

УДК 547.532:620.193.16

З.О. Знак, Ю.В. Сухацький, О.І. Зінь, С.В. Хом'як, Р.В. Мних, А.В. Лисенко

РОЗКЛАД БЕНЗОЛУ В КАВІТАЦІЙНИХ ПОЛЯХ

Національний університет "Львівська політехніка"

Авторами здійснено дослідження процесу кавітаційного розкладу бензолу під дією акустичних коливань ультразвукового діапазону. На основі аналізу осцилограм акустичного сигналу виявлено збільшення амплітуди звукового тиску кавітаційних полів, генерованих в імітаті стічних вод, що містив бензол, в 1,6 рази, порівняно із водою. Встановлено екстремальний характер залежності ступеня розкладу бензолу від питомої потужності кавітаційного оброблення із максимумом для стаціонарного режиму за питомої потужності 68 кВт/м³, для режиму ініціювання реакції – за 22,7 кВт/м³. Показано доцільність застосування режиму ініціювання реакції для суттєвого зменшення енерговитрат на процес розкладу бензолу в кавітаційних полях. Зафіксовано аномально низький ступінь розкладу бензолу за температури 313 К, що може бути пояснено витратанням енергії, підведеної до системи, на формування стабільних газових нанобульбашок (бабстонів), а також максимальною варіабельністю структур води відповідно до кінетичної теорії рідини Френкеля. Із використанням методу графічного диференціювання визначено, що процес розкладу бензолу в кавітаційних полях відбувається як реакція псевдопершого порядку. Наведено значення констант швидкості процесу розкладу бензолу.

Ключові слова: кавітація, розклад, бензол, стаціонарний режим, ініціювання реакції; бабстон.

Вступ

Стічні води хімічних і нафтохімічних підприємств містять велику кількість ароматичних сполук, як моно- (бензол, толуол, фенол, крезол), так і поліциклічних (нафтаден, антрацен, фенантрен, пірен тощо). Такі сполуки виявляють канцерогенну, мутагенну і тератогенну дію на живі організми. Їх здатність до біодеградації незначна і закономірно зменшується зі збільшенням кількості бензольних кілець у структурі [1].

Адсорбційні методи очищення стічних вод від ароматичних сполук характеризуються високою вартістю, складністю та матеріалоємністю. Окиснення ароматичних вуглеводнів озonom і сполуками Хлору часто призводить до утворення продуктів, які є більш токсичними, ніж вихідні вуглеводні. Тому на сьогодні значні перспективи для широкого впровадження у технології водоочищення мають передові процеси окиснення, до яких належать, зокрема, ультразвукова і гідродинамічна кавітація [1–4].

У кавітаційних полях внаслідок сонолізу молекул води генеруються високореакційно-

здатні сполуки, зокрема гідроксильні радикали [5], які й роблять найбільший внесок у процеси розкладу та окиснення ароматичних сполук. Поліциклічні сполуки під дією кавітації розкладаються на фрагменти з меншою кількістю бензольних кілець, а розклад моноциклічних сполук (наприклад, бензолу) супроводжується дециклізацією – розкриттям бензольного кільця з утворенням бірадикалу [6].

Ефективність розкладу ароматичних сполук визначається, насамперед, інтенсивністю розвитку кавітаційних явищ, яку оцінюють на основі енергетичних характеристик, – витрат енергії на створення, розвиток кавітаційної зони, питомих енерговитрат і величини теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації. Для досягнення оптимального режиму кавітаційного оброблення необхідно враховувати як технологічні параметри процесу (для гідродинамічної кавітації – величину тиску на вході у кавітатор), так і конструктивні особливості генераторів кавітації (їх форму, розміри, кількість, просторове розміщення тощо) [1,3,4,7–10]. Так, максимального ступеня розкладу метилоранжу в кавіта-

ційних полях, що становив 90,5%, досягнули за тиску на вході у кавітатор 0,4 МПа, температури реакційної системи 308 К, концентрації окисника (хлору(IV) оксиду) 8 мг/дм³ і тривалості оброблення 5400 с [4]. Відомі також дослідження процесу кавітаційного розкладу антрацену і фенантрени. За тиску на вході у кавітатор 0,7 МПа, що відповідав числу кавітації 0,32, початкової концентрації антрацену і фенантрени у розчинах 5 мкг/дм³, тривалості кавітаційного оброблення 1800 с ступінь розкладу антрацену і фенантрени становив відповідно 93 і 95% [1].

Робота присвячена дослідженню процесу кавітаційного розкладу бензолу під дією акустичних випромінювань ультразвукового діапазону і встановленню кінетичних та енергетичних закономірностей цього процесу.

Експериментальна частина

Дослідження процесу розкладу бензолу в кавітаційних полях за ізотермічних умов здійснювали на прикладі імітату стічних вод зі вмістом бензолу, який лімітувався максимальною розчинністю бензолу у воді за певної температури, (моль бензолу)/(м³ води): за 303 К – 8,37; за 313 К – 7,26; за 323 К – 6,63. Ізотермічність процесу забезпечували ультратермостатом UTU-4 із виносною термостатувальною ванною.

Як генератор акустичної кавітації застосовували ультразвуковий випромінювач магнітотриктичного типу "Ultrasonic Disintegrator UD-20"; частота випромінювання – 22 кГц. З метою встановлення мінімальної тривалості кавітаційного оброблення, необхідної для розкладу бензолу, процес здійснювали у двох режимах: стаціонарному (постійне збудження кавітації упродовж 30 хв за сталих параметрів оброблення – частоти ультразвукових коливань і питомої потужності генератора ультразвуку) і режимі ініціювання реакції (збудження кавітаційних полів упродовж лише певного проміжку часу (10 хв) з подальшим визначенням концентрації бензолу в імітаті без їх дії). Для визначення раціонального енергетичного режиму процесу розкладу бензолу в кавітаційних полях змінювали питому потужність кавітаційного оброблення (53,3; 61,3; 68; 73,3; 83,3 кВт/м³). Концентрацію бензолу в імітаті визначали методом UV/Viz-спектроскопії на двопробеному спектрофотометрі SPECORD M40 Carl Zeiss JENA з використанням кварцових кювет товщиною 10 мм у діапазоні довжин хвиль 200÷400 нм.

Порівняння розвитку кавітаційних полів у двох реакційних системах (воді та імітаті стічних вод, який містив бензол) виконували на основі результатів сонохімічного аналізу (осцилограм

звукового сигналу та спектрів частот). Характеристики звукових сигналів визначали за допомогою сферичного гідрофона типу 8105, комутованого з персональним комп'ютером через аналогово-цифровий перетворювач. Графічну інтерпретацію результатів здійснювали за допомогою спеціалізованого програмного продукту для запису та редагування звукових файлів Adobe Audition 1.5 [11].

Кінетичні характеристики процесу розкладу бензолу в кавітаційних полях (порядок реакції та константу швидкості) визначали методом графічного диференціювання.

Результати та їх обговорення

Залежність концентрації бензолу в імітаті від тривалості кавітаційного оброблення за ізотермічних умов для стаціонарного режиму та режиму ініціювання реакції наведено на рис. 1, 2, відповідно.

Отримані дані (рис. 1, 2) свідчать про те, що за однакових температур зміна концентрації бензолу як у стаціонарному режимі, так і режимі ініціювання в часі відбувається за схожими залежностями. За температури 323 К швидкість процесу є дещо нижчою, ніж за 303 К (таблиця). Однак за температури 313 К швидкість процесу є на порядок нижчою, ніж у двох попередніх випадках. Така аномалія була підтверджена паралельними дослідженнями не тільки за вказаної, але й інших питомих потужностей ультразвукового випромінювання.

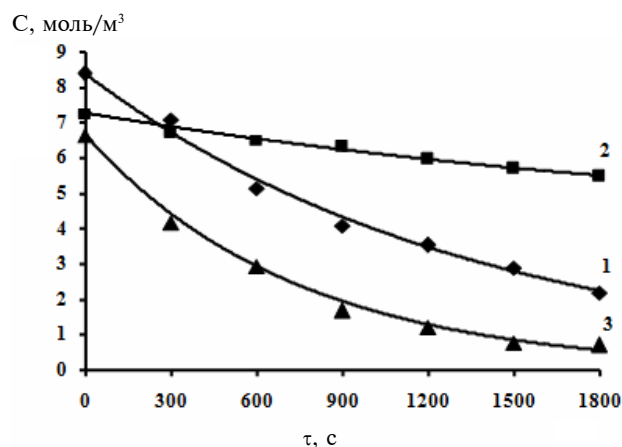


Рис. 1. Залежність концентрації бензолу (C , моль/м³) в імітаті стічних вод від часу (τ , с) у стаціонарному режимі збудження кавітації за температури реакційної системи, К: (1) 303; (2) 313; (3) 323

Значення констант швидкості процесу розкладу бензолу в режимі ініціювання реакції приблизно у 2,2÷2,4 рази більші від аналогічних для стаціонарного режиму, що добре узгоджується

із результатами досліджень, наведених у [7].

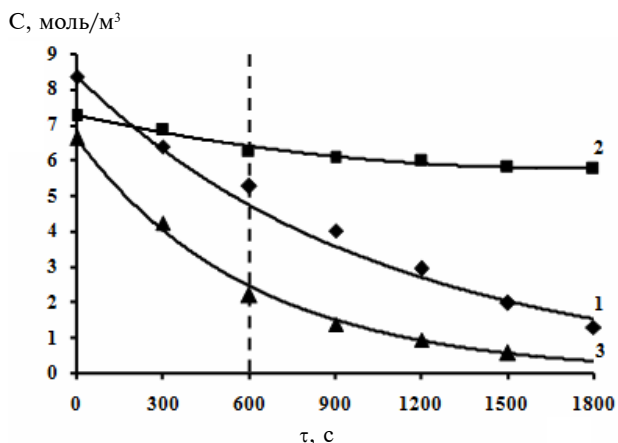


Рис. 2. Залежність концентрації бензолу (C , моль/м³) в імітаті стічних вод від часу (τ , с) в режимі ініціювання реакції впродовж 600 с за температури реакційної системи, К: (1) 303; (2) 313; (3) 323

Значення констант швидкості процесу розкладу бензолу в стаціонарному та режимі ініціювання реакції за різних температур кавітаційного оброблення

Температура, К	Константа швидкості $k \cdot 10^4, \text{с}^{-1}$	
	у стаціонарному режимі збудження кавітації	у режимі ініціювання реакції
303	7,94	17,4
313	0,28	0,64
323	6,76	15,9

Для зафіксованих аномально низьких значень константи швидкості процесу й відповідно ступеня розкладу бензолу за температури 313 К і однакової тривалості процесу 1800 с (для стаціонарного режиму 24,8% (рис. 1), для режиму ініціювання реакції 20,7% (рис. 2)) запропоновано такі два пояснення: перше – витратою енергії, підведеної до системи у вигляді акустичних коливань ультразвукового діапазону, на перебіг побічних процесів, зокрема утворення бабстонів; друге – специфічною структурою води відповідно до кінетичної теорії рідини Френкеля.

Бабстони – це стабільні газові нанобульбашки. Дифузійна і механічна стійкість бабстонів та їх кластерів [13] унеможлиблює подальше зростання цих утворень з формуванням кавітаційних бульбашок мікронних розмірів, здатних до сплескування з високими градієнтами тиску і температури. Отже, частка високоактивних реакційноздатних сполук (радикалів), які беруть участь у процесі кавітаційного розкладу й окис-

нення бензолу, зменшується. За подальшого підвищення температури до 323 К кластерні утворення руйнуються [14], що істотно полегшує розвиток кавітаційних явищ і сприяє суттєвому пришвидшенню процесу та збільшенню ступеня розкладу бензолу: до 89,3% – для стаціонарного режиму і до 91,1% – для режиму ініціювання реакції.

Відповідно до кінетичної теорії рідини Френкеля вода у рідкому стані існує одночасно у вигляді двох рівноважних фаз – рідкої і квазікристалічної за аналогією з квазікристалами, кристалічна решітка яких володіє осями симетрії різних порядків і для якої характерна впорядкованість у взаємному розташуванні атомів і молекул. В області фізіологічних температур 308–314 К вода досягає такого стану, за якого маси квазікристалічної і рідкої води однакові, а здатність однієї структури переходити в іншу (варіабельність) є максимальною [15]. Зі збільшенням температури частка рідкої води, для якої характерні теплові флуктуації молекул, зростає, і, відповідно, зростає імовірність утворення нових зародків кавітації. Внаслідок цього зі збільшенням температури швидкість кавітаційного розкладу бензолу зростає.

Цікавим, як з теоретичної, так і практичної точок зору є виявлений позитивний ефект здійснення процесу розкладу бензолу не в стаціонарному режимі, як можна було очікувати, а у режимі ініціювання процесу.

Ці результати можна пояснити на підставі порівняльного сонохімічного аналізу інтенсивності розвитку кавітаційних полів у воді та імітаті стічних вод, що містив бензол, наведеного на рис. 3.

З осцилограм акустичного сигналу кавітаційних полів видно, що за встановленого режи-

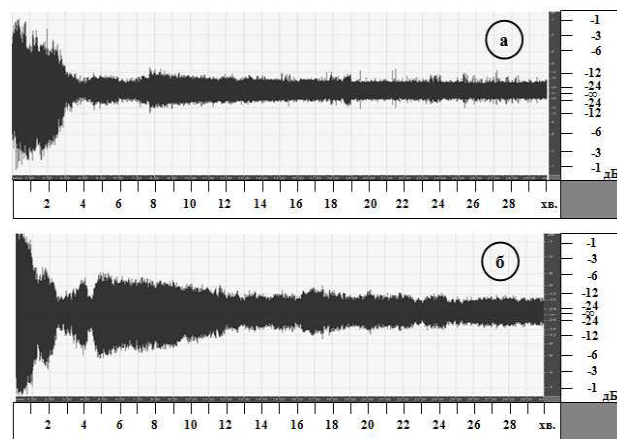


Рис. 3. Осцилограма акустичного сигналу кавітаційних полів у (а) воді, (б) імітаті стічних вод, що містив бензол

му кавітаційного оброблення величина акустичного сигналу в імітаті (рис. 1,б) є на 4 дБ вищою, ніж у воді (рис. 1,а), і становить -16 і -20 дБ, відповідно. Це відповідає збільшенню величини амплітуди звукового тиску в 1,6 раз. Тобто кавітаційні поля за присутності бензолу є більш розвиненими. Вищезазначене можна пояснити меншою температурою кипіння бензолу, порівняно з водою, і нижчими реологічними характеристиками (густиною, в'язкістю). Отже, присутність бензолу сприяє утворенню нових зародків кавітації, а відтак інтенсифікує процеси сплескування кавітаційних бульбашок з виділенням енергії. Вона, своєю чергою, сприяє сонолізу води з утворенням численних продуктів з окисними властивостями, а також деструкції та окисненню бензолу.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що внаслідок збудження кавітації впродовж певного часу (режим ініціювання) у водно-бензольному середовищі ініціюються радикальні процеси, що відбуваються за ланцюговим механізмом. Зокрема, встановлено, що процес розкладу бензолу в кавітаційних полях відбувається як реакція псевдопершого порядку, що характерно для радикальних процесів.

Здійснення процесу розкладу бензолу в режимі ініціювання дає змогу істотно зменшити енерговитрати на здійснення процесу. Залежність ступеня розкладу бензолу від питомої потужності кавітаційного оброблення за температури реакційної системи 303 К наведена на рис. 4. Ця залежність має екстремальний характер із максимумом для стаціонарного режиму за питомої потужності 68 кВт/м^3 , для режиму ініціювання реакції – за $22,7 \text{ кВт/м}^3$ (рис. 4).

Екстремальний характер залежності ступеня розкладу бензолу від питомої потужності кавітаційного оброблення для обох режимів свідчить про утворення у реакційній системі за величин питомої потужності, більших від наведених вище, агрегатів кавітаційних бульбашок та їх похідних [12], тобто розвиток явища “виродженої кавітації”, для якого характерна наявність бульбашок з “великою тривалістю життя” і розмірами більшими або меншими від критичних, що не сплескуються. Зафіксоване значення резонансної частоти компонент кавітаційних полів 13 кГц вказує на наявність у реакційній системі агрегатів похідних кавітаційних бульбашок з розмірами $\sim 0,25 \text{ мм}$ [11]. Здійснення процесу кавітаційного розкладу бензолу за визначеної раціональної питомої потужності і температури 303 К в режимі ініціювання

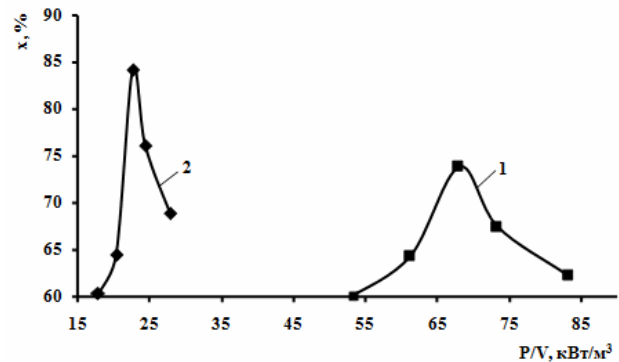


Рис. 4. Залежність ступеня розкладу бензолу (x , %) від питомої потужності кавітаційного оброблення (P/V , кВт/м^3) для (1) – стаціонарного режиму (тривалість кавітаційного оброблення 1800 с), (2) режиму ініціювання реакції (тривалість кавітаційного оброблення 600 с)

реакції дає змогу досягнути значно більшого ступеня розкладу ($84,2\%$), порівняно зі стаціонарним режимом оброблення ($73,8\%$), за одночасного зменшення тривалості кавітаційного оброблення в 3 рази. Тобто енерговитрати на процес розкладу бензолу можна істотно зменшити, ініціювавши процес кавітаційного сонолізу молекул води. Далі процес розкладу бензолу розвивається, як зазначено вище, як “ланцюговий” без накладання кавітаційних полів.

Висновки

На основі аналізу джерел інформації встановлено ефективність застосування акустичної та гідродинамічної кавітації для розкладу ароматичних сполук, як моно-, так і поліциклічних. Запропоновано здійснювати процес розкладу бензолу в кавітаційних полях, генерованих ультразвуковим магнітострикційним випромінювачем.

Виявлено екстремальний характер залежності ступеня розкладу бензолу від питомої потужності кавітаційного оброблення із максимумом для стаціонарного режиму за питомої потужності 68 кВт/м^3 , для режиму ініціювання реакції – за $22,7 \text{ кВт/м}^3$, що вказує на розвиток явища “виродженої кавітації”. Отже, енерговитрати на процес розкладу бензолу можна істотно зменшити, ініціювавши процес сонолізу молекул води. Як наслідок, розклад бензолу відбувається за радикальним механізмом як ланцюговий процес.

Зафіксовано аномально низький ступінь розкладу бензолу за температури 313 К як для стаціонарного ($24,8\%$), так і режиму ініціювання реакції ($20,7\%$), що може бути пояснено утворенням у системі стабільних газових бульба-

шок нанорозмірів (бабстонів) та їх кластерів. За цієї ж температури відповідно до кінетичної теорії рідини Френкеля маси квазікристалічної і рідкої води приблизно однакові, а варіабельність структур максимальна, що суттєво ускладнює розвиток кавітаційних явищ.

Розклад бензолу в кавітаційних полях відбувається як реакція псевдопершого порядку, а константи швидкості процесу в режимі ініціювання реакції є приблизно у 2,2÷2,4 рази більші від констант швидкості в стаціонарному режимі кавітаційного оброблення. Тому з метою забезпечення енергоефективності процесу розклад бензолу доцільно здійснювати у режимі ініціювання реакції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Szulzyk-Cieplak J.* Removal of hardly bio-degradable organic compounds from wastewater by means of reagentless methods // *Journal of Ecological Engineering*. – 2017. – Vol.18. – No. 5. – P.63-71.
2. *Gogate P.R., Tayal R.K., Pandit A.B.* Cavitation: a technology on the horizon // *Current Science*. – 2006. – Vol.91. – No. 1. – P.35-46.
3. *Application of hydrodynamic cavitation to wastewater treatment / Y. Tao, J. Cai, X. Huai et al.* // *Chemical Engineering Technology*. – 2016. – Vol.39. – No. 8. – P.1363-1376.
4. *An experimental study on the degradation of methyl orange by combining hydrodynamic cavitation and chlorine dioxide treatments / S. Yang, R. Jin, Z. He et al.* // *Chemical Engineering Transactions*. – 2017. – Vol.59. – P.289-294.
5. *The kinetics of the sonochemical process for the destruction of aliphatic and aromatic hydrocarbons / J.-W. Kang, K.-H. Lee, Ch.-II Koh, S.-N. Nam* // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2001. – Vol.18. – No. 3. – P.336-341.
6. *Некоз О.І., Литвиненко О.А., Логвінський Р.В.* Кавітаційна технологія очищення стічних вод від токсичних речовин // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2012. – Т.66. – № 2. – С.112-115.
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *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 університету "Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування*. – 2015. – № 812. – С.354-359.
11. *Сухацький Ю.В.* Дослідження ефективності кавітаційно-флотаційної технології очищення рідкофазних середовищ від дисперсних частинок // *Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць*. – 2016. – Вип.26. – № 4. – С.295-303.
12. *Investigations of cavitation processes in different types of emitters using sonochemical analysis / V. Yavorskiy, Yu. Sukhatskiy, Z. Znak, R. Mnykh* // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2016. – Vol.10. – No. 4. – P.507-513.
13. *Кластерная структура стабильных нанопузырей растворенного газа в глубоко очищенной воде / Н.Ф. Бункин, Н.В. Суязов, А.В. Шкирин и др.* // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2009. – Т.135. – № 5. – С.917-937.
14. *Смирнов А.Н., Сыроешкин А.В.* Супранадмолекулярные комплексы воды // *Российский химический журнал*. – 2004. – Т.48. – № 2. – С.125-135.
15. *Малкін Е.С., Журавська Н.Є.* Вплив характеристик магнітного поля при обробці води на показники капілярно-пористих та колоїдних капілярно-пористих тіл // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. – 2017. – Вип. 21. – С.4-10.

Надійшла до редакції 09.11.2017

THE DECOMPOSITION OF THE BENZENE IN CAVITATION FIELDS

Z.O. Znak, Yu.V. Sukhatskiy, O.I. Zin, S.V. Khomyak, R.V. Mnykh, A.V. Lysenko

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

The authors studied the process of cavitation decomposition of benzene under the action of acoustic vibrations of the ultrasound range. It was established on the basis of the analysis of oscillograms of the acoustic signal that the amplitude of the sound pressure of the cavitation fields generated in simulated wastewater with benzene was 1.6 times higher than in water. It was found that the dependence of the degree of benzene decomposition on the specific power of cavitation treatment has a maximum at a specific power of 68 kW m^{-3} and 22.7 kW m^{-3} for stationary mode and for the mode of initiation of the reaction, respectively. The expediency of using the reaction initiation mode is shown to reduce significantly the energy consumption in the process of benzene decomposition in cavitation fields. An abnormally low degree of decomposition of benzene was detected at a temperature of 313 K; this can be explained by the consumption of energy that was supplied to the system on the formation of stable gas nano-bubbles (babstons) and also by the maximal variability of water structures according to the kinetic theory of Frenkel's fluid. By means of the method of graphical differentiation, it is ascertained that the process of decomposition of benzene in cavitation fields proceeds as a pseudo-first order reaction. The values of the rate constants of the benzene decomposition process are determined.

Keywords: cavitation; decomposition; benzene; stationary mode; initiation of the reaction; babston.

REFERENCES

1. Szulzyk-Cieplak J. Removal of hardly bio-degradable organic compounds from wastewater by means of reagentless methods. *Journal of Ecological Engineering*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 63-71.
2. Gogate P.R., Tayal R.K., Pandit A.B. Cavitation: a technology on the horizon. *Current Science*, 2006, vol. 91, no. 1, pp. 35-46.
3. Tao Y., Cai J., Huai X., Liu B., Guo Z. Application of hydrodynamic cavitation to wastewater treatment. *Chemical Engineering Technology*, 2016, vol. 39, no. 8, pp. 1363-1376.
4. Yang S., Jin R., He Z., Qiao Y., Shi S., Kong W., Wang Y., Liu X. An experimental study on the degradation of methyl orange by combining hydrodynamic cavitation and chlorine dioxide treatments. *Chemical Engineering Transactions*, 2017, vol. 59, pp. 289-294.
5. Kang J.-W., Lee K.-H., Koh C.-H., Nam S.-N. The kinetics of the sonochemical process for the destruction of aliphatic and aromatic hydrocarbons. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2001, vol. 18, no. 3, pp. 336-341.
6. Nekož O.I., Lytvynenko O.A., Logvyn's'kyi R.V. Kavitatsiyna tekhnologiya ochyshchenn'ya stichnykh vod vid toksychnykh rehovyn [Cavitation technology of wastewater treatment from toxic substances]. *Vibratsii v Tekhnitsi ta Tekhnologiyakh*, 2012, vol. 66, no. 2, pp. 112-115. (in Ukrainian).
7. 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, no. 4, pp. 595-600.
8. 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.
9. Znak Z.O., Sukhats'kyi Yu.V., Mnykh R.V. Doslidzhenn'ya zalezhnosti efektyvnosti roboty gidrodynamichnogo strumenevogo kavitatora vid konstruktyvnykh 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).
10. Sukhats'kyi Yu.V., Znak Z.O., Mnykh R.V. Energetychnyi analiz roboty gidrodynamichnogo strumenevogo kavitatora u protsesakh ochyshchenn'ya stichnykh vod za kavitatsiino-flotatsiino-yu tekhnologiyeyu [Power analysis of hydrodynamic jet cavitator operation in sewage treatment processes by cavitation and flotation technology]. *Visnyk Natsional'nogo Universytetu «L'viv's'ka Politekhnika». Khimiya, Tekhnologiya Rechovyn ta i'kh Zastosuvann'ya*, 2015, no. 812, pp. 354-359. (in Ukrainian).
11. Sukhats'kyi Yu.V. Doslidzhenn'ya efektyvnosti kavitatsiino-flotatsiynoi tekhnologii ochyshchenn'ya ridkofaznykh seredovysheh vid dyspersnykh chastynok [Investigation of the effectiveness of cavitation and flotation technology for purification of liquid-phase media from disperse particles]. *Naukovyi Visnyk NLTU Ukrainy: Zbirnyk Naukovo-Tekhnichnykh Prats'*, 2016, vol. 26, no. 4, pp. 295-303. (in Ukrainian).
12. Yavorskiy V., Sukhatskiy Yu., Znak Z., Mnykh R. Investigations of cavitation processes in different types of emitters using sonochemical analysis. *Chemistry & Chemical Technology*, 2016, vol. 10, no. 4, pp. 507-513.
13. Bunkin N.F., Suyazov N.V., Shkirin A.V., Ignat'ev P.S., Indukaev K.V. Cluster structure of stable dissolved gas nanobubbles in highly purified water. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2009, vol. 108, no. 5, pp. 800-816.
14. Smirnov A.N., Syroeshkin A.V. Supranadmolekul'yarnye komplekxy vody [Supramolecular water complexes]. *Rossiiskii Khimicheskii Zhurnal*, 2004, vol. 48, no. 2, pp. 125-135. (in Russian).
15. Malkin E.S., Zhuravs'ka N.Ye. Vplyv kharakterystyk magnitnogo polya pry obrobttsi vody na pokaznyky kapilyarno-porystykh ta koloidnykh kapilyarno-porystykh til [Influence of the characteristics of the magnetic field during water treatment on the indexes of capillary-porous and colloidal capillary-porous bodies]. *Ventyliyatsiya, Osvitlenn'ya ta Teplogazopostachann'ya*, 2017, vol. 21, pp. 4-10. (in Ukrainian).