

[0000-0002-9453-3144] **Ю. В. Сухаський**, к.т.н., с.н.с.,

e-mail: sukhatsky@i.ua

[0000-0002-3871-4063] **З. О. Знак**, д.т.н., професор,

e-mail: znak_zo@ukr.net

С. М. Капаціла, студентка,

І. Б. Садова, студентка

Національний університет «Львівська політехніка»,

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна

*Присвячується світлій пам'яті мого Вчителя
Смолія Олександра Сільвестровича*

КАВІТАЦІЯ У КОМБІНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ВІД ТОЛУЕНУ

Проаналізовано застосування акустичної і гідродинамічної кавітації та їх комбінацій з іншими методами для очищення стічних вод від дисперсних твердих частинок та органічних сполук. Показано доцільність поєднання кавітації з реагентним обробленням для підвищення ступеня деградації забруднювачів. Подано характеристику методу спектроскопії в ультрафіолетовому та видимому діапазонах спектра для визначення концентрації толуену в імітаті стічних вод. Наведено залежності концентрації толуену і температури реакційної системи від тривалості кавітаційного оброблення за різних значень питомої потужності ультразвукового випромінювання, тиску на вході у гідродинамічний кавітатор, різного реагентного режиму. Розраховано ступінь деградації толуену і константу швидкості цього процесу за різних параметрів кавітаційного оброблення. Шляхом порівняння констант швидкості деградації толуену і ступенів деградації для комбінованих технологій (акустична кавітація+H₂O₂; гідродинамічна кавітація+H₂O₂) встановлено, що гідродинамічна кавітація є значно ефективнішою, ніж акустична.

Ключові слова: кавітація, ультразвукове випромінювання, гідродинамічний кавітатор, толуен, гідрогену пероксид, бензойна кислота, комбіновані технології.

Вступ. Кавітація та її комбінації з іншими методами – основа ефективних технологій очищення стічних вод від дисперсних твердих частинок [1, 2] та шкідливих органічних сполук [3-10]. Так, встановлено, що максимальної швидкості флоатації кальцію оксалату, який утворювався внаслідок хімічної взаємодії натрію оксалату (протрава під час дублення шкіри) із кавітаційно активованими дисперсними частинками суспензії кальцію гідроксиду, досягали за тривалості кавітаційного оброблення 600...900 с і тиску на вході у гідродинамічний кавітатор 0,3...0,4 МПа [1]. При цьому формувалася плівково-структурна піна, а ступінь вилучення натрію оксалату за використання комбінованої кавітаційно-флоатаційної технології становив 94,6 % [2].

Серед органічних сполук особливо шкідливими є органічні розчинники, наприклад, бензен, толуен, ацетон тощо, тривала дія яких може призводити до уражень центральної нервової системи людини, пригнічення

© Ю. В. Сухаський З. О. Знак, С. М. Капаціла І. Б. Садова, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.1.2020.186547

мітохондріальних ферментів живих організмів внаслідок акумулятивного ефекту. Крім того, ці речовини можуть мати потенційні канцерогенні властивості.

Ефективність деградації забруднювачів визначається їх початковою концентрацією у рідині (воді) [3], величиною рН [4], реагентним режимом [4, 5], енергетичними характеристиками кавітаційного оброблення (питомою потужністю ультразвукових генераторів, тиском на вході у гідродинамічні кавітатори) [6-8], а також конструктивними особливостями кавітаційних апаратів [9, 10].

Виявлено, що збільшення концентрації бензену в 20 разів (від 4 до 80 мг/дм³) за постійної питомої потужності генератора ультразвукових коливань (1,3 кВт/дм³) зумовлювало зменшення константи швидкості сонохімічної деструкції бензену в 3,3 разу (від 0,01 до 0,003 хв⁻¹). Таке ж (від 4 до 80 мг/дм³) збільшення початкової концентрації толуену за постійної питомої потужності генератора ульт-

развукових коливань ($1,9 \text{ кВт/дм}^3$) зумовлювало зменшення константи швидкості сонохімічної деструкції толуену в 7 разів (від $0,028$ до $0,004 \text{ хв}^{-1}$) [3].

Використання комбінації гідродинамічної кавітації із реагентним обробленням (реагент Фентона) для очищення стічних вод, що містили пестицид триазофос, забезпечило досягнення ступеня деградації останнього $83,12\%$ [4]. Умови оброблення: тиск на вході у кавітатор – $0,5 \text{ МПа}$; pH – 3; мольне співвідношення, моль/дм^3 : триазофос : FeSO_4 : H_2O_2 = 1:4:4; тривалість оброблення – 120 хв.

Для попереднього очищення (перед застосуванням біологічних методів) стічних вод нафтопереробних підприємств від ароматичних сполук (бензену, толуену, нафталену і ксилену) застосовували комбінацію ультразвукової кавітації, реагентного оброблення та перемішування. Оптимальні витрати складових реактиву Фентона були такими, г/дм^3 : Fe^{2+} – 2; H_2O_2 – 1. Використання комбінованої технології очищення впродовж 40 хв. дало змогу підвищити індекс біологічної деградації (БСК_5 : ХСК) від $0,17$ до $0,39$ [5].

Здійснення кавітаційної деструкції бензену за температури 323 К в стаціонарному режимі (питома потужність ультразвукового випромінювання – 68 кВт/м^3) впродовж 1800 с дало змогу досягнути ступеня деструкції $89,3\%$, а в режимі ініціювання реакції (питома потужність ультразвукового випромінювання – $22,7 \text{ кВт/м}^3$) впродовж 600 с – $91,3\%$ [6].

Застосування комбінації гідродинамічної кавітації (тиск на вході у кавітатор – $0,4 \text{ МПа}$) із реагентним обробленням (озон) впродовж 40 хв. для вилучення протизапального препарату напроксену зі стічних вод фармацевтичних підприємств забезпечило ступінь деградації напроксену 100% і зменшення величини ХСК на 40% . Подальше використання аеробного окиснення на активованому мулі зумовлювало зменшення величини ХСК ще на $49,5\%$, тобто загальне зменшення величини ХСК після застосування гідродинамічної кавітації, реагентного оброблення та аеробного окиснення становило $89,5\%$ [7].

Підвищення тиску на вході у гідродинамічний кавітатор від $3,5$ до $4,5 \text{ МПа}$ під час оброблення реакційної системи (водного розчину п-нітрофенолу з концентрацією 20 мг/л) супроводжувалося зменшенням результативності кавітації, яку визначали як відношення маси забруднювача, який піддається кавіта-

ційній деградації, до енергії, яка витрачається на здійснення цього процесу, на $9,3\%$ – від $8,6 \cdot 10^{-5}$ до $7,8 \cdot 10^{-5} \text{ мг п-нітрофенолу/Дж}$ [8].

Результативність кавітації залежить від конструктивних особливостей генераторів кавітації. Встановлено, що найефективнішим для кавітаційної деградації гідрофільних і гідрофобних сумішей, що містять тугоплавкі речовини, є застосування комбінації трубок Вентурі і пластин з отворами [9]. Виявлено, що для ступеня деградації толуену близько 80% результативність кавітації зростала у 8 разів (від $4,02 \cdot 10^{-3}$ до $32,2 \cdot 10^{-3} \text{ мг/Дж}$) під час переходу від пристрою з отворами до вихрового діюда [10]. Це зумовлено тим, що для виникнення кавітації у вихровому діюді необхідний значно менший перепад тиску, ніж за використання пристрою з отворами.

Отже, кавітація (акустична або гідродинамічна) як окремо, так і у комбінаціях із передовими процесами окиснення є основою вискоєфективних технологій очищення стічних вод від шкідливих органічних сполук. Наведені у різних джерелах дані щодо впливу технологічних параметрів (питомої потужності, тиску), реагентного режиму на ефективність очищення стічних вод від забруднювачів часто є суперечливими.

Тому **мета досліджень** полягала у вивченні впливу потужності ультразвукового випромінювання, тиску на вході у гідродинамічний струменевий кавітатор, реагентного режиму на ступінь кавітаційного очищення стічних вод від толуену як типового органічного розчинника, константу швидкості деградації толуену.

Експериментальна частина. Дослідження кавітаційної деградації толуену виконували на прикладі імітату стічних вод із вмістом толуену, який визначався його максимальною розчинністю у воді за температури $290 \pm 3 \text{ К}$. Для генерування кавітаційних явищ застосовували ультразвуковий випромінювач магнітострикційного типу «Ultrasonic Disintegrator UD-20» з частотою ультразвукових коливань 22 кГц і гідродинамічний кавітатор струменевого типу. З метою визначення раціонального енергетичного режиму кавітаційного оброблення імітату стічних вод змінювали питому потужність ультразвукового випромінювання від $53,3$ до $83,3 \text{ Вт/дм}^3$, а тиск на вході у гідродинамічний струменевий кавітатор – від $0,3$ до $0,39 \text{ МПа}$. Кількість сопел –

3 од., діаметр сопла – 2,6 мм. Умови виконання досліджень з кавітаційної деградації толуену – адіабатичні.

Під час комбінованого кавітаційно-реагентного оброблення мольне співвідношення становило, моль/дм³: толуен : H₂O₂ = 1:5.

Концентрацію толуену у воді визначали методом UV-Vis-спектроскопії на однопроменевому спектрофотометрі ULAB 102UV у діапазоні довжин хвиль 200...300 нм. Для толуену характерний максимум поглинання за довжини хвилі 261,7 нм. Товщина кварцових кювет – 10 мм, середовище порівняння – дистильована вода.

Ступінь деградації толуену (x, %) визначали за формулою

$$x = (C_0 - C) \cdot 100 / C_0, \quad (1)$$

де C_0 – початкова концентрація толуену у воді, моль/дм³;

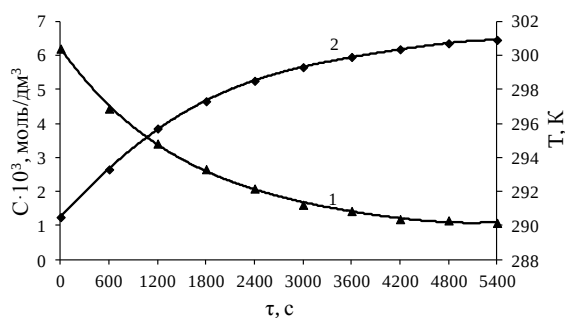
C – концентрація толуену у воді в момент часу τ , моль/дм³.

Оскільки процеси деградації (розкладу) найчастіше розглядають як реакції псевдопершого порядку, то константу швидкості деградації (k , с⁻¹) визначали за формулою

$$k = (1/\tau) \ln(C_0/C), \quad (2)$$

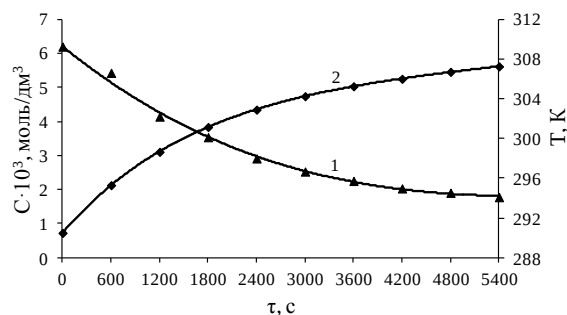
де τ – час, с.

Результати досліджень та їх обговорення. На рисунках 1, 2, 3 зображено залежності концентрації толуену ($C \cdot 10^3$, моль/дм³) (криві 1) і температури реакційної системи (Т, К) (криві 2) від тривалості кавітаційного оброблення (τ , с) за різних питомої потужності ультразвукового випромінювання і реагентного режиму.



Питома потужність ультразвукового випромінювання, Вт/дм³: 53,3

Рисунок 1 – Залежність концентрації толуену ($C \cdot 10^3$, моль/дм³) (крива 1) і температури реакційної системи (Т, К) (крива 2) від тривалості кавітаційного оброблення (τ , с)

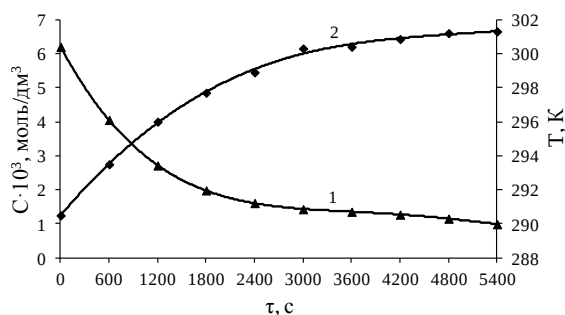


Питома потужність ультразвукового випромінювання, Вт/дм³: 83,3

Рисунок 2 – Залежність концентрації толуену ($C \cdot 10^3$, моль/дм³) (крива 1) і температури реакційної системи (Т, К) (крива 2) від тривалості кавітаційного оброблення (τ , с)

Збільшення питомої потужності ультразвукового випромінювання від 53,3 Вт/дм³ (рисунок 1) до 83,3 Вт/дм³ (рисунок 2) зумовило більший приріст температури реакційної системи внаслідок її кавітаційного оброблення (10,4 К проти 16,8 К відповідно). Однак ступінь деградації толуену внаслідок кавітаційного оброблення впродовж 5400 с при цьому зменшувався на 11,2 % – від 82,5 до 71,3 %. Наведене вище можна пояснити впливом двох факторів: 1) виникненням у рідині стабільних газових нанобульбашок (бабстонів), які не здатні рости до розмірів кавітаційних бульбашок (розміри ~ мкм) і сплескуватись з утворенням високореакційноздатних частинок (радикалів), що беруть безпосередню участь у процесах трансформації толуену; 2) специфічною структурою води в області фізіологічних температур (~ 308...314 К) відповідно до кінетичної теорії рідини Френкеля [6]. Як видно з рисунка 2, температура реакційної системи в діапазоні тривалості кавітаційного оброблення 2400...5400 с дуже близька до області фізіологічних температур, для якої характерна однаковість мас квазікристалічної і рідкої структур води та їх максимальна варіабельність. Відомо, що кавітаційні явища легше розвиваються у воді з рідкою структурою. Зважаючи на зазначене, істотне зниження ступеня деградації толуену за збільшення питомої потужності ультразвукового випромінювання є цілком закономірним.

Оскільки ступінь деградації толуену за меншої питомої потужності ультразвукового випромінювання був більшим, то її величина (53,3 Вт/дм³) була обрана за раціональну для подальших досліджень. Результати апробації комбінованої кавітаційно-реагентної технології очищення стічних вод від толуену зображено на рисунку 3.



Питома потужність ультразвукового випромінювання, Вт/дм³: 53,3;
Мольне співвідношення реагентів, моль/дм³:
толуен : H₂O₂=1:5

Рисунок 3 – Залежність концентрації толуену (С · 10³, моль/дм³) (крива 1) і температури реакційної системи (Т, К) (крива 2) від тривалості кавітаційно-реагентного оброблення (τ, с)

Прийнято температуру (10,8 К) реакційної системи і величина ступеня деградації толуену (84 %), у випадку комбінованого кавітаційно-реагентного оброблення незначно перевищують значення цих показників у випадку використання лише акустичної кавітації (10,4 К і 82,5 % відповідно). Це зумовлено додатковою кількістю радикалів (насамперед, гідроксильних та пероксидних), які утворюються внаслідок розкладу гідрогену пероксиду в кавітаційних полях.

Зміна ступеня деградації толуену за різних енергетичних та реагентних режимів кавітаційного оброблення добре узгоджується зі значеннями констант швидкості цього процесу (таблиця 1).

Таблиця 1 – Константи швидкості деградації толуену за різних енергетичних та реагентних режимів оброблення

Режим оброблення	Константа швидкості деградації толуену (к · 10⁴), с⁻¹
Кавітаційний безреагентний (питома потужність УЗ-випромінювання – 53,3 Вт/дм³)	5,6
Кавітаційний безреагентний (питома потужність УЗ-випромінювання – 83,3 Вт/дм³)	2,2
Комбінований кавітаційно-реагентний (питома потужність УЗ-випромінювання – 53,3 Вт/дм³)	7,1

Зафіксовано збільшення інтенсивності поглинання реакційною системою (А, відн. од.) за довжини хвилі 230 нм (таблиця 2).

Таблиця 2 – Інтенсивність поглинання реакційною системою за довжини хвилі 230 нм за різних енергетичних і реагентних режимів оброблення

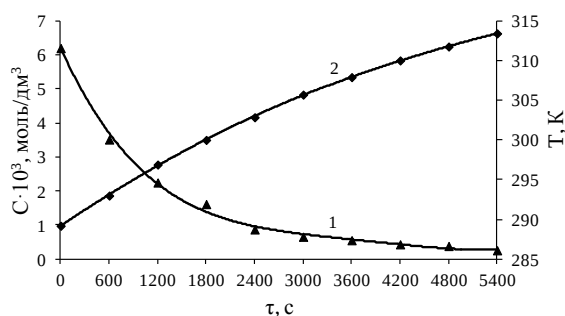
Режим оброблення	Тривалість оброблення, с	А, відн. од.
Кавітаційний безреагентний (питома потужність УЗ-випромінювання – 53,3 Вт/дм³)	0	0,040
	600	0,040
	1200	0,043
	1800	0,045
	2400	0,047
	3000	0,049
	3600	0,051
	4200	0,052
	4800	0,055
Кавітаційний безреагентний (питома потужність УЗ-випромінювання – 83,3 Вт/дм³)	0	0,040
	600	0,064
	1200	0,067
	1800	0,076
	2400	0,076
	3000	0,082
	3600	0,088
	4200	0,092
	4800	0,096
Комбінований кавітаційно-реагентний (питома потужність УЗ-випромінювання – 53,3 Вт/дм³)	0	0,040
	600	0,043
	1200	0,050
	1800	0,054
	2400	0,060
	3000	0,062
	3600	0,062
	4200	0,070
	4800	0,071
Комбінований кавітаційно-реагентний (питома потужність УЗ-випромінювання – 83,3 Вт/дм³)	0	0,040
	600	0,043
	1200	0,050
	1800	0,054
	2400	0,060
	3000	0,062
	3600	0,062
	4200	0,070
	4800	0,071

Інтенсивність поглинання помітно зростала (на 80 % – від 0,040 до 0,072 відн. од.) внаслідок додавання гідрогену пероксиду до реакційної системи, яка містила толуен. Збільшення питомої потужності ультразвукового випромінювання від 53,3 до 83,3 Вт/дм³ спричиняло й істотніше зростання інтенсивності поглинання реакційною системою (на 45 і 143 % відповідно). Також виявлено істотне

збільшення інтенсивності поглинання за таких довжин хвиль: 275, 280, 285 і 290 нм.

Ймовірно, зазначене зумовлено накопиченням у реакційній системі бензойної кислоти – продукту кавітаційної трансформації (окиснення) толуену, для УФ-спектра водного розчину якої характерні максимуми поглинання за довжин хвиль 230 і 275 нм [11]. Утворення бензойної кислоти, бензальдегіду та фенолу спостерігали також під час фотокаталітичного окиснення толуену [12]. Наявність цих інтермедіатів зафіксовано методом газової хроматографії/мас-спектрометрії.

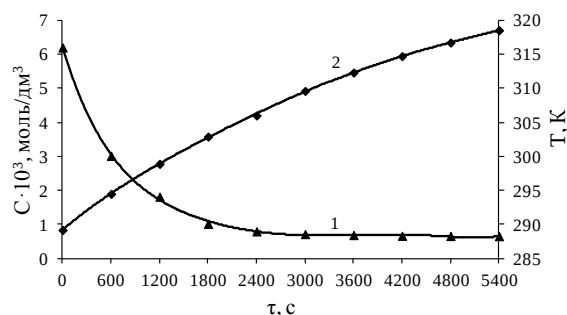
На рисунках 4, 5, 6 зображено залежності концентрації толуену ($C \cdot 10^3$, моль/дм³) (криві 1) і температури реакційної системи (Т, К) (криві 2) від тривалості її оброблення у гідродинамічному струменевому кавітаторі (τ , с) за різних тиску на вході у кавітатор і реагентного режиму.



Тиск на вході у кавітатор, МПа: 0,3

Рисунок 4 – Залежність концентрації толуену ($C \cdot 10^3$, моль/дм³) (крива 1) і температури реакційної системи (Т, К) (крива 2) від тривалості її оброблення у гідродинамічному кавітаторі (τ , с)

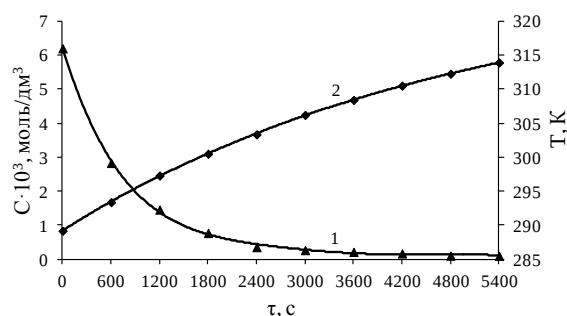
Як і у випадку акустичної кавітації, збільшення тиску на вході у гідродинамічний кавітатор від 0,3 (рисунок 4) до 0,39 МПа (рисунок 5) зумовило більший приріст температури реакційної системи внаслідок її кавітаційного оброблення впродовж 5400 с – 24,2 К проти 29,3 К відповідно. При цьому ступінь деградації толуену зменшувався на 6,4 % – від 95,8 до 89,4 %. Ймовірно, це зумовлено збільшенням швидкості рекомбінації утворених радикалів внаслідок суттєвого зростання їх концентрації і, як наслідок, зменшенням частки радикалів, які беруть участь у трансформації толуену.



Тиск на вході у кавітатор, МПа: 0,39

Рисунок 5 – Залежність концентрації толуену ($C \cdot 10^3$, моль/дм³) (крива 1) і температури реакційної системи (Т, К) (крива 2) від тривалості її оброблення у гідродинамічному кавітаторі (τ , с)

Отже, раціональне значення тиску на вході у гідродинамічний кавітатор, за якого досягали максимального ступеня деградації толуену, становило 0,3 МПа. Цю величину й було обрано для досліджень ефективності комбінованої кавітаційно-реагентної технології деградації толуену (рисунок 6).



Тиск на вході у кавітатор, МПа: 0,3;
Мольне співвідношення реагентів, моль/дм³:
толуен : H₂O₂ = 1:5

Рисунок 6 – Залежність концентрації толуену ($C \cdot 10^3$, моль/дм³) (крива 1) і температури реакційної системи (Т, К) (крива 2) від тривалості її кавітаційно-реагентного оброблення у гідродинамічному кавітаторі (τ , с)

У випадку сумісного застосування гідродинамічної кавітації (тиск на вході у кавітатор – 0,3 МПа) і гідрогену пероксиду спостерігали незначне збільшення приросту температури (24,7 К) реакційної системи і величини ступеня деградації толуену (98,3 %) порівняно із використанням тільки гідродинамічної кавітації.

Значення констант швидкості деградації толуену за різних енергетичних і реагент-

них режимів оброблення імітату стічних вод у гідродинамічному кавітаторі наведено у таблиці 3.

Таблиця 3 – Константи швидкості деградації толуену за різних енергетичних і реагентних режимів оброблення імітату стічних вод у гідродинамічному кавітаторі

Режим оброблення	Константа швидкості деградації толуену ($k \cdot 10^4$), s^{-1}
Кавітаційний безреагентний (тиск на вході у кавітатор – 0,3 МПа)	9,5
Кавітаційний безреагентний (тиск на вході у кавітатор – 0,39 МПа)	12,0
Комбінований кавітаційно-реагентний (тиск на вході у кавітатор – 0,3 МПа)	13,1

Неузгодженість значень констант швидкості за різних значень тиску на вході у гідродинамічний кавітатор ($9,5 \cdot 10^{-4} s^{-1}$ за тиску 0,3 МПа і $12 \cdot 10^{-4} s^{-1}$ за тиску 0,39 МПа) із величиною ступеня очищення за цих же значень тиску (95,8 % за тиску 0,3 МПа і 89,4 % за тиску 0,39 МПа) можна пояснити тим, що константу швидкості традиційно розраховують на основі значень концентрації, які знаходяться на прямолинійній ділянці залежності концентрації толуену від часу кавітаційного оброблення.

Також зафіксовано збільшення інтенсивності поглинання реакційною системою (А, відн. од.) за довжин хвиль: 275, 280, 285 і 290 нм. Найбільш яскраво це виражено для реакційної системи «толуен-гідрогену пероксид» (таблиця 4). Аналогічно до досліджень з акустичною кавітацією, збільшення інтенсивності поглинання за вищезазначених довжин хвиль переконливо свідчить про утворення інтермедиату – бензойної кислоти. Однак необхідно підкреслити, що за довжини хвилі 230 нм у випадку застосування гідродинамічної кавітації зміна інтенсивності поглинання реакційною системою в часі має екстремальний характер із мінімумом за тривалості оброблення 4200 с.

Таблиця 4 – Інтенсивність поглинання реакційною системою «толуен-гідрогену пероксид» за тиску на вході у кавітатор 0,3 МПа і різних довжин хвиль

Довжина хвилі, нм	Тривалість оброблення, с	А, відн. од.
275	0	0,041
	600	0,043
	1200	0,047
	1800	0,049
	2400	0,050
	3000	0,050
	3600	0,051
	4200	0,051
	4800	0,051
280	5400	0,052
	0	0,030
	600	0,031
	1200	0,033
	1800	0,034
	2400	0,035
	3000	0,037
	3600	0,039
	4200	0,042
285	4800	0,045
	5400	0,047
	0	0,027
	600	0,030
	1200	0,033
	1800	0,035
	2400	0,037
	3000	0,037
	3600	0,040
290	4200	0,042
	4800	0,043
	5400	0,044
	0	0,026
	600	0,029
	1200	0,031
	1800	0,033
	2400	0,033
	3000	0,035
	3600	0,037
	4200	0,039
	4800	0,041
	5400	0,041

Порівняння констант швидкості деградації толуену (таблиці 1, 3) і ступенів деградації (рисунки 3, 6) для комбінованих технологій (акустична кавітація+H₂O₂; гідродинамічна кавітація+H₂O₂) свідчить, що гідродинамічна кавітація є ефективнішою, ніж акустична.

Висновки:

1. Збільшення питомої потужності ультразвукового випромінювання від 53,3 до 83,3 Вт/дм³ зумовило зменшення ступеня деградації толуену на 11,2 % (від 82,5 до 71,3 %), а константи швидкості – у 2,5 разу (від $5,6 \cdot 10^{-4}$ до $2,2 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹), що можна пояснити двома факторами: утворенням бабстонів і зміною структури рідини відповідно до кінетичної теорії Френкеля.

2. Застосування комбінованої технології (акустична кавітація+гідрогену пероксид) дало змогу підвищити ступінь деградації толуену до 84 %, а величину константи швидкості – на 26,8 % (від $5,6 \cdot 10^{-4}$ до $7,1 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹).

3. Збільшення тиску на вході у гідродинамічний кавітатор від 0,3 до 0,39 МПа спричинило зменшення ступеня деградації толуену на 6,4 % (від 95,8 до 89,4 %), що зумовлено збільшенням швидкості рекомбінації утворених радикалів внаслідок суттєвого зростання їх концентрації і, як наслідок, зменшенням частки радикалів, які беруть участь у трансформації толуену.

4. Комбінація гідродинамічної кавітації і реагентного оброблення (гідрогену пероксид) дала змогу підвищити ступінь деградації толуену на 2,5 % (від 95,8 до 98,3 %).

5. Порівняння констант швидкості деградації толуену і ступенів деградації для комбінованих технологій (акустична кавітація+H₂O₂; гідродинамічна кавітація+H₂O₂) свідчить, що гідродинамічна кавітація є значно ефективнішою, ніж акустична.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення впливу різних окисників (зокрема, реактиву Фентона, натрію гіпохлориту), мольного співвідношення забруднювач: окисник на ступінь деградації органічних сполук.

Публікація містить результати досліджень, проведених за грантом Президента України за конкурсним проектом (реєстраційний номер проекту Ф82/43168; договір Ф82/220-2019 від 28.10.2019 р.).

Список використаних джерел

[1] Ю. В. Сухацький, та З. О. Знак, "Флотація як стадія кавітаційно-флотаційної технології очищення водних гетерогенних середовищ від дисперсних твердих

частинок та органічних сполук", *Хімія, технологія речовин та їх застосування*, вип. 2, № 1, с. 53-58, 2019.

doi: 10.23939/ctas2019.01.053.

[2] Ю. В. Сухацький, "Дослідження ефективності кавітаційно-флотаційної технології очищення рідкофазних середовищ від дисперсних частинок", *Науковий вісник НЛТУ України*, вип. 26.4, с. 295-303, 2016.

[3] G. Thoma, M. Gleason, and V. Popov, "Sonochemical treatment of benzene/toluene contaminated wastewater", *Environmental Progress*, vol. 17, no. 3, pp. 154-160, 1998.

[4] P. R. Gogate, and P. N. Patil, "Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes". *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 25, pp. 60-69, 2015. doi: 10.1016/j.ultsonch.2014.08.016.

[5] L. P. Ramteke, and P. R. Gogate, "Treatment of toluene, benzene, naphtalene and xylene (BTNXs) containing wastewater using improved biological oxidation with pretreatment using Fenton/ultrasound based processes", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 28, pp. 247-260, 2015. doi: 10.1016/j.jiec.2015.02.022.

[6] Z. O. Znak, Yu. V. Sukhatskiy, O. I. Zin et al., "The decomposition of the benzene in cavitation fields", *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, no. 1 (116), pp. 72-77, 2018.

[7] P. Thanekar, S. Garg, and P. R. Gogate, "Hybrid treatment strategies based on hydrodynamic cavitation, advanced oxidation processes, and aerobic oxidation for efficient removal of naproxen", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019. doi: 10.1021/acs.iecr.9b01395.

[8] M. Prisciandaro, M. Capocelli, A. Lancia et al., "On the comparison and the synergistic effect of chemical AOP and hydrodynamic cavitation", *Chemical Engineering Transactions*, vol. 39, pp. 1783-1788, 2014. doi: 10.3303/CET1439298.

[9] Z.-Y. Dong, K. Zhang, and R.-H. Yao, "Degradation of refractory pollutants by hydrodynamic cavitation: key parameters to degradation rates". *Journal of Hydrodynamics*, vol. 31 (4), 2018. doi: 10.1007/s42241-018-0131-5.

- [10] P. G. Suryawanshi, V. M. Bhandari, L. G. Sorokhaibam et al., "Solvent degradation studies using hydrodynamic cavitation", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 295-304, 2018. doi: 10.1002/ep.12674.
- [11] А. Н. Теплых, и Е. А. Илларионова, "Количественное определение метронидазола спектрофотометрическим методом", *Сибирский медицинский журнал*, № 5, с. 48-50, 2009.
- [12] L. Qiu, Y. Wang, H. Li et al., "Photocatalytic oxidation of toluene on fluorine doped TiO₂/SiO₂ catalyst under simulant sunlight in a flat reactor", *Catalysts*, vol. 8 (12), pp. 596-607, 2018. doi: 10.3390/catal8120596.
- References**
- [1] Yu. V. Sukhatskiy, and Z. O. Znak, "Flotation as a stage of cavitation-flotation technology for the treatment of aqueous heterogeneous media from dispersive solids and organic compounds", *Khimiia, tekhnolohiia rehovyn ta yikh zastosuvannia*, vol. 2, no. 1, pp. 53-58, 2019 [in Ukrainian]. doi: 10.23939/ctas2019.01.053.
- [2] Yu. V. Sukhatskiy, "The study of the efficiency of cavitation-flotation technology of the liquid phase media purification from dispersed particles". *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, vol. 26.4, pp. 295-303, 2016 [in Ukrainian].
- [3] G. Thoma, M. Gleason, and V. Popov, "Sonochemical treatment of benzene/toluene contaminated wastewater", *Environmental Progress*, vol. 17, no. 3, pp. 154-160, 1998.
- [4] P. R. Gogate, and P. N. Patil, "Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes". *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 25, pp. 60-69, 2015. doi: 10.1016/j.ultsonch.2014.08.016.
- [5] L. P. Ramteke, and P. R. Gogate, "Treatment of toluene, benzene, naphtalene and xylene (BTNXs) containing wastewater using improved biological oxidation with pretreatment using Fenton/ultrasound based processes", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 28, pp. 247-260, 2015. doi:10.1016/j.jiec.2015.02.022.
- [6] Z. O. Znak, Yu. V. Sukhatskiy, O. I. Zin et al., "The decomposition of the benzene in cavitation fields", *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, no. 1 (116), pp. 72-77, 2018.
- [7] P. Thanekar, S. Garg, and P. R. Gogate, "Hybrid treatment strategies based on hydrodynamic cavitation, advanced oxidation processes, and aerobic oxidation for efficient removal of naproxen", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019. doi: 10.1021/acs.iecr.9b01395.
- [8] M. Prisciandaro, M. Capocelli, A. Lancia et al., "On the comparison and the synergistic effect of chemical AOP and hydrodynamic cavitation", *Chemical Engineering Transactions*, vol. 39, pp. 1783-1788, 2014. doi: 10.3303/CET1439298.
- [9] Z.-Y. Dong, K. Zhang, and R.-H. Yao, "Degradation of refractory pollutants by hydrodynamic cavitation: key parameters to degradation rates". *Journal of Hydrodynamics*, vol. 31 (4), 2018. doi: 10.1007/s42241-018-0131-5.
- [10] P. G. Suryawanshi, V. M. Bhandari, L. G. Sorokhaibam et al., "Solvent degradation studies using hydrodynamic cavitation", *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 295-304, 2018. doi: 10.1002/ep.12674.
- [11] А. Н. Теплых, and Е. Н. Илларионова, "Quantification of metronidazole by spectrophotometric method", *Sibirskij medicinskij zhurnal*, no. 5, pp. 48-50, 2009 [in Russian].
- [12] L. Qiu, Y. Wang, H. Li et al., "Photocatalytic oxidation of toluene on fluorine doped TiO₂/SiO₂ catalyst under simulant sunlight in a flat reactor", *Catalysts*, vol. 8 (12), pp. 596-607, 2018. doi: 10.3390/catal8120596.

Yu. V. Suchatskiy, Ph. D., senior researcher,
Z. O. Znak, D. Sc., professor,
S. M. Kapatsila, student,
I. B. Sadova, student

Lviv Polytechnic National University
S. Bandery str. 12, Lviv, 79013, Ukraine

CAVITATION IN COMBINED TECHNOLOGIES OF WASTEWATER TREATMENT FROM TOLUENE

The use of acoustic and hydrodynamic cavitation and their combinations with other methods (reagent treatment – hydrogen peroxide, Fenton reagent, ozone, etc.) for wastewater treatment from dispersed solids and organic compounds is analyzed. The feasibility of combining cavitation with reagent treatment to increase the degree of pollutant degradation has been demonstrated. A characteristics of the spectroscopy method in ultraviolet and visible spectral ranges is given to determine the concentration of toluene in wastewater imitation. The dependences of toluene concentration and the reaction system temperature on the duration of cavitation treatment at different values of the specific power of ultrasonic radiation, the pressure at the entrance to hydrodynamic cavitator, different reagent modes are presented. The degree of toluene degradation and the rate constant of this process for different parameters of cavitation processing are calculated. It is found that an increase in the specific power of ultrasonic radiation from 53.3 to 83.3 W/dm³ has caused a decrease in the degree of toluene degradation by 11.2 % (from 82.5 to 71.3 %), and the rate constant by 2.5 times (from $5.6 \cdot 10^{-4}$ to $2.2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), which is explained by two factors: the formation of Babstones and the change in the structure of the fluid according to Frenkel's kinetic theory. It is established that the use of combined technology (acoustic cavitation + hydrogen peroxide) allows to increase the rate of toluene degradation from 82.5 to 84 % and the rate constant by 26.8 % (from $5.6 \cdot 10^{-4}$ to $7.1 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$). It is determined that the combination of hydrodynamic cavitation and reagent treatment (hydrogen peroxide) allows to increase the rate of toluene degradation by 2.5 % (from 95.8 to 98.3 %). By comparing the rate constants of toluene degradation and the degradation rates for combined technologies (acoustic cavitation + H₂O₂; hydrodynamic cavitation + H₂O₂), it is found that hydrodynamic cavitation is much more efficient than acoustic one.

Keywords: cavitation, ultrasonic radiation, hydrodynamic cavitator, toluene, hydrogen peroxide, benzoic acid, combined technologies.