конденсату, зокрема як живильної води або для використання у водневих електролізерах.

The article examines modern approaches to the treatment of acidic condensate from flue gases produced during the operation of natural gas-fired boiler plants. A comprehensive purification technology has proposed, which includes iron removal, decarbonization, and the elimination of nitrogen oxides, followed by post-treatment to the level of distilled water. Experimental studies conducted and confirmed the effectiveness of the proposed scheme for the reuse of the treated condensate, particularly as feedwater or for use it in hydrogen electrolyzers.

Бібл. 14, рис. 6.

**Ключові слова:** кислий конденсат, гідродинамічна кавітація, декарбонізація, очищення, рН, знезалізнєння.

$\Psi$  – коефіцієнт очищення від домішок;

L – довжина фільтруючого шару, м;

H – напруженість магнітного поля, кА/м;

v – швидкість фільтрування, м/с;

$\tau$  – час обробки, хв;

C – концентрація, мг/кг;

НБ – нейтралізатор безреагентний.

**Вступ.** В останні роки відбувається активна модернізація обладнання на газових котельнях в Україні, особливо в рамках програм з підвищення енергоефективності та зменшення шкідливих викидів. Традиційні котли з ККД до 85% замінюють на нові конденсаційні, збільшуючи ККД до 95...98%, встановлюють сучасні пальники та системи автоматизації, системи безпеки. Кислий конденсат димових газів, отриманий на модернізованій котельні є досить чистою рідиною, подібною за показниками до дистилату з висо-

ким вмістом діоксиду вуглецю при використанні сучасного обладнання на енергетичних підприємствах.

Водночас багато котелень, в тому числі старих центральних, все ще працюють на застарілому обладнанні, яке вимагає модернізації, особливо в невеликих містах України. Це пов'язано з обмеженими інвестиціями в модернізацію та руйнуваннями, викликаними війною. Наприклад, в Миколаєві, Києві та Житомирі котельні та тепломережі значно постраждали від обстрілів, що ускладнює їх відновлення та модернізацію.

Згідно з даними Міністерства енергетики, на осінь 2023 року Україна потребувала близько 370 модульних котелень для відновлення теплопостачання, що свідчить про роль, яку відіграють застарілі системи [1].

Хоча природний газ вважається відносно чистим паливом, конденсат, отриманий після охолодження димових газів в результаті його згорання у випадках використання не модернізованого обладнання містить забруднюючі речовини, які можуть бути присутні в такому конденсаті, і включають діоксид вуглецю, оксиди азоту та оксиди заліза. Діоксид вуглецю ( $CO_2$ ) утворюється внаслідок повного згорання метану і у водному середовищі може утворювати вугільну кислоту ( $H_2CO_3$ ), що призводить до зміщення рН конденсату в сторону кислого середовища. Як правило, кислотність конденсату складає 4 од. рН, що обумовлено, в основному, наявністю вугільної кислоти. Утворення оксидів азоту  $NO_x$  пов'язане з високотемпературним згоранням природного газу і відбувається внаслідок реакції між молекулярним азотом ( $N_2$ ) і киснем ( $O_2$ ) повітря при температурі згорання вище 1200...1300 °C. Також надлишок кисню під час згорання природного газу може збільшувати утворення термічного  $NO_x$ , оскільки доступний більший об'єм кисню для реакцій. На виході з труби оксиди азоту на 85...90 % складаються з монооксиду азоту ( $NO$ ) і на 10...15 % з діоксиду азоту ( $NO_2$ ). В момент потрапляння в атмосферу відбувається швидке окислення  $NO$  в  $NO_2$ .

Наявність оксидів заліза в конденсаті обумовлена, в першу чергу, корозією поверхонь контактного обладнання (зокрема теплообмінників, димарів або котлів, якщо вони виготовлені з заліза або сталевих сплавів) при їх контакті з кислим конденсатом. Наявність вологи, кисню та кислот у конденсаті провокують утворення в ньому оксидів заліза у вигляді магнетиту  $Fe_3O_4$ , гематиту  $Fe_2O_3$ , гідроокисів  $Fe(OH)_3$  і  $Fe(OH)_2$ . Наразі існує багато різновидів методів очищення кислого конденсату від домішок сполук заліза, однак попереднє очищення димових газів від оксидів азоту перед їх потраплянням в утилізатори теплоти призводить до нижчого вмісту домішок заліза в кислому конденсаті через зниження його агресивної дії на поверхні обладнання з якими він контактує.

Також в конденсаті серед забруднювачів може міститись незначна кількість летких органічних сполук та твердих частинок. Однак, їх концентрації незначні, оскільки газ має високий ступінь очищення.

Використання якісного сучасного обладнання в котельнях та ТЕЦ дозволяє уникнути утворення окисів азоту та заліза, однак досить багато об'єктів тепло-

енергетичного сектору досі потребують модернізації, тому існує необхідність розроблення технології та обладнання для нейтралізації та очищення конденсату від забруднюючих речовин і доведення його за хімічними показниками до показників близьких до дистильованої води. Склад кислого конденсату щодо вмісту забруднюючих сполук свідчить про те, що його очищення потрібно здійснювати за трьома базовим напрямками: декарбонізація, очищення або недопущення утворення оксидів азоту і вилучення заліза.

Отже, метою нашого дослідження є розробка ефективної технології очищення конденсату, щоб зробити його придатним для подальшого використання як живильної води в котлоагрегатах або у водневих електролізерах. У зв'язку з цим, завданнями дослідження є розроблення режимів та підбір обладнання для очищення кислого конденсату від трьох основних забруднюючих компонентів та кінцеве доочищення до показників близьких до дистильованої води з метою подальшого його використання як живильної води в котлоагрегатах або використання для електролізерів.

Аналіз досліджень останніх років [2–4] показав можливість ефективного повторного застосування очищеного конденсату, зокрема, як води для живлення парових котлів, що дає змогу знизити витрату свіжої води та заощаджувати кошти на її підготовці. Окрім цього, очищений конденсат можна використати в технологічних процесах, наприклад, для промивання обладнання, зволоження, приготування розчинів, як резервне джерело води для протипожежних систем тощо. Є роботи [4], які свідчать про зростаючий інтерес до застосування конденсату наближеного після очищення за своїм складом до дистильованої води для обробки в електролізерах. Отриманий після електролізу водень можна використовувати для різних цілей, включаючи енергетичні або хімічні процеси чи використовувати як потенційне екологічно чисте паливо.

Використання очищеного конденсату для обробки в електролізері може стати ефективним способом вторинного використання ресурсів, підвищуючи загальну енергоефективність і знижуючи негативний екологічний вплив. Однак, для реалізації такого підходу потрібне ретельне опрацювання технічних та економічних аспектів, щоб забезпечити його практичну доцільність.

**Вилучення окисів заліза з кислого конденсату.** Очищення кислого конденсату від домішок заліза має забезпечувати максимальне видалення двох- та тривалентного заліза з розчину, щоб забезпечити відповідність отриманого конденсату згідно нормативних вимог до води для підживлення котлоагрегатів та води для використання в електролізерах.

Для очищення конденсату від заліза застосовують різноманітні фільтри, електромагнітні флокулятори, магнітні фільтри-сепаратори різної конструкції, які спрямовані на видалення заліза розчиненої і нерозчинної форми [5, 6].

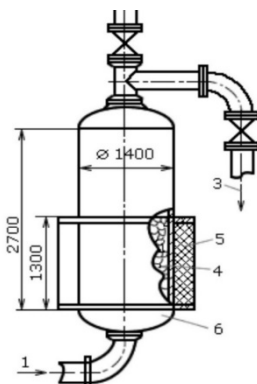
Проведений аналіз фільтраційних установок з фільтрами на основі сульфовугілля (для температури конденсату до 50 °С) або кополімеру стиролу і дивінілбензолу, а також магнітних фільтрів показав, що серед них найбільш універсальним (згідно температурних режимів, режимів тиску та початкової концентрації часток заліза в рідині) та ефективним є комбінація магнітного фільтра з подальшим використанням катіонної фільтрації.

Магнітні фільтри встановлюють перед катіонітними. Загальна схема апарата даного типу представлена на рис. 1 [7].

Відома також конструкція пристрою електромагнітного сепаратора продуктивністю 50 т/год з висотою заправки кульок в корпусі фільтра близько 1000 мм, навкруги корпусу розташовані п'ять мідних катушок з 2400 витками кожна. За даними тих самих джерел ефективним вважається електромагнітний фільтр (сепаратор) для видалення феромагнітних забруднень з рідинних середовищ продуктивністю від 100 до 1500 т/год, які можна експлуатувати при температурі до 350 °С і тиску до 40 МПа. Процес очищення кульок від затриманих ними продуктів корозії автоматично регулюється установленим у верхній частині корпусу фільтра індуктивним кульовим детектором. Очище-

ний конденсат протікає через фільтр знизу вверх. При накладанні магнітного поля всередині фільтра між кульками виникають високі градієнти напруження поля, в результаті чого феромагнітні забруднення, присутні в рідині, переміщуються в область максимальної напруженості – до магнітних полюсів кульок, де і відбувається їх відкладення. Швидкість фільтрування, відносно довільного перерізу фільтра, може змінюватись від 0 до 40 см/с без погіршення ефекту очищення. Економічно оптимальна швидкість фільтрування становить 30 см/с (1080 м/г), втрата напору незабрудненого фільтра становить 0,08-0,1 МПа, забрудненого – 0,1-0,12 МПа. Ємність кульок за продуктами корозії становить 2 г/кг. Відділені магнітні окиси заліза, мають велику активну поверхню, адсорбують частково як немагнітні окиси інших металів так і неметалеві забруднення.

Безумовна перевага електромагнітних фільтрів полягає у можливості їх практично не обмеженого застосування відносно значень тиску і температури, швидкості фільтрування, коефіцієнта очищення і діапазону дисперсності видалених оксидів заліза, яка вища, ніж у більшості фільтраційних методів (вилучаються частинки розміром 0,1-0,3 мкм). Залежно від початкової концентрації коефіцієнт очищення досягає 80-98 %. Крім цього, електромагнітні фільтри мають низьке споживання електроенергії, малі габарити та витрати води на регенерацію, а тому при розробленні технологічної схеми очищення конденсату до вимог електролізерів для видалення заліза прийнято рішення використати електромагнітний фільтр (рис. 1).



**Рис. 1. Схема електромагнітного фільтра: 1 – вхід конденсату; 2 – вихід конденсату; 3 – злив конденсату в дренаж при очищенні фільтра від затриманих продуктів корозії; 4 – сталеві кульки; 5 – електромагнітна катушка для створення магнітного поля; 6 – корпус фільтра з немагнітної сталі**

**Fig. 1. Scheme of the electromagnetic filter: 1 – condensate inlet; 2 – condensate outlet; 3 – condensate drainage into the drainage when cleaning the filter from retained corrosion products; 4 – steel balls; 5 – electromagnetic coil for creating a magnetic field; 6 – filter made of non-magnetic steel**



**Вилучення оксидів азоту.** Одними з забруднюючих речовин в кислому конденсаті є окиси азоту, які утворюються внаслідок високотемпературних процесів у факелі горіння та при окисленні азотовмісних сполук в самому паливі. На стадії отримання димових газів за допомогою методу селективного каталітичного відновлення можна запобігти потраплянню оксидів азоту, як в навколишнє середовище, так і в конденсат продуктів згорання природного газу. Метод ґрунтується на перетворенні  $NO_x$  на азот і воду шляхом реакції з аміаком ( $NH_3$ ) або сечовиною в присутності каталізатора. Процес селективного каталітичного відновлення, дозволяє перетворювати  $NO_x$  на нешкідливий азот і воду з ефективністю до 90-95 % при відповідних умовах. Це робить його одним з найефективніших способів зниження викидів оксидів азоту. Порівняно з іншими способами нейтралізації процес селективного каталітичного відновлення дозволяє уникнути утворення шкідливих побічних продуктів, які можуть виникати при взаємодії з іншими хімічними реагентами. Однак, впровадження такого методу призводить до високих капітальних витрат.

Для видалення оксидів азоту ( $NO_x$ ) з конденсату також можна використати намівні іонітові фільтри з використанням порошкових сумішей катіонітного і аніонітного типів. Ця технологія є більш ефективною при підвищенні температури конденсату, оскільки призводить до часткового руйнування гідратних оболонок і локалізації заряду іонів позитивно впливаючи на сорбцію гідратних оболонок на іонітах. Крім того, при підвищенні температури конденсату знижуються втрати напору в фільтрі. Негативними показниками застосування порошкоподібних фільтрів є їх висока собівартість, значні втрати часу на перезавантаження, високі витрати електроенергії та розчину для регенерації.

Для очищення конденсату від солей застосовують фізичні методи, які реалізуються переважно в апаратах мембранного типу [8]. Відомий мембранний апарат призначений для розділення, очищення і концентрування солей. Конструкція включає зворотно осмотичний апарат, насосну станцію, блоки для промивання і систему керування. Принцип роботи цього апарата ґрунтується на явищі зворотного осмосу з примусовим переходом рідини з низькою концентрацією розчинених солей під впливом гідростатичного тиску через мембранні елементи. До переваг мембранних технологій відносять їх простоту та компактність, а до недоліків – невисоку продуктивність та високу вартість мембран. Очищення багатокомпонентних сумішей рідин найчастіше вимагає комбінування цього методу з іншими методами очищення рідин від аміачної селітри.

Тому для очищення конденсату від оксидів азоту передбачається використання комплексного підходу, який включає на першій стадії обробку конденсату спочатку в установці нейтралізатора безреагентного (далі – НБ) розробленого в ІТТФ НАН України [2, 9, 10] одним з завдань якої є інтенсифікація перебігу хімічної реакції утворення аміачної селітри і забезпечення повноти хімічної реакції та на другій – видалення в мембранному апараті продуктів реакції – аміачної селітри разом з іншими залишками солей.

**Декарбонізація кислого конденсату.** Технології нейтралізації кислого конденсату димових газів базуються, зокрема, на використанні хімічних речовин для коригування величини рН середовища в лужний бік. Головним недоліком вищезгаданих способів є забрудненість нейтралізованого конденсату продуктами реакції нейтралізації і, в окремих випадках, їх висока вартість, яка може досягати 1 євро/Гкал [3].

Іншим методом нейтралізації кислого конденсату є використання масообмінних процесів в декарбонізаторах, де створюється велика поверхня контакту фаз між повітрям і конденсатом. На сьогодні застосування декарбонізаторів для нейтралізації кислого конденсату ускладнене через значні матеріальні та енергетичні витрати і не отримало широкого розповсюдження [11].

В ІТТФ НАН України було проведено ряд фундаментальних досліджень спрямованих на розроблення технології безреагентної нейтралізації конденсату димових газів після спалювання природного газу на теплоенергетичних підприємствах. Дані досліджень описані в ряді наукових праць [2, 9, 12, 13]. Ця технологія вирішує задачу різкого скидання тиску до значень, що достатні для активації та росту бульбашок, створення плівкової течії, а також подальшого виділення неконденсованих газів, що обумовлює ведення процесу при тисках в області тиску насиченої пари. Основним процесом технології є гідродинамічна кавітація, а точніше, перша стадія цього процесу, де відбувається активація зростання парогазових бульбашок та наступне їх вилучення з рідини у вакуумній камері установки НБ. Перевагами даної технології є легка інтеграція установки в технологічну схему котельні, екологічність процесу, так як вилучення діоксиду вуглецю не потребує застосування додаткових хімічних речовин, висока продуктивність обладнання та його енергоефективність. Застосування режимів ведення процесу при низьких тисках дає можливість видалення до 98 % розчинених газів [2]. Тому інтеграція технологій вилучення заліза, оксидів

азоту і безреагентної нейтралізації рідини в комплексну технологію очищення конденсату димових газів є перспективним та необхідним напрямком розвитку енергетичних технологій.

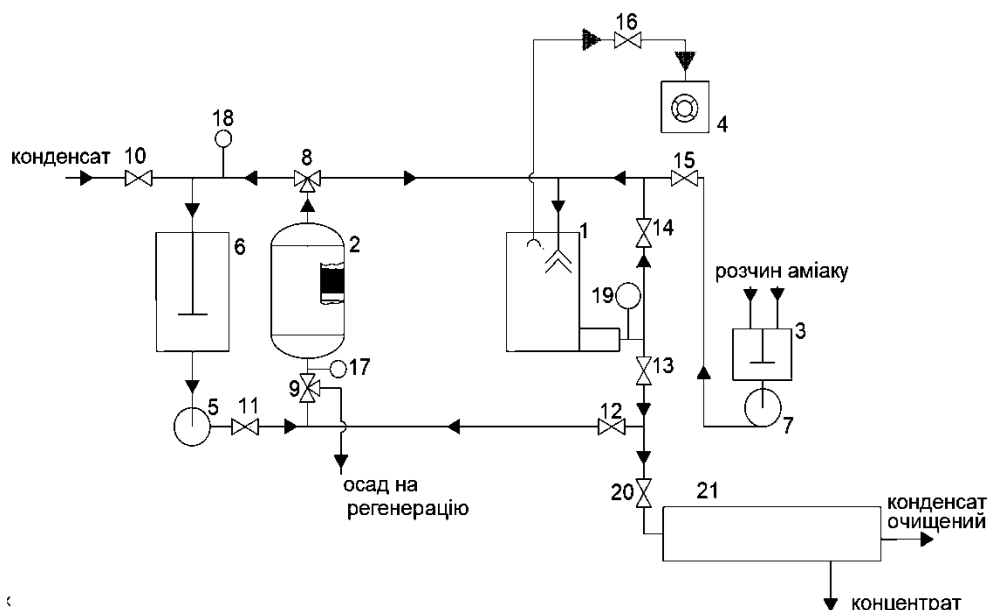
**Розроблення технологічної схеми очищення конденсату до вимог використання в електролізері.**

На основі проведеного аналізу технологій очищення конденсату запропоновано комплексну технологічну схему (рис. 1) направлену на три базові напрямки його очищення: декарбонізацію, вилучення заліза та оксидів азоту.

На першій стадії обробки накопичений у ємності 6 конденсат шляхом регулювання подачі клапаном 10 за допомогою циркуляційного насоса 5 надходить на першу стадію очищення – вилучення оксидів заліза. Процес вилучення оксидів заліза здійснюють в електромагнітному фільтрі 2, що представляє собою корпус, виконаний з аустенітної (немагнітної) сталі. Навколо корпусу по висоті засипки намагнічуваних кульок знаходяться електромагнітні котушки. Фільтрування проводиться знизу вгору зі швидкістю потоку рідини

$v = 500$  м/год. Намагнічувані кульки виготовлені зі спеціальної магнітної сталі діаметром  $D = 6$  мм.

Після вилучення оксидів заліза конденсат надходить на другу стадію очищення – вилучення діоксиду вуглецю. Процес перебігає при застосуванні режиму рециркуляції в контурі НБ – РПА 1, де РПА (роторно-пульсаційний апарат, далі – РПА), крім нейтралізації, одночасно забезпечує циркуляцію рідини у контурі протягом заданого часу обробки, а вакуумний насос 4 створює вакуум в робочій камері НБ та забезпечує вилучення надлишкових газів. Пристрій НБ 1 складається з ємності двокамерної для здійснення процесу вилучення  $CO_2$  з конденсату у вакуумну ємність, що поділена в середині перегородкою на дві рівні частини – камеру приймальну та камеру рециркуляційної обробки конденсату, що з'єднуються між собою щілинами перетікання над перегородкою і під нею. Камера рециркуляційної обробки з'єднана пристроями підведення і відведення конденсату з РПА. Пристрій відведення конденсату з РПА в камеру рециркуляції оснащений розпилювальним пристроєм. Ємність разом з РПА утворюють



**Рис. 2. Технологічна схема очищення конденсату до вимог використання в електролізері:**

**1 – нейтралізатор безреагентний (НБ); 2 – електромагнітний фільтр; 3 – пристрій подачі аміаку;**

**4 – насос вакуумний; 5 – насос циркуляційний; 6 – ємність накопичувальна; 7 – насос дозатор;**

**8, 9 – вентилі триходові; 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 – вентиль; 17, 18, 19 – мановакууметр**

**Fig.2. Technological scheme of condensate treatment to meet the requirements for use in an electrolyzer: 1 – non-reagent neutralizer (NR); 2 – electromagnetic filter; 3 – ammonia supply device; 4 – vacuum pump; 5 – circulation pump; 6 – storage tank; 7 – dosing pump; 8, 9 – three-way valves; 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 – valve; 17, 18, 19 – manovacuumeter**

рециркуляційний контур для обробки рідини впродовж заданого часу. РПА складається з проточної частини в яку входять ротор, статор та крильчатка.

Після завершення стадії вилучення діоксиду вуглецю в НБ дозовано надходить підготовлений розчин аміаку з ємності 3 насосом-дозатором 7 і в режимі рециркуляції в контурі НБ – РПА 1 відбувається обробка конденсату. Дозування аміаку в пропорції на 100 л рідини становить 0,25 кг аміаку. Пристрій подачі аміаку складається з ємності приготування аміачного розчину та насоса дозатора для його подачі в НБ для обробки в режимі рециркуляції та мембранного апарата 21 для видалення продуктів реакції після обробки в НБ.

В процесі обробки НБ інтенсифікує перебіг хімічної реакції утворення селітри забезпечуючи повноту хімічної реакції. По завершенні процесу обробки конденсат подається в мембранний апарат для видалення продуктів реакції – селітри разом з іншими залишками солей.

На базі цієї технологічної схеми було розроблено лабораторний стенд та проведені дослідження очищення конденсату.

**Методи досліджень.** Експериментальне дослідження перебігу процесу очищення конденсату проводили з метою приведення його фізико-хімічних показників згідно нормативних вимог для використання в електролізерах.

На першій стадії експерименту досліджували процес вилучення домішок оксидів заліза з конденсату. Для цього задіяно ємність накопичувальну 6, електромагнітний фільтр 2 та циркуляційний насос 5.

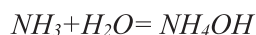
Обробка конденсату тривала 10 хвилин після чого проводили відбір проб. В зразках визначали коефіцієнт очищення від домішок ( $\psi$ ) з відбором проб на вході та на виході з установки залежно від параметрів фільтруючого шару (кульок) ( $L$ ), напруженості магнітного поля ( $H$ ), швидкості фільтрування ( $v$ ) і часу обробки ( $\tau$ ). Коефіцієнт очищення визначали за відносною зміною концентрації домішок оксидів заліза:

$$\psi = \frac{C_o - C}{C_o}$$

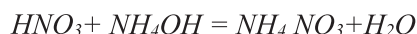
де  $C_o$  – концентрація домішок оксидів заліза на вході в установку;  $C$  – локальне значення концентрації домішок оксидів заліза, що відповідає певним значенням  $L$ ,  $H$ ,  $v$ ,  $\tau$ . Частку домішок оксидів заліза визначали шляхом циклічного фільтрування за методикою. Оцінювання показників видалення з конденсату металевих домішок здійснювали згідно ДСТУ 7262:2012 «Методи визна-

чення домішок заліза»; оксиду азоту і діоксиду вуглецю згідно ДСТУ ГОСТ 8.532-2003.

На другій стадії експерименту досліджували очищення конденсату від оксидів азоту ( $NO_x$ ). Для цього залучали в роботу установку НБ 1, пристрій подачі розчину аміаку 3, насос-дозатор 7 і мембранний пристрій. Для очищення конденсату від оксидів азоту в ємності 3 попередньо готували розчин води з аміаком в пропорції 0,25 кг аміаку на 100 л води для отримання солі амонію:



Для забезпечення повноти перебігу хімічної реакції компонентів використовували дослідну установку НБ, куди дозовано подавали підготовлений розчин. Для цього вмикали насос-дозатор 7, відкривали послідовно вентилі 15 і 14, вмикали НБ 1 і подавали конденсат на обробку протягом 10 хвилин. В результаті взаємодії нітратної (азотної) кислоти з розчином аміаку отримували аміачну селітру:



Розчин аміачної селітри  $NH_4NO_3$  в конденсаті проходив через мембранний пристрій 21. При цьому отримували насичену солями рідину, що не пройшла через мембранний пристрій і може бути утилізована для отримання добрива та очищений від надлишкових солей конденсат, який застосовується для подальшого використання. Після завершення обробки проводили відбір проб.

На третій стадії експерименту досліджували процес вилучення діоксиду вуглецю ( $CO_2$ ) з конденсату без застосування електромагнітного фільтра в схемі. Для цього на установці задіяно НБ 1 і насос вакуумний 4. В ході експерименту спочатку перекривали вентиль трьох ходовий 8 і вентиль 13 та відкривали вентиль 14 вмикаючи також електропривод НБ 1 та насос вакуумний 4. Після завершення процесу обробки, який тривав 10 хвилин проводили відбір проб для подальшого дослідження.

При виконанні експериментальних досліджень застосовані стандартизовані вимоги ДНАОП 0.00-1.08-94, ДСТУ ГОСТ 18.532:2003, ДСТУ ISO 3696:2003, СОУ-Н МПЕ 40.1.20.509:2005 і ДБН В.2.5-77:2014. Визначення розмірів дисперсних домішок в дослідних зразках проводили за допомогою лазерного аналізатора розміру частинок LA950. Контроль водневого показника рН проводили при використанні багатофункціонального приладу COnDO EZODO PCT-407. Результати експериментальних досліджень обробляли методами

математичної статистики. Збіжність результатів експерименту становила 0,90. Статичну обробку експериментальних даних проводили з застосуванням методів регресивного аналізу з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel.

#### Результати досліджень та їх обговорення.

Отримані результати експериментальних досліджень впливу довжини фільтруючого шару ( $L$ ), напруженості зовнішнього магнітного поля ( $H$ ), швидкості фільтрування ( $v$ ) та часу очищення конденсату ( $\tau$ ) в фільтруючому шарі на величину коефіцієнта очищення конденсату ( $\psi$ ) від металевих домішок, які пред-

ставлено на рис. 3 а-г. Кожна точка на графіку відповідає щонайменше 5-10 локальним концентраціям металевих домішок до і після очищення конденсату. Початкова кількість домішок оксидів заліза в конденсаті становила 1,89 мг/кг. Вміст вуглекислого газу в конденсаті становив 30...70 мг, а оксидів азоту – 3,20 мг/кг.

Результати дослідження показали, що зміна довжини фільтруючого шару  $L$  в межах 0,090...0,45 м дозволила досягти максимального значення коефіцієнта  $\psi = 0,45$  (рис. 3а). При зміні напруження магнітного поля  $H$  в межах 5...80 кА/м величина коефіцієнта  $\psi$  становила 0,42, а подальше збільшення  $H$  до 120 кА/м дозволило отримати  $\psi = 0,45$  (рис. 3б).

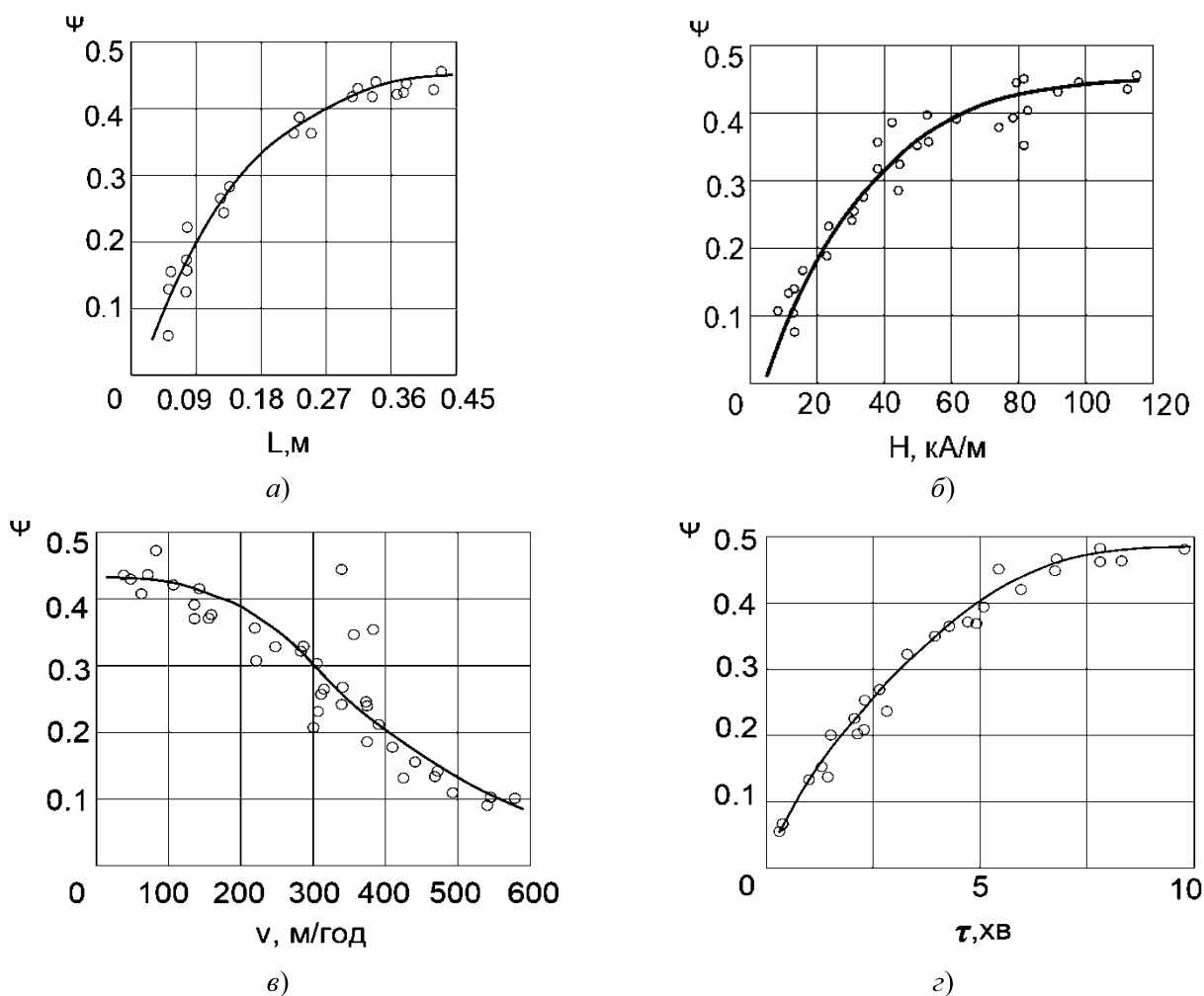


Рис. 3. Зміна коефіцієнта очищення конденсату ( $\psi$ ) від домішок оксидів заліза залежно від:

а – впливу довжини фільтруючого шару ( $L$ ); б – напруження магнітного поля ( $H$ );  
в – швидкості фільтрування ( $v$ ); г – часу очищення ( $\tau$ ) на коефіцієнт очищення конденсату в електромагнітному фільтрі ( $\psi$ )

Fig.3. Changes in the condensate purification factor ( $\psi$ ) from iron oxide impurities depending on:  
а – the effect of the length of the filter layer ( $L$ ); б – magnetic field strength ( $N$ ); в – filtering speed ( $v$ );  
д – purification time ( $\tau$ ) on the condensate purification factor in an electromagnetic filter ( $\psi$ )



Дослідження впливу швидкості фільтрування ( $v$ ) на коефіцієнт  $\psi$  показало, що при збільшенні швидкості в межах 100...250 м/год величина коефіцієнта  $\psi$  знижувалась в межах 0,43...0,35. Подальше зростання швидкості в межах 250...500 м/год показало зниження показника 0,35...0,13. Збільшення швидкості  $v$  понад 250 м/год привело до переходу течії конденсату з ламінарного режиму в турбулентний, що погіршує процес очищення рідини від металевих домішок.

Таку закономірність можна пояснити забрудненням фільтруючого шару металевими домішками та зниженням швидкості проходження конденсату через створюваний гідравлічний опір фільтруючого шару.

Результати вивчення закономірності впливу часу обробки  $\tau$  на величину коефіцієнта очищення  $\psi$  показали, що для діапазону  $\tau = 0...4$  хвилини обробки величина коефіцієнта  $\psi$  зростала досить стрімко до 0,35.

Подальше збільшення  $\tau$  до 10 хвилин призвело до менш суттєвого зростання коефіцієнта  $\psi$  – до 0,48.

На рис. 4 представлено характер зміни концентрації домішок оксидів заліза  $C$  в конденсаті при значеннях  $H = 120$  кА/м,  $v = 500$  м/год,  $\tau = 10$  хв. Результати досліджень показали, що при значеннях  $L$  в межах 0,09...0,27 м концентрація домішок оксидів заліза становила 1,03 мг/кг, а при  $L$  0,27...0,45 м – знизилась до 0,9 мг/кг, тобто в 2 рази.

Дослідження зміни концентрації оксидів азоту  $C_{NO_x}$  від тривалості обробки представлено на рис. 5. Встановлено, що протягом 6 хвилин обробки концентрація  $NO_x$  знизилась з 3,50 до 1,75 мл/кг. При досягненні 10 хвилин обробки концентрація зменшилась до 0,72 мл/кг.

На рис. 6 наведена залежність зміни  $pH$  кислого конденсату від тривалості його обробки на дослідному зразку нейтралізатора безреагентного (НБ).

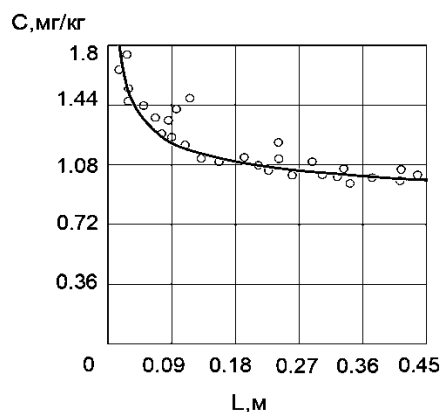


Рис. 4. Залежність концентрації домішок оксидів заліза в конденсаті від впливу фізичних величин  $H = 120$  кА/м,  $v = 500$  м/год,  $\tau = 10$  хв

Fig.4. Dependence of the concentration of iron oxide impurities in condensate on the influence of physical quantities  $H = 120$  kA/m,  $v = 500$  m/h,  $\tau = 10$  min

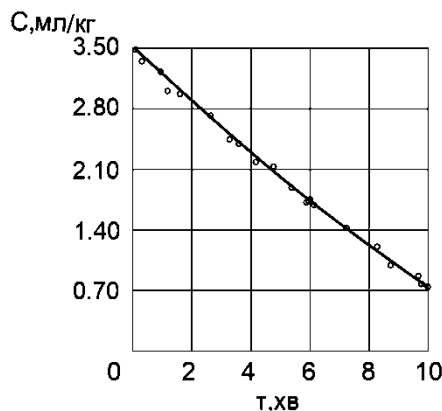


Рис. 5. Залежність зміни концентрації  $C$  оксиду азоту ( $NO_x$ ) в конденсаті від тривалості обробки  $\tau$

Fig.5. Dependence of the change in the concentration of nitrogen oxide ( $NO_x$ ) in the condensate on the treatment duration  $\tau$





**Рис.6. Залежність зміни pH кислого конденсату від тривалості його обробки в установці НБ**  
**Fig.6. Dependence of the change in pH of acid condensate on the duration of its treatment in the non-reagent neutralizer installation**

Отримане значення  $pH = 6,5$  вже через 2 хвилини обробки вказує на те, що після обробки отримуємо очищений конденсат з низьким вмістом розчиненого вуглекислого газу, що за фізико-хімічними показниками близький до дистильованої води.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень було розроблено та експериментально обґрунтовано ефективну технологію очищення кислого конденсату димових газів, що включає три ключові стадії: вилучення заліза, видалення оксидів азоту та декарбонізацію. Застосування електромагнітного фільтра показало високу ефективність вилучення оксидів заліза з конденсату при умовах оптимального поєднання параметрів фільтрації (коефіцієнта очищення  $\psi = 0,45$ ). Етап очищення від оксидів азоту з використанням аміачного розчину у поєднанні з мембранним апаратом забезпечив зниження вмісту залишкових сполук  $NO_x$  до допустимих рівнів. Процес безреагентної декарбонізації, реалізований у вакуумному рециркуляційному контурі з роторно-пульсаційним апаратом, продемонстрував здатність вилучати до 98 %  $CO_2$  без утворення сторонніх забруднюючих домішок.

Запропонована комплексна технологічна схема дозволяє довести хімічні показники очищеного конденсату до рівня, придатного для використання як живильної води у котлоагрегатах або у водневих електролізерах, що значно підвищує ефективність використання ресурсів та знижує екологічний вплив теплоенергетичних об'єктів. Зважаючи на зростаючу потребу у воді технічної якості в умовах обмежених ресурсів та пошкодженої інфраструктури, реалізація цієї технології є актуальною і перспективною для впровадження на енергетичних об'єктах України.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Чернишов О.: «В Україні розпочали роботу 99,7 % котелень» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.naftogaz.com/news/v-ukraini-rozpochaly-robotu-99-7-kotelen-oleksiy-chernyshov> Дата звернення 22.05.2025 р.
2. Obodovych O., Tselen B., Nedbailo A., Ivanytskyi G., Radchenko N., Hozhenko L. Comprehensive technology for utilization of acid condensate from flue gas after boiler units. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2024. 81(4). P. 124-133. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2024.10>
3. Підвищення ефективності конденсаційних утилізаторів і поводження з конденсатом. Програма ЄБРР та GEF “Україна: сталі інновації у ланцюжках створення вартості в біоенергетиці” Режим доступу: <https://saf.org.ua/news/1908/> Дата звернення 22.05.2025 р.
4. Grégory Cano, Philippe Moulin. Treatment of boiler condensate by ultrafiltration for reuse. *Membranes*. 2022. 12(12). P. 1285; <https://doi.org/10.3390/membranes12121285>
5. Тугай А.М., Орлов В.О. (2009). Водопостачання. Підручник, К., Знання. 735 с.
6. Н.М. Толстопадова, М.І. Літинська, Т.І. Обушенко, І.М. Астрелін, О.В. Сангінова (2020). Технологія та обладнання одержання питної та технічної води. Посібник Частина 2., К., КПІ ім. Ігоря Сікорського. 181 с. [https://tnr.kpi.ua/images/Navch\\_Metod\\_Dokum/Tehnologiya-ta-obladnannia-oderzhannia-pytnoyi-ta-tehnichnoyi-vody.-Praktykum-Chastyna-2.pdf](https://tnr.kpi.ua/images/Navch_Metod_Dokum/Tehnologiya-ta-obladnannia-oderzhannia-pytnoyi-ta-tehnichnoyi-vody.-Praktykum-Chastyna-2.pdf)
7. Схема електромагнітного фільтра [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/4520404/page:4/> Дата звернення 22.05.2025 р.

8. Мембранні процеси розділу [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://akvius.cv.ua/index.php/polezno-znat/23-membrannyye-protsessy-razdeleniya> Дата звернення 22.05.2025 р.
9. *Obodovych O.M., Tselen B. Ya, Sydorenko V.V., Ivanitsky G. K., Radchenko N. L.* Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. *Acta Periodica Technologica*. 2022. 53, P.123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
10. *Tselen B., Ivanitsky G., Obodovych O., Radchenko N., Nedbailo A., Gozhenko L.* Discrete-Pulsed Energy Input Based Method for Neutralisation of the Acidic Condensate. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. Vol. 25. P. 215–221. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.021>
11. *V.A. Kishnevskiy, V.V. Chichenin, I.D. Shulyak.* Application of decarbonifiers in the flowsheets of water treatment. *Праці одеського політехнічного університету*. 2011. 2(36). С.120-124 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://old-pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1324890568.pdf> Дата звернення 22.05.2025 р.
12. *Dolinskiy A.A., Tselen B.Ya., Ivanitskiy G.K., Konyk A.V., Radchenko N.L., Hartvih A.P.* Using of the energy discrete-pulse input method for the condensate natural gas combustion products neutralizing. *Scientific Works*, Vol. 81(1). P.9-14 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.663>
13. *S. Yarotskiy, B. Tselen* Using prospect method of discrete-pulse input of energy to neutralizing acidic aqueous solutions. *Industrial Heat Engineering*. 2015. Vol 37 (4): <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2015.03>
14. *Dolinskiy A.A., Tselen B.Ya., Hartvih A.P., Konyk A.V., Radchenko N.L., Shchepkin V.I.* The formation of acidic condensate during deep heat utilization from natural gas combustion products and the apparatus of its neutralizing *Scientific Works*. 2017. Volume 80(1). P.4-8 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i1.191>

# TECHNOLOGIES FOR UTILIZATION OF ACIDIC CONDENSATE FROM FLUE GASES. PRE-TREATMENT, DECARBONIZATION AND SUBSEQUENT USE

Tselen B. Ya.<sup>1</sup>, Radchenko N.L.<sup>2</sup>, Ivanytskyi G.K.<sup>3</sup>, Nedbailo A.E.<sup>4</sup>, Shchepkin V.I.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, leading researcher; orcid.org/0000-0001-5213-0219*

<sup>2</sup>*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, senior researcher; orcid.org/0000-0002-5315-1609*

<sup>3</sup>*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine, D.Sc., professor; Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, D.Sc., leading researcher; orcid.org/0000-0002-0486-2359*

<sup>4</sup>*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, PhD, Engineering, senior researcher; orcid.org/0000-0002-8590-5823*

<sup>5</sup>*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine, chief technologist; orcid.org/0009-0000-5717-4835*

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2025.9>

In recent years, Ukraine has actively modernized gas boiler equipment, particularly within programs aimed at increasing energy efficiency and reducing harmful emissions. Traditional boilers with an efficiency of up to 85 % are being replaced with modern condensing boilers with efficiencies of 95–98 %, along with advanced burners, automation, and safety systems. The acidic condensate of flue gases produced in modernized boilers is a relatively clean liquid, comparable in quality to distilled water but with a high content of carbon dioxide. However, many central and regional boiler houses, especially in smaller Ukrainian cities, still operate using outdated equipment due to limited investment and wartime destruction. For example, boiler systems in Mykolaiv, Kyiv, and Zhytomyr have been severely damaged by shelling, complicating their restoration and modernization.

According to the Ministry of Energy, as of autumn 2023, Ukraine required around 370 modular boiler houses

to restore heating services, highlighting the importance of replacing outdated systems. Although natural gas is considered a relatively clean fuel, the condensate resulting from its combustion using outdated equipment may still contain pollutants, including carbon dioxide ( $CO_2$ ), nitrogen oxides ( $NO_x$ ), and iron oxides.  $CO_2$  forms weak carbonic acid ( $H_2CO_3$ ) in aqueous environments, lowering the condensate's pH to about 4. Nitrogen oxides form at combustion temperatures above 1200–1300 °C, primarily as nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide ( $NO_2$ ), while iron oxides appear due to corrosion of steel components in the equipment.

Modern systems reduce or eliminate these pollutants, but many heat and power facilities still need modernization. Therefore, the development of technology and equipment for condensate purification is essential. This study focuses on creating a comprehensive purification system to remove three main contaminants – carbon dioxide, nitrogen oxides, and iron-containing. This allows the water quality to approach that of distilled water, making it suitable for using as feedwater for boilers or in electrolyzers.

The analyses show that purified condensate can be reused in boiler systems, for equipment rinsing, humidification, solution preparation, fire safety systems, and as a water source for hydrogen production through electrolysis. Efficient reuse of condensate increases overall energy efficiency and reduces environmental impact.

The study proposes a multi-stage treatment process: removal of iron oxides using an electromagnetic filter; decarbonization using a non-reagent neutralizer; and  $NO_x$  removal through ammonium nitrate formation followed by membrane separation. Experimental research on a lab-scale model confirmed the effectiveness of the proposed system. Statistical analysis and standard testing methods have been applied to validate results, confirming that the treated condensate meets quality standards for reuse in electrolysis and boiler applications.

References 14, figures 6.

**Key words:** acid condensate, hydrodynamic cavitation, decarbonization, purification, pH, iron removal.

1. Chernyshov O.: «V Ukraini rozpochaly robotu 99,7 % kotelen». [99.7% of boiler houses in Ukraine have started operating] [Electronic resource]. Access mode: <https://www.naftogaz.com/news/v-ukraini-rozpochaly-robotu-99-7-kotelen-oleksiy-chernyshov> (in Ukr.)

2. Obodovych O., Tselen B., Nedbailo A., Ivanytskyi G., Radchenko N., Hozhenko L. Comprehensive technology for utilization of acid condensate from flue gas after boiler units. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2024. 81(4). P. 124-133. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2024.10>

3. *Pidvyshchennia efektyvnosti kondensatsiinykh utylizatoriv i povodzhennia z kondensatom. Prohrama YeBRR ta GEF "Ukraina: stali innovatsii u lantsiuzhkakh stvorennia vartosti v bioenerhetytsi"* [Improving the efficiency of condensate heat recovery units and condensate management. EBRD and GEF Programme 'Ukraine: Sustainable Bioenergy Value Chain Innovations'] [Electronic resource]. Access mode: <https://saf.org.ua/news/1908/> (in Ukr.)
4. *Grégory Cano, Philippe Moulin*. Treatment of boiler condensate by ultrafiltration for reuse. *Membranes*. 2022. 12(12). P. 1285; <https://doi.org/10.3390/membranes12121285>
5. *Tuhai A.M., Orlov V.O.* (2009). *Vodopostachannia*. [Water supplies] Pidruchnyk, K., Znannia. 735 s. (in Ukr.)
6. *N.M. Tolstopalova, M.I. Litynska, T.I. Obushenko, I.M. Astrelin, O.V. Sanhinova* (2020). *Tekhnolohiia ta obladnannia oderzhannia pytnoi ta tekhnichnoi vody*. [Technology and equipment for producing drinking and process water]. Posibnyk Chastyna 2., K., KPI im. Ihoria Sikorskoho. 181 s. [https://tnr.kpi.ua/images/Navch\\_Metod\\_Dokum/Tekhnologiya-ta-obladnannia-oderzhannia-pytnoyi-ta-tehnichnoyi-vody.-Praktykum-Chastyna-2.pdf](https://tnr.kpi.ua/images/Navch_Metod_Dokum/Tekhnologiya-ta-obladnannia-oderzhannia-pytnoyi-ta-tehnichnoyi-vody.-Praktykum-Chastyna-2.pdf) (in Ukr.)
7. *Skhema elektromahnitnoho filtra* [Schematic of the electromagnetic filter]. [Electronic resource]. Access mode: <https://studfile.net/preview/4520404/page:4/> (in Rus.)
8. *Membranni protsesy rozdilu* [ Membrane separation processes] [Electronic resource]. Access mode: <https://akvius.cv.ua/index.php/polezno-znat/23-membrannye-protsessy-razdeleniya> (in Ukr.)
9. *Obodovych O.M., Tselen B. Ya, Sydorenko V.V., Ivanitsky G. K., Radchenko N. L.* Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. *Acta Periodica Technologica*. 2022. 53, P.123-130 <https://doi.org/10.2298/APT2253123O>
10. *Tselen B., Ivanitsky G., Obodovych O., Radchenko N., Nedbailo A., Gozhenko L.* Discrete-Pulsed Energy Input Based Method for Neutralisation of the Acidic Condensate. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. Vol. 25. P. 215–221. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.021>
11. *V.A. Kishnevskiy, V.V. Chichenin, I.D. Shulyak*. Application of decarbonifiers in the flowsheets of water treatment. *Pratsi odeskoho politekhnichnoho universytetu*. 2011. 2(36). P.120-124 [Electronic resource]. Access mode <https://old-pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1324890568.pdf>
12. *Dolinskiy A.A., Tselen B.Ya., Ivanitskiy G.K., Konyk A.V., Radchenko N.L., Hartvih A.P.* Using of the energy discrete-pulse input method for the condensate natural gas combustion products neutralizing. *Scientific Works*, Vol. 81(1). P.9-14 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v81i1.663>
13. *S. Yarotskiy, B. Tselen* Using prospect method of discrete-pulse input of energy to neutralizing acidic aqueous solutions. *Industrial Heat Engineering*. 2015. Vol 37 (4). P.23-30 <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2015.03>
14. *Dolinskiy A.A., Tselen B.Ya., Hartvih A.P., Konyk A.V., Radchenko N.L., Shchepkin V.I.* The formation of acidic condensate during deep heat utilization from natural gas combustion products and the apparatus of its neutralizing *Scientific Works*. 2017. Volume 80(1). P.4-8 <https://doi.org/10.15673/swonaft.v80i1.191>

Отримано 03.06.2025

Received 03.06.2025

Прийнято до друку 05.08.2025

Accepted for publication 05.08.2025