

А. Є. НЕДБАЙЛО, Г. К. ІВАНИЦЬКИЙ, Б. Я. ЦЕЛЕНЬ, Н. Л. РАДЧЕНКО, Л. П. ГОЖЕНКО

ВИКОРИСТАННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ КИСЛИХ СЕРЕДОВИЩ. ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ

В даній роботі надане порівняння різних методів нейтралізації кислих середовищ, визначені їхні переваги та недоліки. Метою даної роботи є визначення ефективності нейтралізації кислого конденсату методом гідродинамічної кавітації, для чого було проведено теоретичні та експериментальні дослідження. Нейтралізація кислих рідких середовищ запропонованим методом дозволяє суттєво зменшити вміст розчинених газів в рідині без додавання хімічних реагентів при помірній витраті енергії і призводить до зміни рН середовища в бік лужної межі. Зміна рН, що підтверджена експериментальними дослідженнями в першу чергу пов'язана з видаленням розчинного газу, який міститься у вигляді бульбашок розмірами до 5 мкм. Надано результати теоретичних досліджень обробки в роторно-пульсаційному апараті, визначено ряд технологічних параметрів, в тому числі тиски в каналі роторного апарату, встановлено потенційну можливість зростання мікробульбашок при заданому режимі обробки. Згідно отриманих теоретичних даних стосовно ведення процесу в запропонованих режимах оброблення встановлено можливість видалення бульбашок з граничним розміром розміром від 0,6 мкм та більше. Аналіз експериментальних даних показав, що основна частина розчинених газів може бути видаленою в перші хвилини обробки, що пов'язано з першочерговим видаленням бульбашок найбільших розмірів, які містять найбільшу питому кількість вуглекислого газу. Встановлено граничні розміри бульбашки CO₂, що дозволяє видалити використання даної технології відповідно даних експерименту і загальний об'єм вуглекислого газу, що видалається під час обробки.

Ключові слова: гідродинамічна кавітація, нейтралізація, кислий конденсат, декарбонізація, дегазація, кавітаційна бульбашка, газовміст, рН.

A. NEDBAILO, G. IVANITSKY, B. TSELEN, N. RADCHENKO, L. HOZHENKO USE OF CAVITATION TECHNOLOGIES TO NEUTRALIZE ACIDIC MEDIUM. PROCESS EFFICIENCY

In this work, a comparison of various methods of neutralization of acidic environments is provided, their advantages and disadvantages are determined. The purpose of this work is to determine the efficiency of acid condensate neutralization by the method of hydrodynamic cavitation, for which theoretical and experimental studies were conducted. Neutralization of acidic liquid environments by the proposed method allows to significantly reduce the content of dissolved gases in the liquid without adding chemical reagents with moderate energy consumption and leads to a change in the pH of the medium towards the alkaline limit. The change in pH, confirmed by experimental studies, is primarily associated with the removal of soluble gas, which is contained in the form of bubbles up to 5 μm in size. The results of theoretical studies of processing in a rotary-pulsation apparatus are given, a number of technological parameters are determined, including pressures in the channel of the rotary apparatus, the potential for the growth of microbubbles at a given processing mode is established. According to the obtained theoretical data regarding the conduct of the process in the proposed processing modes, the possibility of removing bubbles with a limiting size of 0.6 μm and more has been established. The analysis of experimental data showed that the main part of dissolved gases can be removed in the first minutes of treatment, which is connected with the priority removal of bubbles of the largest sizes, which contain the largest specific amount of carbon dioxide. The limit sizes of the CO₂ bubble have been established, which allows to remove the use of this technology according to the experimental data and the total volume of carbon dioxide removed during processing.

Key words: hydrodynamic cavitation, neutralization, acid condensate, decarbonization, degassing, cavitation bubble, gas bridge, pH.

Вступ

Отримання кислого конденсату при спалюванні природного газу на теплоенергетичних підприємствах ставить перед екологами проблему його утилізації. Окрім екологічної небезпеки висока кислотність конденсату призводить до корозії металу в контактному обладнанні і, відповідно, до його руйнування. Кисле середовище конденсату зумовлене наявністю розчинених в ньому газів – CO₂, SO₂ і SO₃ – утворених під час згоряння палива. В той час як оксиди сірки при взаємодії з водою утворюють сульфитну і сульфатну кислоти, то діоксид вуглецю знаходиться у воді в балансі між розчиненою формою, утвореною вугільною кислотою та у формі бульбашок розміром до 5 мкм. Видалення таких бульбашок призводить до порушення цього балансу і, відповідно, зміни кислотності розчину. Найчастіше для ефективної нейтралізації кислотних розчинів застосовують хімічні методи з використанням хімічних реагентів. Ці методи по-

ряд зі своєю ефективністю мають ряд недоліків серед яких висока вартість реагентів і забрудненість рідини продуктами хімічної реакції.

Останнім часом більшого поширення набувають методи фізичного впливу на середовища. Зокрема, технології акустичної кавітації в лабораторних умовах продемонстрували ефективність процесу дегазації, який можна застосувати для нейтралізації води від вугільної кислоти. Однак, широкого застосування у виробництві такі методи не знайшли, що пов'язано з високими енерговитратами та низькою продуктивністю акустичних реакторів. Вирішити низку вказаних проблем та забезпечити безперервний спосіб оброблення можна за допомогою використання процесу гідродинамічної кавітації. Саме на основі даного процесу в Інституті технічної теплофізики НАН України було розроблено технологію та обладнання для нейтралізації кислого конденсату після спалювання природного газу на теплоенергетичних підприємствах.

Мета роботи

Метою даного дослідження є оцінка ефективності процесу нейтралізації кислого конденсату, вивчення механізмів процесу в умовах гідродинамічної кавітації, надання рекомендацій щодо технологічних режимів обробки даної технології.

Постановка проблеми

Нейтралізація кислого конденсату, що є суб-продуктом спалювання природного газу, пов'язана з видаленням вуглекислоти у формі бульбашок, що знаходяться в рідині. Необхідність процесів дегазації в сучасній промисловості широко розповсюджена та стосується багатьох і дуже різних за спрямованістю галузей виробництва від харчової до металургійної [1], [2]. Існує досить широкий спектр методів, що дозволяють її проводити з тією чи іншою ефективністю. Сучасними вимогами до технологій дегазації, окрім ефективності, є енергоощадність, екологічність, економічність, відносна простота та універсальність обладнання, тощо. На сьогоднішній час існує досить багато методів дегазації, що підтверджує зацікавленість в таких процесах. Серед них є хімічні та фізичні методи, яким віддається більша перевага. Досить перспективними можуть бути технології, засновані на використанні гідродинамічної кавітації, які виключають недоліки акустичних технологій. В Інституті технічної теплофізики НАН України проводяться наукові дослідження, що спрямовані на вивчення термо- та гідродинамічних характеристик даного процесу. В результаті була розроблена технологія, принцип роботи якої заснований на використанні процесу гідродинамічної кавітації. В ній реалізується процес нейтралізації кавітаційним методом, де кавітатором є РПА (роторно-пульсаційний апарат). В технологічній схемі використовувався апарат типу ротор-статор-ротор так як в апаратах даної конструкції рідина, проходячи через канали, зазнає високочастотного змінного різкого збільшення тиску з наступним його зниженням до від'ємних значень внаслідок миттєвого розтягнення рідини.

Виклад основного матеріалу

В рамках дегазації фізичними методами необхідно розв'язати 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 насичення. З огляду на вище викладене була спроектована лабораторна установка для ведення процесу декарбонізації рідини.

Дослідження проводились в лабораторних умовах на установці, схема якої зображена на рис. 1. Під час процесу нейтралізації рідина піддається багаторазовому гідродинамічному впливу за рахунок рециркуляції в контурі установки. В даній установці кавітатором є РПА – основний робочий елемент установки (рис. 1).

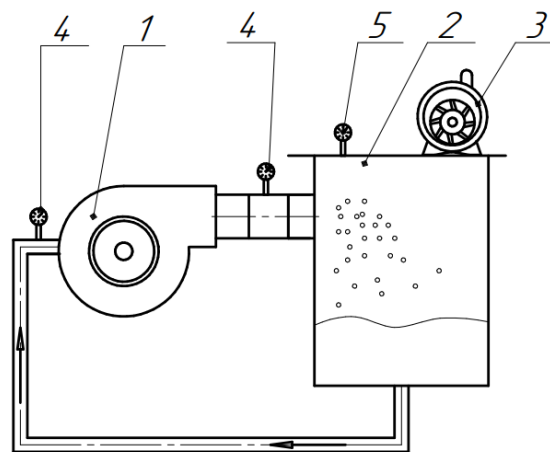


Рис. 1 – Схема лабораторної установки для дегазації рідини:

1 – РПА; 2 – вакуумна ємність; 3 – вакуумний насос; 4 – манометр; 5 – вакуумметр

РПА напряму з'єднаний з вакуумною камерою 2, в якій створюється тиск нижчий за атмосферний за допомогою вакуумного насоса 3 та забезпечується відведення видалених газів. Параметри тиску в камері контролюються вакуумметром 5. Для контролю тиску в системі встановлено манометри 4, які відображають покази тиску на вході і виході з РПА.

Отриманий кислий конденсат після спалювання природного газу на одній з котельнь м. Києва направлявся на установку дегазації, де в режимі рециркуляції велася обробка до забезпечення стабільного показника кислотності, що складало 16 хвилин, досягаючи стабільної величини рН. Відбір проб і вимірювання рН конденсату здійснювали через кожні 2 хвилини. За величиною рН обчислювали концентрацію вугільної кислоти у відібраних зразках конденсату і ефективність дегазації – відношення видаленої вуглекислоти до її початкового вмісту у розчині виражене у відсотках. Результати дослідження зміни рН в умовах обробки та розрахунки концентрації вуглекислоти та ефективність її видалення наведені в табл. 1.

Відомо, що кавітація має вплив на зміну показника рН розчинів, що пов'язано з видаленням діоксиду вуглецю, зміною рівноваги в розчині за рахунок балансу вуглекислоти, що міститься у вигляді бульбашок та розчиненої вуглекислоти, гідрокарбонатними та карбонатними іонами. Експериментальні дослідження це підтверджують

Таблиця 1 – Залежність зміни рН від часу обробки в установці кавітаційної дегазації

Час, хв.	рН	$C_{H_2CO_3}$, мг/л	Ефективність видалення, %
0	4,04	1112,1	–
2	4,79	43,3	96,1
4	4,94	4,94	98,1
6	4,96	4,96	98,2
8	5,02	5,02	98,6
10	5,09	5,09	99,0
12	5,19	5,19	99,4
14	5,32	5,32	99,6
16	5,40	5,40	99,7

та показують, що вже протягом перших двох хвилин оброблення суттєво зменшується концентрація вуглекислоти $C_{H_2CO_3}$ в рідині. В наступні хвилини обробки йде подальше її зниження, однак не є досить суттєвим порівняно з суттєвим зростанням рН в перші хвилини обробки, що дозволяє досягти ефективності 96,1 %.

Обговорення результатів

Для більш детального розуміння даних експериментальних досліджень були проведені теоретичні дослідження процесу декарбонізації кислого конденсату. Для визначення гідродинамічних параметрів режимів оброблення провели аналітичні розрахунки зміни тиску в РПА за моделлю [3]. Як показали дослідження імпульси тиску при обробці в РПА досягають від'ємних значень, що створює умови для виникнення кавітації (рис. 2). На виході з апарату тиск в рідині відповідав значенням 0,11 атм, що є незначно вище тиску насичення та обумовлено роботою вакуумного насоса.

Отримані криві тиску лягли в основу обчислень динаміки парогазових бульбашок радіусом від 0,6 мкм до 5 мкм за допомогою вирішення рівнянь моделі динаміки ансамблю парогазових бульбашок з використанням модифікованого рівняння Рейля-Плессета. На рис. 3 представлені залежності зміни радіусу бульбашки в часі. Так від'ємні тиски, що досягаються в роторному апараті дозволяють ініціювати зростання бульбашок розміром більше 0,6 мкм, що дає можливість видалити основну частину розчиненого газу. Залежності також показують, що швидкість зростання бульбашок залежить від їх початкового радіусу R і при цьому інтенсивність зміни розміру більша у бульбашок з великими розмірами. Це обумовлює першочергове видалення більших за розміром бульбашок, а отже, і основний об'єм розчинених газів видаляється на початку обробки. Це також підтверджується розрахунками отриманими на основі експериментальних даних (табл. 1).

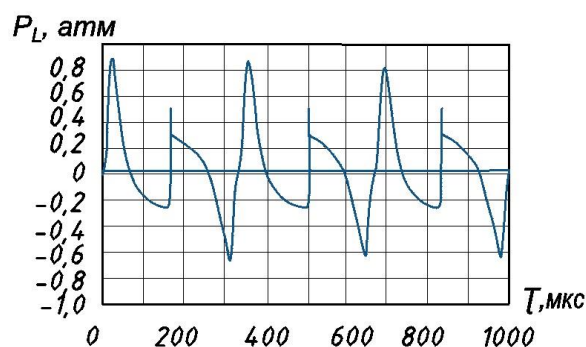


Рис. 2 – Зміна з часом тиску в потоці рідини на межі між статором і зовнішнім ротором за 3 періоди перекриття отворів

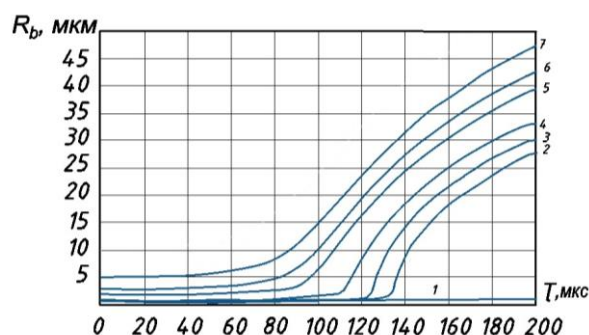
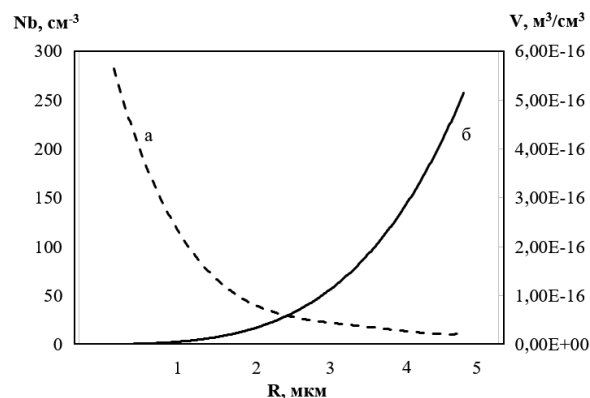


Рис. 3 – Зміна з часом радіусу газових бульбашок в каналах зовнішнього ротора для монодисперсної сукупності бульбашок діоксиду вуглецю в воді при значеннях початкового радіусу: 1 – 0,5 мкм; 2 – 0,6 мкм; 3 – 1 мкм; 4 – 2 мкм; 5 – 3 мкм; 6 – 4 мкм; 7 – 5 мкм

Рис. 4 – Залежність концентрації газових бульбашок в рідині і питомого об'єму розчиненого в рідині газу від радіуса бульбашки: а – розподіл бульбашок розчиненого CO_2 в об'ємі рідини при нормальних умовах; б – питомий об'єм розчиненого газу

Згідно даних [4] розподілу кількості бульбашок розчиненого вуглекислого газу Nb в рідині була побудована крива питомого об'єму розчиненого

ного газу, який займають бульбашки в залежності від їхнього радіусу (лінії a та b на рис. 4).

Інтегрування побудованої кривої дозволило встановити значення загального об'єму розчиненого газу, що міститься в бульбашках розміром до 5 мкм і дало можливість розрахувати мінімальний радіус бульбашки, що піддається видаленню з рідини.

Попередні дослідження показали, що бульбашки видаляються по мірі зменшення їх розмірів. Тобто, спочатку будуть видалятися бульбашки найбільших розмірів, оскільки швидкість активації їх росту є більшою.

Результати розрахунку розмірів бульбашок, що видаляються під час обробки наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність зміни рН від часу обробки в установці кавітаційної дегазації

Час обробки, хв.	2	4	6	8	10	12	14	16
R, мкм	2,204	1,851	1,826	1,712	1,585	1,425	1,245	1,147

Розрахунок показав, що за перші дві хвилини обробки видаляється найбільша кількість вуглекислого газу, що міститься в бульбашках від 5 до 2,204 мкм. Наступний час оброблення дозволяє видалити всі бульбашки, розміром до 1,147 мкм.

Висновки

Застосування запропонованої технології кавітаційної нейтралізації кислого конденсату дозволяє суттєво знизити концентрацію вугільної кислоти в конденсаті, що отримується в результаті спалювання природного газу на теплоенергетичних підприємствах. Найбільше видалення газу досягається вже під час короткотривалого оброблення (впродовж перших 2 хвилин). Наявність від'ємних тисків в РПА дозволяють активувати зростання бульбашок від 0,6 мкм. Видалення бульбашок газу меншого розміру залежить від режимних параметрів роботи обладнання і пов'язані з можливістю активації росту бульбашки певних розмірів. Отримані результати показали високу ефективність дегазації кислого конденсату та його нейтралізації.

Список літератури

1. Gogate, P. R. Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing / P. R. Gogate // Food and Bioprocess Technology.

- 2011. – Vol. 4. – P. 996–1011. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>.
2. Eskin, D. G. Ultrasonic degassing of liquids / D. G. Eskin // Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound. Part Three: Engineering and medical applications. – 2015. – P. 611–631. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-028-6.00020-X>.
3. Долинский А. А. Теплообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии / А. А. Долинский, Г. К. Иваницкий. – Киев : Наукова думка, 2008. – 381 с.
4. Brennen, Ch. E. Cavitation and Bubble Dynamics / Ch. E. Brennen. – New York : Oxford University Press, 1995. – 294 p. – ISBN 0-19-509409-3.

References (transliterated)

1. Gogate, P. R. (2011), "Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing", *Food and Bioprocess Technology*, vol. 4, pp. 996–1011, <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>.
2. Eskin, D. G. (2015), "Ultrasonic degassing of liquids", *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound. Part Three: Engineering and medical applications*, pp. 611–631, <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-028-6.00020-X>.
3. Dolinskiy, A. A., Ivanitskiy, G. K. (2008), *Teplomasoobmen i gidrodinamika v parozhidkostnykh dispersnykh sredakh. Teplofizicheskie osnovy diskretno-impul'snogo vvoda e'nergii* [Heat and mass transfer and hydrodynamics in vapor-liquid dispersed media], Naukova dumka, Kiev, 381 p.
4. Brennen, Ch. E. (1995), *Cavitation and Bubble Dynamics*, Oxford University Press, New York, 294 p, ISBN 0-19-509409-3.

Надійшла (received) 15.12.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Недбайло Анна Євгенівна (Nedbailo Anna) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу ТДС ІТТФ НАН України; м. Київ; e-mail: anna.nedbailo18@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8590-5823>.

Іваницький Георгій Костянтинович (Ivanitsky Georgy) – доктор технічних наук, професор кафедри МАХНВ НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», провідний науковий співробітник відділу ТДС ІТТФ НАН України; м. Київ; e-mail: gergey4@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2359>.

Целень Богдан Ярославович (Tselen Bogdan) – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник відділу ТДС ІТТФ НАН України; м. Київ; e-mail: b0d@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>.

Радченко Наталія Леонідівна (Radchenko Natalia) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу ТДС ІТТФ НАН України; м. Київ; e-mail: rado4ka@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5315-1609>.

Гоженко Любов Петрівна (Hozhenko Lubov) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу ТДС ІТТФ НАН України; м. Київ; e-mail: hozhenkolady@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-1917>.