

УДК 620.193.16:544.57

З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, Р.В. Мних, З.С. Ткач

ТЕРМОХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИКИ ПРОЦЕСУ СОНОЛІЗУ ВОДИ У КАВІТАЦІЙНИХ ПОЛЯХ

Національний університет “Львівська політехніка”

Авторами проаналізовано дані про процес сонолізу води у кавітаційному полі, відповідно до яких генеровані у кавітаційних полях радикали рекомбінують з утворенням водню, кисню, води, гідрогену пероксиду тощо. Встановлено, що під час кавітації відбувається насичення води киснем, який відіграє важливу роль у процесах очищення водних гетерогенних середовищ від органічних сполук; впродовж 450 с ступінь насичення води киснем становив 67,2% від максимально можливого, що відповідає концентрації кисню у воді 6,48 мг/дм³. На основі результатів кавітаційного насичення води киснем і термодинамічних розрахунків процесу сонолізу води (зокрема, з використанням формули Кірхгофа і рівняння Майєра-Келлі) обчислено кількість енергії, яка витрачається на утворення вільних радикалів. Частку енергії від підведеної до водного середовища у формі акустичних коливань, яка витрачається безпосередньо на соноліз води, оцінено за величиною хіміко-акустичного коефіцієнта корисної дії, що становить $2,558 \cdot 10^{-3}$ для сонолізу води у гідродинамічному струменевому кавітаторі. Виявлено, що ця величина, щонайменше, в 1,7 рази більша за аналогічну для ультразвукових випромінювачів, що свідчить про вищу енергетичну ефективність гідродинамічних кавітаторів, порівняно із ультразвуковими.

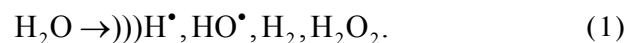
Ключові слова: кавітація; соноліз; радикали; кисень; водень; хіміко-акустичний коефіцієнт корисної дії.

Вступ

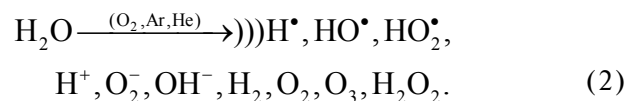
Важливе значення під час очищення водних гетерогенних середовищ від органічних сполук, переважно відновників, мають сполуки, які виявляють властивості окисників, – кисень, озон, гідрогену пероксид тощо. Кавітація є одним із методів генерування сполук окисного характеру. Внаслідок кавітації відбувається руйнування водневих зв'язків, що призводить до деструктування каркасу води навіть до мономолекул [1]. У кавітаційних полях ці мономолекули води розкладаються з утворенням високоактивних частинок (радикалів, атомів, сполук окисного та відновного характеру тощо) – відбувається соноліз води. При цьому інтенсивність сонолізу залежить від інтенсивності розвитку кавітаційних явищ, яка, своєю чергою, визначається технологічними параметрами кавітаційного оброблення водного середовища (тиском на вході у кавітатор, температурою реакційного середовища, кратністю оброблення) і конструктивними особливостями генераторів кавітації (типом, формою, геометричними розмірами ка-

вітаційних елементів, їх просторовим розміщенням тощо) [2–6].

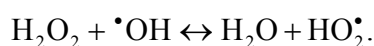
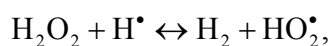
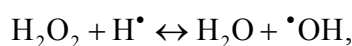
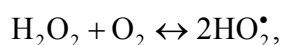
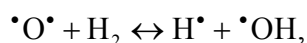
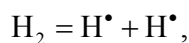
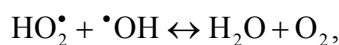
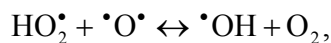
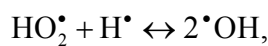
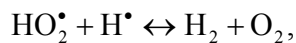
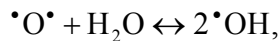
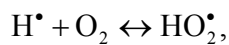
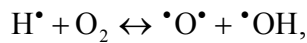
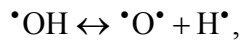
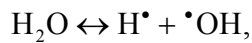
Відповідно до гіпотези Маргуліса-Мальцева розклад молекул води з утворенням первинних продуктів відбувається за такою схемою [7]:



Вода належить до відкритих систем, тобто може обмінюватись із зовнішнім середовищем енергією і речовиною. За наявності в атмосфері кисню та інертних газів сумарний процес сонолізу описують такою схемою [7]:



Соноліз води у кавітаційних полях відображено низкою можливих хімічних реакцій [8–13]. Найбільш повно механізм сонохімічного розкладу води зображено системою таких реакцій [12]:



Згідно з цим механізмом під час сонолізу води відбуваються такі процеси, що приводять до утворення продуктів з окисними властивостями: генерування атомарного Гідрогену та атомарного Оксигену, гідроксильних та гідрогенпероксидних радикалів, та їх рекомбінація з утворенням водню, кисню, води, гідрогену пероксиду тощо.

Робота присвячена термохімічному аналізу

енергетики процесу кавітаційного сонолізу води та визначенню частки енергії від підведеної до водного середовища у формі акустичних коливань, яка витрачається безпосередньо на соноліз води.

Експериментальна частина

Дослідження здійснювали на установці, до складу якої входив кавітатор струменевого типу з потужністю приводу насоса 1555 ± 5 Вт (у режимі максимального навантаження) та циркуляційна ємність. Кавітаційному обробленню піддавали водопровідну воду об'ємом $25 \cdot 10^{-3}$ м³; температура вихідної води ($T_{\text{вих}}$, К) – 284 ± 1 К. Параметри процесу оброблення води [2]: тиск на вході у кавітатор – 0,57 МПа; кількість сопел – 5 од.; діаметр сопла – 1,6 мм; кут атаки струменів – 150 град; тривалість оброблення – 1800 с. Установку для кавітаційного насичення води киснем повітря герметизували.

Для визначення ступеня насичення води киснем, що виділявся саме внаслідок кавітації, попередньо проводили деоксигенацію води. Для цього кисень, розчинений у вихідній воді і вміст якого визначали завчасно (за Вінклером та з використанням киснеміра EZODO 7031), зв'язували хімічно, додаючи стехіометричну кількість розчину натрію сульфіту. Впродовж досліду киснеміром вимірювали у воді вміст кисню (у мг/дм³), що виділився внаслідок сонолізу і розчинився за адіабатичних умов. Точність вимірювання – 10^{-2} мг/дм³. Ступінь насичення води киснем визначали як відношення вмісту розчиненого у воді кисню до максимальної розчинності кисню за відповідних умов (температури води, атмосферного тиску та солемісту (іонної сили)).

Ентальпії утворення речовин за температури, відмінної від стандартної, обчислювали за формулою Кірхгофа:

$$H_T = H_{T_0} + \int_{T_0}^T C_p dT, \quad (22)$$

де H_{T_0} , H_T – ентальпії утворення речовини за температур T_0 і T відповідно, Дж/моль; C_p – теплоємність речовин за сталого тиску, Дж/(моль·К).

Залежність ізобарної теплоємності речовин (C_p , Дж/(моль·К)) від температури описується рівнянням Майєра-Келлі [14]:

$$C_p = a + bT - \frac{c}{T^2}, \quad (23)$$

де a, b, c – емпіричні коефіцієнти, визначені

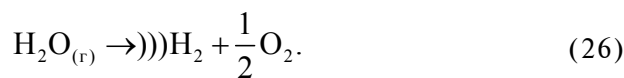
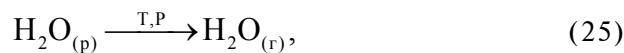
для кожної речовини.

Хіміко-акустичний коефіцієнт корисної дії (ККД) ($\eta_{\text{ха}}$, %), що є відношенням кількості енергії, яка витрачається на утворення вільних радикалів ($E_{\text{ха}}$), до поглиненої енергії акустичних коливань (E), обчислювали за такою формулою [7]:

$$\eta_{\text{ха}} = \frac{E_{\text{ха}}}{E} \cdot 100\%. \quad (24)$$

Результати та обговорення

Вищенаведені схеми сонолізу води є складними, багата стадійними, передбачають утворення продуктів, вміст яких у воді визначити дуже складно або й неможливо. Тому вважали, що основними кінцевими стабільними продуктами сонолізу води є кисень і водень. Тому припускали, що у кавітаційних полях за високих температур ($T=10^3 \dots 10^4$ К) і тисків ($P=10^2 \dots 10^3$ МПа), які виникають локально під час сплескування кавітаційних бульбашок [7], вода переходить з рідкої фази у газу і розкладається з виділенням молекулярних водню та кисню

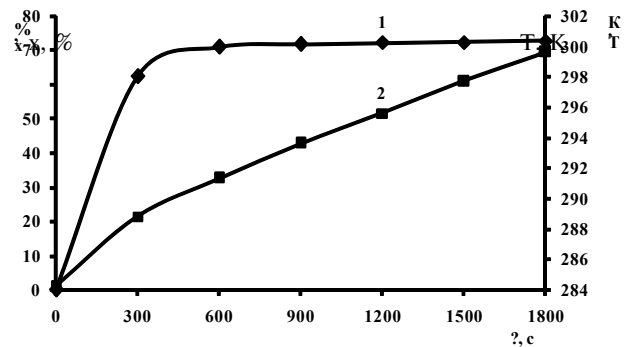


Кавітаційні бульбашки оточені водою, у якій розчиняються генеровані за реакціями (25 і 26) газу, насамперед, кисень. Залежності ступеня насичення води киснем (x , %) (1) і температури води (T , К) (2) від тривалості кавітаційного оброблення (τ , с) в адіабатичних умовах наведено на рисунку.

Згідно з рисунком рівновага насичення води киснем настає через 450 с від початку кавітаційного оброблення, а температура водного середовища зростає від 284 ($T_{\text{вих}}$) до 291 К ($T_{\text{кін}}$) (рисунок, крива 2). При цьому ступінь насичення води киснем за рахунок сонолізу її молекул у кавітаційних полях становить 67,2% від максимально можливого (рисунок, крива 1), що відповідає концентрації кисню у воді 6,48 мг/дм³.

Оскільки у реакційній системі “рідина–газ” впродовж 450 с встановлюється динамічна рівновага між процесами абсорбції і десорбції утвореного внаслідок сонолізу води кисню, то знаючи кількість теплоти, яку необхідно підвести до води для реалізації фазового переходу “вода–водяна пара” і нагрівання водяної пари до температури сплескування ($Q_{\text{погл}}$), і кількість тепло-

ти, що виділяється внаслідок сонолізу водяної пари та охолодження продуктів (водню і кисню) до 291 К ($Q_{\text{вид}}$), можна обчислити $E_{\text{ха}}$. Точне значення температури, яке досягається всередині кавітаційної бульбашки під час її сплескування ($T_{\text{спл}}$) невідоме, тому прийняли $T_{\text{спл}}=1473$ К, оскільки за температур вище 1273 К відбувається термічна дисоціація водяної пари.



Залежності ступеня насичення води киснем (x , %) (1) і температури води (T , К) (2) від тривалості кавітаційного оброблення (τ , с)

Теплота, необхідна для здійснення трьох процесів ($Q_{\text{погл}}$): нагрівання води від температури 284 К ($T_{\text{вих}}$) до температури кипіння ($T_{\text{кип}}=373$ К); фазового перетворення “вода–водяна пара”; нагрівання водяної пари від 373 К до 1473 К.

Маса води ($m_{\text{H}_2\text{O}}$, г), яка розклалась внаслідок сонолізу в кавітаційних полях, відповідно до реакції (26)

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{C_{\text{O}_2} V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 10^{-3} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}}{\frac{1}{2} M_{\text{O}_2}} = \frac{6,48 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 18}{\frac{1}{2} \cdot 32} = 0,182 \text{ г}, \quad (27)$$

де C_{O_2} – концентрація кисню у воді, мг/дм³; $V_{\text{H}_2\text{O}}$ – об’єм води, обробленої у кавітаторі, дм³; 10^{-3} – коефіцієнт переходу від мг до г; $M_{\text{H}_2\text{O}}, M_{\text{O}_2}$ – молярні маси води і кисню відповідно, г/моль.

Кількість теплоти (Q_1 , Дж), яка необхідна для нагрівання води від 284 до 373 К, дорівнює:

$$Q_1 = c_{\text{H}_2\text{O}} m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{кип}} - T_{\text{вих}}) = 4,19 \cdot 0,182 \cdot (373 - 284) = 67,87 \text{ Дж}, \quad (28)$$

де $c_{\text{H}_2\text{O}}$ – питома теплоємність води, Дж/(г·К).

Кількість теплоти (Q_2 , Дж), яка необхідна для здійснення фазового перетворення за рівнянням реакції (25), визначали за формулою

$$\begin{aligned} Q_2 &= v_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\Delta H_{\text{H}_2\text{O}(\text{r})}^{373} - \Delta H_{\text{H}_2\text{O}(\text{p})}^{373}) = \\ &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (\Delta H_{\text{H}_2\text{O}(\text{r})}^{373} - \Delta H_{\text{H}_2\text{O}(\text{p})}^{373}) = \\ &= \frac{0,182}{18} \cdot (-239261 + 285840) = \\ &= 470,97 \text{ Дж}, \end{aligned} \quad (29)$$

де $v_{\text{H}_2\text{O}}$ – кількість води, моль; $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}(\text{r})}^{373}$, $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}(\text{p})}^{373}$ – відповідно ентальпії утворення водяної пари і води за температури 373 К, Дж/моль.

Кількість теплоти (Q_3 , Дж), яка необхідна для нагрівання водяної пари від 373 до 1473 К, дорівнює:

$$\begin{aligned} Q_3 &= c_{\text{H}_2\text{O}(\text{r})} \cdot v_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{спл}} - T_{\text{кип}}) = \\ &= 39,3 \cdot 1,01 \cdot 10^{-2} \cdot (1473 - 373) = \\ &= 436,62 \text{ Дж}, \end{aligned} \quad (30)$$

де $c_{\text{H}_2\text{O}(\text{r})}$ – молярна теплоємність водяної пари, Дж/(моль·К).

У термохімії теплота, що поглинається, – від’ємна. Тому кількість теплоти ($Q_{\text{погл}}$, Дж), яку необхідно підвести до водного середовища для реалізації трьох вищезазначених процесів, становить:

$$\begin{aligned} Q_{\text{погл}} &= -(Q_1 + Q_2 + Q_3) = \\ &= -(67,87 + 470,97 + 436,62) = \\ &= -975,46 \text{ Дж}. \end{aligned} \quad (31)$$

У результаті сонолізу водяної пари і охолодження основних продуктів (водню і кисню) від 1473 до 291 К ($T_{\text{кін}}$) виділяється теплота ($Q_{\text{вид}}$).

Кількість теплоти (Q_1' , Дж), яка виділяється внаслідок розкладу водяної пари відповідно до рівняння реакції (26), дорівнює:

$$Q_1' = v_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \left(\Delta H_{\text{H}_2}^{1473} + \frac{1}{2} \Delta H_{\text{O}_2}^{1473} - \Delta H_{\text{H}_2\text{O}(\text{r})}^{1473} \right) =$$

$$\begin{aligned} &= 1,01 \cdot 10^{-2} \cdot \left(35579,75 + \frac{39105,1}{2} + 195219,14 \right) = \\ &= 2528,55 \text{ Дж}, \end{aligned} \quad (32)$$

де $\Delta H_{\text{H}_2}^{1473}$, $\Delta H_{\text{O}_2}^{1473}$, $\Delta H_{\text{H}_2\text{O}(\text{r})}^{1473}$ – відповідно ентальпії утворення водню, кисню, водяної пари за температури 1473 К, Дж/моль.

Кількість теплоти (Q_2' , Дж), що виділяється внаслідок охолодження продуктів сонолізу (водню і кисню) від 1473 до 291 К, становить:

$$\begin{aligned} Q_2' &= c_{\text{газ, сум}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{спл}} - T_{\text{кін}}) = \\ &= 1,1 \cdot 0,182 \cdot (1473 - 291) = 236,64 \text{ Дж}, \end{aligned} \quad (33)$$

де $c_{\text{газ, сум}}$ – питома теплоємність газової суміші (суміші водню і кисню), Дж/(г·К).

Кількість теплоти ($Q_{\text{вид}}$, Дж), що виділяється внаслідок сонолізу водяної пари і охолодження газової суміші, становить:

$$\begin{aligned} Q_{\text{вид}} &= Q_1' + Q_2' = 2528,55 + 236,64 = \\ &= 2765,19 \text{ Дж}. \end{aligned} \quad (34)$$

Кількість енергії ($E_{\text{ха}}$, Дж), яка витрачається на утворення проміжних продуктів сонолізу води (вільних радикалів), визначали за формулою

$$\begin{aligned} E_{\text{ха}} &= Q_{\text{погл}} + Q_{\text{вид}} = -975,46 + 2765,19 = \\ &= 1789,73 \text{ Дж}. \end{aligned} \quad (35)$$

Частку енергії від підведеної, яка витрачається на соноліз води, оцінювали на основі величини хіміко-акустичного ККД. Хіміко-акустичний ККД ($\eta_{\text{ха}}$, %) процесу сонолізу води в кавітаційних полях дорівнює:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ха}} &= \frac{E_{\text{ха}}}{E} = \frac{E_{\text{ха}}}{N \cdot \tau} = \frac{1789,73}{1555 \cdot 450} \cdot 100\% = \\ &= 0,2558\%, \end{aligned} \quad (36)$$

де N – потужність приводу насоса, Вт; τ – тривалість кавітаційного оброблення, с.

Розрахована величина хіміко-акустичного ККД ($2,558 \cdot 10^{-3}$) для сонолізу води у гідродинамічному струменевому кавітаторі не перевищує 1% від енергії, підведеної до водного середовища, і, щонайменше, в 1,7 рази більша за аналогічну величину для ультразвукових випроміню-

вачів. Так, під час сонолізу води, зумовленого дією акустичних коливань ультразвукового діапазону, в атмосфері аргону, гелію та кисню величина хіміко-акустичного ККД становить відповідно $1,5 \cdot 10^{-3}$; $0,22 \cdot 10^{-3}$; $0,98 \cdot 10^{-3}$ [7]. Оскільки наявність розчинених газів у водному середовищі, як відомо [7], сприяє збудженню кавітації, то досягнуте за відсутності у вихідній воді розчинених газів значення хіміко-акустичного ККД свідчить про високу енергетичну ефективність здійснення кавітаційних процесів у струменевому гідродинамічному кавітаторі. Враховуючи, що продуктивність і потужність гідродинамічних струменевих кавітаторів є значно більшою, ніж ультразвукових, і визначається переважно характеристиками насоса, то це зумовлює їх перспективність для здійснення промислових хіміко-технологічних процесів.

Висновки

На основі аналізу джерел інформації виявлено основні механізми генерування кисню і водню внаслідок сонолізу води у кавітаційних полях. Відповідно до цих механізмів під час сонолізу води відбуваються такі процеси: генерування радикалів Гідрогену та гідроксильних, атомарного Оксигену, пероксидних радикалів та їх рекомбінація з утворенням водню, кисню, води, гідрогену пероксиду тощо.

Частку енергії від підведеної до водного середовища у формі акустичних коливань, яка витрачається безпосередньо на соноліз води, оцінено за величиною хіміко-акустичного ККД.

Встановлено, що ступінь кавітаційного насичення води киснем впродовж 450 с становить 67,2% від максимально можливого, що відповідає концентрації кисню у воді 6,48 мг/дм³. З використанням результатів кавітаційного насичення води киснем і термохімічних розрахунків визначено кількість енергії, яка витрачається на утворення вільних радикалів.

Обчислена величина хіміко-акустичного ККД ($2,558 \cdot 10^{-3}$) для сонолізу води у гідродинамічному струменевому кавітаторі, щонайменше, в 1,7 рази більша, ніж аналогічна величина для ультразвукових випромінювачів, що свідчить про його значно вищу енергетичну ефективність під час здійснення промислових хіміко-технологічних процесів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Федоткин И.М., Гульи И.С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (Теоретические основы производства избыточной энергии, расчет и конструирование кавитационных теплогенераторов). – К.: АО “ГЛАЗ”, 2000. – Ч. II. – 898 с.
2. Znak Z., Sukhatskiy Yu. The Brandon method in modelling the cavitation processing of aqueous media // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol.3. – No. 8 (81). – P.37-42.
3. Сухацький Ю.В., Знак З.О., Мних Р.В. Енергетичний аналіз роботи гідродинамічного струменевого кавітатора у процесах очищення стічних вод за кавітаційно-флотаційною технологією // *Вісник Національного ун-ету “Львівська політехніка”*. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2015. – № 812. – С.354-359.
4. Знак З.О., Сухацький Ю.В., Мних Р.В. Дослідження залежності ефективності роботи гідродинамічного струменевого кавітатора від конструктивних параметрів кавітувального елемента // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2015. – № 2 (78). – С.18-26.
5. Energy characteristics of treatment of corrosive aqueous media in hydrodynamic cavitators / V.T. Yavors'kyi, Z.O. Znak, Yu.V. Sukhats'kyi, R.V. Mnykh // *Materials Science*. – 2017. – Vol.52. – No. 4. – P.595-600.
6. The decomposition of the benzene in cavitation fields / Z.O. Znak, Yu.V. Sukhatskiy, O.I. Zin et al. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2018. – No. 1. – P.72-77.
7. Маргулис М.А. Звухохимические реакции и сонолюминесценция. – М.: Химия, 1986. – 288 с.
8. Free radical formation from sonolysis of water in the presence of different gases / M. Kohno, T. Mokudai, T. Ozawa, Yo. Niwano // *J. Clin. Biochem. Nutr.* – 2011. – Vol.49. – No. 2. – P.96-101.
9. Water and wastewater disinfection by ultrasound irradiation – a critical review / V. Naddeo, A. Cesaro, D. Mantzavinos et al. // *Global NEST Journal*. – 2014. – Vol.16. – No. 3. – P.561-577.
10. Harada H. Isolation of hydrogen from water and/or artificial seawater by sonophotocatalysis using alternating irradiation method // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2001. – Vol.26. – P.303-307.
11. Riesz P., Berdahl D., Christman C.L. Free radical generation by ultrasound in aqueous and nonaqueous solutions // *Environmental Health Perspectives*. – 1985. – Vol.64. – P.233-252.
12. Mechanism of the sonochemical production of hydrogen / S. Merouani, O. Hamdaoui, Ya. Rezgui, M. Guemini // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2015. – Vol.40. – P.4056-4064.

13. Thakare Y.D., Jadhav S.M. Degradation of brilliant green dye using cavitation based hybrid techniques // *International Journal of Advanced Engineering Technology*. – 2013. – Vol.4. – P.31-36.

14. *Обеспечение* информационной достоверности и согласованности термодинамических функций и баз данных / А.А. Слободов, А.А. Сочагин, Е.Б. Качер и др. // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. – 2010. – № 1 (65). – С.75-81.

Надійшла до редакції 03.04.2018

THERMOCHEMICAL ANALYSIS OF ENERGETICS IN THE PROCESS OF WATER SONOLYSIS IN CAVITATION FIELDS

Z.O. Znak, Yu.V. Sukhatskiy, R.V. Mnykh, Z.S. Tkach
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

The authors analyzed the data concerning the process of water sonolysis in cavitation fields, according to which the radicals generated in the cavitation fields are recombined with the formation of hydrogen, oxygen, water, hydrogen peroxide, etc. It was established that water saturation by oxygen occurs during cavitation, and oxygen plays an important role in the purification of water heterogeneous environment from organic compounds; the degree of saturation of water by oxygen was 67.2% of the maximum possible value after 450 s, which corresponds to the concentration of oxygen in water of 6.48 mg dm^{-3} . The amount of energy consumed for the formation of free radicals was calculated on the basis of the results of cavitation saturation of water by oxygen and thermochemical calculations of the process of water sonolysis (in particular, using the Kirchhoff formula and the Meyer-Kelly equation). A fraction of the energy from the aqueous environment in the form of acoustic oscillations, which is spent directly on the sonolysis of water was estimated by the value of the chemical-acoustic coefficient of utility which was equal to $2.558 \cdot 10^{-3}$ for water sonolysis in a hydrodynamic jet cavitator. It was found that this value is at least 1.7 times greater than that of ultrasonic emitters, which indicates a higher energy efficiency of hydrodynamic cavitators compared to ultrasonic ones.

Keywords: cavitation; sonolysis; radicals; oxygen; hydrogen; chemical-acoustic coefficient of efficiency.

REFERENCES

1. Fedotkin I.M., Gulyi I.S., *Kavitatsiya, kavitatsionnaya tekhnika i tekhnologiya, ikh ispol'zovanie v promyshlennosti (Teoreticheskie osnovy proizvodstva izbytochnoi energii, raschet i konstruirovaniye kavitatsionnykh teplogeneratorov). Chast' II* [Cavitation, cavitation equipment and technology, their use in industry: theory of the production of excess energy, calculation and design of cavitation heat generators. Part II]. GLAZ Publishers, Kyiv, 2000. 898 p. (in Russian).

2. Znak Z., Sukhatskiy Yu. The Brandon method in modelling the cavitation processing of aqueous media. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 3, no. 8 (81), pp. 37-42.

3. Sukhats'kyi Yu.V., Znak Z.O., Mnykh R.V. Energetychnyi analiz roboty gidrodynamichnogo strumenevogo kavitatora u protsesakh ochyshchenn'ya stichnykh vod za kavitatsiino-flotatsiinoyu tekhnologiyu [Power analysis of hydrodynamic jet cavitator operation in sewage treatment processes by cavitation and flotation technology]. *Visnyk Natsional'nogo*

Universytetu «L'viv's'ka Politekhniky». Khimiya, Tekhnologiya Rechovyn ta i'kh Zastosuvann'ya, 2015, no. 812, pp. 354-359. (in Ukrainian).

4. Znak Z.O., Sukhats'kyi Yu.V., Mnykh R.V. Doslidzhenn'ya zalezhnosti efektyvnosti roboty gidrodynamichnogo strumenevogo kavitatora vid konstruktivnykh parametriv kavituval'nogo elementa [Investigation of the dependence of the efficiency of the hydrodynamic jet cavitator from the design parameters of the cavitation element]. *Vibratsii v Tekhnitsi ta Tekhnologiyakh*, 2015, no. 2(78), pp. 18-26. (in Ukrainian).

5. Yavors'kyi V.T., Znak Z.O., Sukhats'kyi Yu.V., Mnykh R.V. Energy characteristics of treatment of corrosive aqueous media in hydrodynamic cavitators. *Materials Science*, 2017, vol. 52, pp. 595-600.

6. Znak Z.O., Sukhatskiy Yu.V., Zin O.I., Khomyak S.V., Mnykh R.V., Lysenko A.V. The decomposition of the benzene in cavitation fields. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2018, no. 1, pp. 72-77.

7. Margulis M.A., *Zvukokhimicheskie reaktsii i sonoluminesentsiya* [Sound-chemical reactions and sonoluminescence]. Khimiya, Moscow, 1986. 288 p. (in Russian).

8. Kohn M., Mokudai T., Ozawa T., Niwano Y. Free radical formation from sonolysis of water in the presence of different gases. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 2011, vol. 49, pp. 96-101.

9. Naddeo V., Cesaro A., Mantzavinos D., Fatta-Kassinos D., Belgiorno V. Water and wastewater disinfection by ultrasound irradiation – a critical review. *Global NEST Journal*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 561-577.

10. Harada H. Isolation of hydrogen from water and/or artificial seawater by sonophotocatalysis using alternating irradiation method. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2001, vol. 26, pp. 303-307.

11. Riesz P., Berdahl D., Christman C.L. Free radical generation by ultrasound in aqueous and nonaqueous solutions. *Environmental Health Perspectives*, 1985, vol. 64, pp. 233-252.

12. Merouani S., Hamdaoui O., Rezgui Y., Guemini M. Mechanism of the sonochemical production of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40, pp. 4056-4064.

13. Thakare Y.D., Jadhav S.M. Degradation of brilliant green dye using cavitation based hybrid techniques. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2013, vol. 4, pp. 31-36.

14. Slobodov A.A., Sochagin A.A., Kacher E.B. Obespechenie informatsionnoi dostovernosti i soglasovannosti termodinamicheskikh funktsii i baz dannykh [Ensuring the information reliability and consistency of thermodynamic functions and databases]. *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta Informatsionnykh Tekhnologii, Mekhaniki i Optiki*, 2010, no. 1 (65), pp. 75-81. (in Russian).