

УДК 628.16.094 – 926.214: 544.526.5: 542.943

ДОЛЕНКО С. О., старший науковий співробітник<sup>1</sup>; МАМАЄНКО О. В.<sup>1</sup>; ВЕМБЕР В. В., доцент<sup>2</sup>;  
РОГОЖИН Є. В., студент<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут колоїдної хімії і хімії води ім. А.В. Думанського НАН України;

<sup>2</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

## ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ПЛАЗМОХІМІЧНОЇ І УЛЬТРАФІОЛЕТОВОЇ ДЕСТРУКЦІЇ АПАР

*Шляхом класичного біотестування на культурі *D. magna* досліджено токсичність продуктів деструкції додецилсульфату натрію у водному середовищі та визначено питомі енергозатрати при впливі коронного розряду і вакуумного ультрафіолетового випромінювання (185 нм), а також проведено еколого-економічну порівняльну оцінку плазмохімічної і ультрафіолетової деструкції АПАР. Показано, що за обома дослідженими показниками очистка води від АПАР більш ефективна при використанні ВУФ-випромінювання, ніж позитивного коронного розряду.*

**Ключові слова:** аніонні ПАР, деструкція, імпульсний позитивний коронний розряд, вакуумне ультрафіолетове випромінювання, біотестування, питомі енергозатрати

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2020.217907

© Доленко С. О., Мамаєнко О. В., Вембер В. В., Рогожин Є. В., 2020.

**Постановка проблеми.** Серед величезної кількості забруднювачів водних екосистем можна виділити поверхнево-активні речовини (ПАР). Це пов'язано з широким використанням і асортиментом ПАР. Серед них найбільшу кількість, яку використовують у побуті та у різних галузях промисловості, складають аніонні ПАР (АПАР). Слід також відмітити їх негативний вплив як на процеси очищення стічних вод, так і, що більш важливо, на навколишнє середовище. Одним із заходів, що направлені на зниження негативного впливу ПАР на водні системи є впровадження надійних і ефективних методів очищення стічних вод від цих сполук. Існуючі методи очистки (адсорбція, коагуляція, флокуляція, аерація і ін.) забезпечують лише видалення їх з рідкої фази, внаслідок чого виникає проблема утилізації осадів та регенерації сорбентів. Сучасна екологічна ситуація диктує необхідність глибокого (деструктивного) очищення стічних вод від поліутантів незалежно від обсягів стічних вод, що скидаються у водойми, до відповідності їх вмісту нормам ГДК. На сьогодні найбільш прогресивними серед деструктивних методів вважають методи, в основі яких лежать інноваційні окисні процеси, що дозволяють повністю розкласти забруднюючі речовини або переводити їх в форми, здатні до подальшої біодеградації. Суть вказаних технологій полягає в окисленні токсикантів високореакційними частками активованого кисню, які завдяки різним способам обробки, генеруються безпосередньо в реакційній системі. Найбільш активними з яких є ОН<sup>•</sup> радикали [1], які характеризуються величиною стандартного окисно-відновного потенціалу (ОВП) – 2,7 В, що перевищує цей показник для озону (2,07 В) і поступається тільки токсичному фтору [2]. Особливий інтерес представляють технології, в яких високоактивні частки активованого кисню утворюються безпосередньо в процесі обробки і не вимагають використання додаткових хімічних реагентів (окислювачів, каталізаторів). Серед них можна виділити дію вакуумного ( $\lambda < 200$  нм) ультрафіолетового випромінювання (ВУФ) та різні електророзрядні методи.

Однак широкомасштабне застосування цих процесів з метою обробки стічних вод все ще обмежено зокрема тим, що механізми розкладання ПАР при використанні даних процесів вивчені недостатньо. Складність вивчення ефективності окисної деструкції ПАР обумовлена багатостадійністю процесу окислення, утворенням сумішей різноманітних проміжних продуктів, склад яких не до кінця встановлено. Невідома також токсичність продуктів деструкції ПАР, яка є важливим критерієм очищення води. Ще одним визначальним критерієм ефективності для роботи очисних технологічних установок є їх економічність.

**Аналіз попередніх досліджень.** Слід зазначити, що застосуванню продуктів безпосередньо ВУФ-фотолізу води для її очищення від органічних забруднювачів присвячено обмежену кількість робіт, що було пов'язано з відсутністю прийнятних джерел ВУФ-випромінювання. Поява нових джерел з випромінюванням

в короткохвильових областях, відкрила нові можливості подальшого вдосконалення окислювальних технологій. Так в роботі [3] досліджувався процес деградації органічних забруднювачів у водному розчині під дією випромінювання ксенонової лампи ( $\lambda=172$  нм). Було показано, що первинні процеси фоторозкладу і деградації забруднювачів відбуваються в тонкому шарі води, поблизу стінки опромінювача. Радикал  $\text{OH}^\cdot$  взаємодіє з органічними добавками виду  $\text{RH}$  з утворенням радикалів  $\text{R}^\cdot$ , подальше окислення яких відбувається за участю молекул кисню, приводячи теоретично до повної мінералізації. В роботі [4] встановлено, що розкладання органічних молекул відбувається двома шляхами: при прямому поглинанні ВУФ-випромінювання даними молекулами і при їх взаємодії з продуктами ВУФ-фотолізу води.

Електророзрядним методам деструкції органічних сполук, в тому числі і ПАР також присвячено незначну кількість робіт. Так, наприклад, в роботах [5, 6] зазначається, що під впливом тліючого розряду над водою, коли верхній електрод є анодом, при деструкції  $5 \text{ мг/дм}^3$  сульфонолу утворюються ряд сполук, а саме: нітратна кислота, нітрофеноли, феноли, формальдегід і інші альдегіди, ряд карбонових кислот, сульфат-іони і пероксид гідрогену. На перших стадіях впливу розряду на сульфанол, відбувається вплив  $\text{OH}^\cdot$  на бензольне кільце, що призводить до руйнування його і утворення фенолу і різних альдегідів. Під дією кінетичної енергії іонів плазми завдяки специфіці структури сульфонолу здійснюється руйнування вуглеводного ланцюга і ароматичного кільця, які знаходяться ближче до поверхні розподілу фаз. При розкладанні лаурилсульфату натрію автори [7] пропонують таку ж само схему для деструкції АПАР, як і для сульфонолу.

В попередніх наших роботах [8, 9] на прикладі додецилсульфату натрію (ДДСН) і додецилбензолсульфонату натрію (ДДБСН) досліджена деструкція аніонних ПАР у водному середовищі при впливі позитивного коронного розряду і вакуумного ультрафіолетового випромінювання (185 нм). Встановлено кінетичні характеристики деструкції водних розчинів АПАР при їх концентрації  $10 \text{ мг/л}$  і проведена порівняльна оцінка ефективності досліджених процесів [8]. Встановлено, що швидкість деструкції обох АПАР за зміною їх концентрації в розчині при обробці ВУФ-випромінюванням вища ніж при коронному розряді. Показано, що кінетика деструкції ДДБСН за двома методами обробки має ступінчатий характер, що обумовлено різною швидкістю деструкції бензольного кільця і вуглеводного ланцюга ПАР, а також особливостями механізму окиснення АПАР, а саме включенням в окисні процеси продуктів деструкції.

Хроматографічний аналіз продуктів окисної деструкції ДДСН при обробці його водних розчинів ВУФ-випромінюванням і коронним позитивним розрядом дозволив встановити механізми деструкції [1]. Так при ВУФ-обробці в окислювальній деструкції крім жорсткого УФ-випромінювання можуть брати участь ряд кисневмісних радикалів:  $\text{OH}^\cdot$ ,  $\text{CO}_3^\cdot$  і  $\text{SO}_4^\cdot$ . При обробці плазмою  $\text{OH}^\cdot$  не приймають участь в окислювальній деструкції, так як їх утворення відбувається в верхньому тонкому шарі рідини і швидкість їх рекомбінації вище, ніж швидкість дифузії в об'єм. А для утворення продуктів-окисників потрібен певний час, що і обумовлює ступінчатий характер деструкції ДДСН при дії коронного розряду.

Отже, для повної деструкції АПАР необхідна достатньо тривка обробка проби при ВУФ-випромінюванні і дії плазми. В зв'язку з чим актуальним є питання економічності процесу та токсичності продуктів деструкції.

**Метою статті** є проведення порівняльної еколого-економічної оцінки та ефективності плазмохімічної і ультрафіолетової деструкції АПАР.

**Методика роботи.** Проведення порівняльної оцінки плазмохімічної і ультрафіолетової деструкції АПАР проводили на прикладі водного розчину додецилсульфату натрію  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$  (фірми "Serva") з концентрацією  $10 \text{ мг/дм}^3$ . Модельні розчини ДДСН готували шляхом розведення робочого розчину дистильованою водою. Робочий розчин з концентрацією  $1 \cdot 10^{-3} \text{ М}$  готували шляхом розчиненням точної наважки сухої речовини у дистильованій воді.

В якості джерела позитивного коронного розряду був використаний генератор плазми потужністю  $40 \text{ Вт}$ . Висота електрода над поверхнею розчину складала  $15 \text{ мм}$ , сила струму  $500 \text{ мкА}$ , напруга  $14 \text{ кВ}$ . В якості джерела ВУФ було обрано аргонно-ртутну лампу низького тиску ДРБ-20, яка була занурена в дуже тонкий шар рідини. Схему установок наведено в роботі [8].

Для оцінки токсичності ДДСН і продуктів деструкції шляхом класичного біотестування був обраний об'єкт безхребетної фауни *Daphnia magna* [10]. Лабораторна культура *D. magna* складалася з самок (штам АRO; Hampton, N.H.). Культуру витримували у модельній синтетично створеній лабораторній воді, що нагадує воду озера Онтаріо ( $1 \text{ мМ CaCO}_3$ ,  $0,15 \text{ мМ MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $0,6 \text{ мМ NaCl}$ ) при постійному освітленні і температурі  $20\text{--}22^\circ\text{C}$  з оновленням води кожні дві доби.

**Виклад основного матеріалу**

**1. Дослідження токсичності продуктів деструкції АПАР.**

Результати дослідження показників виживання *D. magna* (ювенільної форми) в двох типах водних розчинів ДДСН після обробки коронним розрядом і ВУФ-випромінювання наведено в табл.1. Контролем слугувала вода без добавок ДДСН і без опромінення.

**Таблиця 1 - Кількість живих/загиблих особин *D. magna* у водному розчині ДДСН після опромінення плазмою і ВУФ**

Час експозиції, год	Кількість живих/загиблих особин <i>D. magna</i>						
	Контроль	Коронний розряд			ВУФ-випромінювання		
		5 хв	10 хв	20 хв	5 хв	10 хв	20 хв
24	10/0	10/0	10/0	9/1	10/0	10/0	10/0
72	10/0	8/2	8/2	9/1	10/0	10/0	10/0
96	10/0	8/2	7/3	7/3	10/0	10/0	10/0
Вживаність	100%	80%	70%	70%	100%	100%	100%

Згідно ДСТУ 4174:2003 [11], якщо виживаність дафній складає < 50%, то має місце гостра токсичність для даної проби води; виживаність дафній в межах 50% – 90% свідчить про хронічну токсичність проби.

Таким чином, у водному розчині ДДСН після обробки позитивним коронним розрядом встановлено хронічну токсичність води, а після обробки ВУФ-випромінюванням токсичний вплив відсутній (див. табл.1). Слід відмітити, що ступінь деструкції ДДСН за 5 хв обробки при дії плазми і ВУФ-випромінювання, як показано в роботі [8], становить відповідно ~ 58% і 96 %, а показник вмісту загального органічного вуглецю підвищується, що свідчить про синтез нових органічних сполук. Запропонований в роботі [9] механізм деструкції молекул АПАР може свідчити про утворення різних продуктів, які мають різний ефект впливу на дафній.

Отже, при обробці водних розчинів ДДСН плазмою утворюються токсичні продукти, які спричиняють смертність *D. magna*. Це узгоджується з літературними даними, оскільки в роботі [7] зазначається, що одним із продуктів деструкції ДДСН при дії електричного розряду є формальдегід. Протягом 10 хв обробки розчину ДДСН з концентрацією 5,76 мг/дм<sup>3</sup> утворюється 60 мкг/дм<sup>3</sup> СН<sub>2</sub>О. У роботі [12], при визначенні ступеню токсичного впливу добавки СН<sub>2</sub>О, концентрація якого відповідала рівню ГДК (1 мкг/дм<sup>3</sup>) на ракоподібних *Daphnia magna* Straus встановлено прояви хронічної токсичності. А для *Daphnia pulex* De Geer за 48 год токсичність формальдегіду за показником ЕС<sub>50</sub> становила 5,8 мг/дм<sup>3</sup> [12].

Ще одним фактором, який впливає на виживаемість дафній може бути вміст у воді неорганічних іонів, а саме нітрат-іонів [8,9], оскільки вони утворюються при горінні плазми. За 5 хв обробки коронним розрядом концентрація NO<sub>3</sub><sup>-</sup> становила – 0,9 мг/дм<sup>3</sup>, за 10 хв – 4 мг/дм<sup>3</sup>, за 20 хв – 11 мг/дм<sup>3</sup>. Нітрат-іони проявляють токсичність на організми через здатність окислювати гемоглобін, зменшуючи його здатність до перенесення кисню [13]. Різні автори токсичність нітрат-іонів визначають за двома показниками, або за ЕС<sub>50</sub> або за LC<sub>50</sub>. Так, гостра токсичність водного розчину натрій нітрату за даними паспорта безпеки німецького фірми «ROTH», який складався відповідно до Регламенту (ЄС) № 1907/2006 (REACH), з поправками, внесеними 453/2010/ЄС, для великої дафнії за 48 год за показником ЕС<sub>50</sub> становила 3,581 мг/дм<sup>3</sup>. Для новонароджених *D. magna* гостра токсичність за показником LC<sub>50</sub> спостерігається при концентрації NaNO<sub>3</sub> – 462 мг/дм<sup>3</sup> [14].

Отже після опромінення плазмою розчину ДДСН з концентрацією 10 мг/дм<sup>3</sup> утворюються токсичні продукти, а саме формальдегід і нітрат-іони, які при сумісному впливі на *D. magna* викликають ефект хронічної токсичності.

Такими чином, за критерієм токсичності водних розчинів ДДСН, використання ВУФ-випромінювання для окисної деструкції АПАР є більш прийнятним, ніж позитивний коронний розряд.

**2. Визначення питомих енергозатрат для очистки води від АПАР.**

Питомі енергозатрати *W* при очистці води від АПАР обчислювали за формулою:

$$W = \frac{P \cdot t}{V}, \tag{1}$$

де  $P$  – потужність установки, Вт;  $V$  – об’єм опроміненого розчину,  $\text{дм}^3$ ;  $t$  – час опромінення, год. Проте слід зазначити, що для економічного використання вибраної установки потрібно використовувати величину сумарних питомих енергозатрат. Так, сумарні питомі енергозатрати для установки коронного розряду становлять  $4,4 \cdot 10^{-3}$  кВт·год/ $\text{дм}^3$ , а для установки ВУФ-випромінювання –  $3,67 \cdot 10^{-4}$  кВт·год/ $\text{дм}^3$ .

Ще одним важливим показником хімічної ефективності очистки води від забруднювачів є енергетичний вихід  $Me$  [15]. Ця величина характеризує кількість видалених добавок на одиницю витраченої енергії. Значення  $Me$  можна визначити за формулою:

$$Me = \frac{\Delta C \cdot V}{P \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

де  $\Delta C$  – зміна концентрації добавок ( $\text{мг}/\text{дм}^3$ ) за час обробки  $\Delta t$  (год),  $V$  – об’єм опроміненого розчину,  $\text{дм}^3$ ;  $P$  – потужність лампи чи іншого джерела енергії, Вт.

Результати розрахунків енергетичного виходу при дії коронного розряду та ВУФ-випромінювання на розчину АПАР наведено в табл. 2.

**Таблиця 2 – Зміна ступеня деструкції (R) ДДСН і енергетичного виходу ( $Me$ ) від часу при дії коронного розряду та ВУФ-випромінювання**

Час, хв	Плазма		ВУФ	
	R, %	$Me$ , г/кВт·год	R, %	$Me$ , г/кВт·год
5	58,4	16	96,4	317
10	98,6	13,4	99,8	163
20	99,5	6,85	100	163

Як видно із табл. 2, часовий проміжок, достатній для 99,5% деструкції ДДСН при дії коронного розряду і 100% деструкції ДДСН при дії ВУФ-випромінювання, складає 20 хв. Середній енергетичний вихід очистки води від ДДСН при дії електричного розряду становить  $\approx 12$  г/кВт·год, а при дії ВУФ-випромінювання  $\approx 214$  г/кВт·год.

Отже, за показником хімічної ефективності, очистка води від АПАР також більш ефективна при використанні ВУФ-випромінювання, ніж позитивного коронного розряду, оскільки дана величина за ВУФ  $\approx 18$  разів більша від величини за плазмою.

**Висновки.** В результаті проведених дослідів та обчислень встановлено, що при очистці води від АПАР ВУФ-випромінювання не призводить до утворення токсичних продуктів деструкції. При використанні коронного розряду в розчинах ДДСН можуть утворюватись токсичні продукти розкладу, які зумовлюють хронічну токсичність розчину. Порівняння величин питомих енергозатрат продемонстрували набагато вищу ефективність УФ-лампи ДРБ-20 при деструкції АПАР в порівнянні з позитивним коронним розрядом, оскільки величина питомих енергозатрат для лампи становить  $3,67 \cdot 10^{-4}$  кВт·год/ $\text{дм}^3$ , а для генератора плазми –  $4,4 \cdot 10^{-3}$  кВт·год/ $\text{дм}^3$ . Також показано, що за показником хімічної ефективності, очистка води від АПАР більш ефективна при використанні ВУФ-випромінювання, ніж позитивного коронного розряду, оскільки дана величина за ВУФ майже у 18 разів більша від аналогічного показника при використанні генератора плазми.

**Перспективи подальших досліджень.** Зважаючи на високу потребу у впровадженні нових ефективних, економічно вигідних та безпечних методів очистки води від АПАР, в подальших дослідженнях планується підвищити ефективність їхньої деструкції у водних розчинах за рахунок використання каталізаторів перехідних металів (наприклад,  $\text{TiO}_2$ ) [17]. Такий підхід допоможе збільшити концентрацію активних форм кисню, а саме гідроксильних радикалів та досягти значно кращого та швидкого ефекту очистки водних розчинів від АПАР чи інших забруднювачів.

#### Список використаної літератури

1. Mohajerani M., Mehrvar M. and Ein-Mozaffari F. An Overview Of The Integration Of Advanced Oxidation Technologies And Other Processes For Water And Wastewater Treatment // International Journal of Engineering. 2009. V. 3, No 2. P.120-146.

2. Wadman P. Reduction Potentials of One-Electron Couples Involving Free Radicals in Aqueous Solution // J. Phys. Chem. Ref Data. 1989. Vol. 18, No 4. P. 1637-1755.
3. Heit G., Braun A. M. VUV-photolysis of aqueous systems: spatial differentiation between volumes of primary and secondary reactions // Wat. Sci. Tech. 1997. V. 35, No 4. P. 25–30.
4. Gettoff N. Purification of drinking water by irradiation. A review // Proc. Indian Acad. Sci. (Chem/ Sci.). 1993. Vol. 105, No 6. P. 373–391.
5. Shutov D. A., Isakina A. A., Konovalov A. S., Bobkova E. S. Destruction of Sulfonol in Its Aqueous Solutions by Contact Glow Discharge Treatment: 1. Product Formation Kinetics // High Energy Chemistry. 2013. Vol. 47, No 4. P. 201-204.
6. Shutov D. A., Konovalov A. S., Isakina A. A., Bobkova E. S. Destruction of Sulfonol in Its Aqueous Solutions by Contact Glow Discharge Treatment: 2. Mechanisms and Kinetic Simulation// High Energy Chemistry. 2013. Vol. 47, No 5. P. 258-261.
7. Shutov D. A., Olkhova E. O., Kostyleva A. N., Bobkova E. S. Destruction of Sodium Lauryl Sulfate in Its Aqueous Solutions by Contact Glow Discharge Treatment // High Energy Chemistry. 2014. Vol. 48, No 5. P. 343-345.
8. Mamaenko A. A., Dolenko S. A., Alekseenko E. Y., Zui O. V., Goncharuk V. V. Comparison of Efficiency of the Effect of the Corona Discharge and Vacuum UV-Radiation in Destruction of Anionic Surfactants // Journal of Water Chemistry and Technology. 2018. Vol. 40 (3). P. 121-125.
9. Мамаєнко А. В., Доленко С. А., Зуй О. В., Приходько Р. В., Гончарук В. В. Использование ионной хроматографии для установления механизма деструкции АПАВ вакуумным УФ-излучением и коронным разрядом // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). 2019. 1 (41). С. 46-52.
10. ДСТУ 4173:2003. Якість води. Визначання гострої летальної токсичності на *Daphnia magna* Straus та *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 6341:1996, MOD). Київ, 2004. 22 с.
11. ДСТУ 4174:2003. Якість води. Визначання сублетальної та хронічної токсичності хімічних речовин та води на *Daphnia magna* Straus і *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 1076:2000, MOD). Київ, 2004. 26 с.
12. Tisler T., Zagorc-Koncan J. Comparative assessment of toxicity of phenol, formaldehyde, and industrial wastewater to aquatic organisms // Water Air and Soil Pollution. 1997. V. 97, No 3. P. 315-322.
13. Eytcheson S. A., LeBlanc G. A. Hemoglobin Levels Modulate Nitrite Toxicity to *Daphnia magna* // Scientific Reports. 2018. Vol. 8, No 7172. P. 1-8.
14. Camargo J. A., Alonso A., Salamanca A. Nitrate toxicity to aquatic animals: a review with new data for freshwater invertebrates // Chemosphere. 2005. 58. P. 1255-1267.
15. Белинский В. В., Божко И. В., Чарный Д. В. Импульсный коронный разряд на поверхность электропроводящей жидкости и его использование для обработки воды // Техн. Електродинаміка. 2010. №3. С. 21-27.
16. Теренин А. Н. Фотоника молекул красителей и родственных органических соединений. Л.: Наука, 1967. 616 с.
17. Matthews R. W., McEvoy S. R. A comparison of 254 nm and 350 nm excitation of TiO<sub>2</sub> in simple photocatalytic reactors // Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 1992. Vol. 66, No 3. P. 355-366.

Надійшла до редакції 04.11.2020

---

**Dolenko S. O., Mamaenko O. V., Vember V. V., Rohozhyn Ye. V.**

#### **ECOLOGICAL AND ECONOMIC COMPARATIVE EVALUATION OF PLASMOCHEMICAL AND ULTRAVIOLET DESTRUCTION OF THE ANIONIC SURFACTANTS**

*Among the huge number of pollutants in aquatic ecosystems, surfactants can be singled out. Among them, the largest number used in everyday life and in various industries are anionic surfactants. It should also be noted their negative impact on wastewater treatment processes and, more importantly, on the environment. One of the approaches aimed at reducing the negative impact of surfactants on water systems is the introduction of reliable and effective methods of wastewater treatment from surfactants. The current environmental situation dictates the need for deep (destructive)*

treatment of wastewater from pollutants, regardless of the volume of wastewater discharged into reservoirs, to comply with their content of the MPC. Today, the most advanced among the destructive methods are methods based on innovative oxidative processes that allow the complete decomposition of pollutants or convert them into forms capable of further biodegradation. The essence of these technologies is the oxidation of toxicants by highly reactive particles of activated oxygen, which due to various processing methods, are generated directly in the reaction system. Of particular interest are technologies in which highly active particles of activated oxygen are formed directly during processing and do not require the use of additional chemical reagents (oxidants, catalysts). Among them are the action of vacuum ( $\lambda < 200$  nm) ultraviolet radiation (VUV) and various electric discharge methods.

However, the large-scale application of these processes for the treatment of wastewater is still limited in particular by the fact that the mechanisms of decomposition of surfactants using these processes are insufficiently studied. The complexity of studying the efficiency of oxidative destruction of surfactants is due to the multi-stage oxidation process, the formation of mixtures of various intermediate products, the composition of which is not fully established. The toxicity of surfactant degradation products is also unknown, which is an important criterion for water purification. Another determining criterion of efficiency for the operation of treatment plants is their efficiency.

The aim of the article is to conduct a comparative assessment of the environmental friendliness and cost-effectiveness of plasma-chemical and ultraviolet destruction of anionic surfactants.

Ecological and economic comparative evaluation of plasma chemical and ultraviolet destruction of anionic surfactants was carried out by using as an example an aqueous solution of sodium dodecyl sulfate  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$  ("Serva") with a concentration of  $10 \text{ mg/dm}^3$ .

As a result of experiments and calculations, it was found that VUV radiation does not lead to the formation of toxic degradation products when purifying water from anionic surfactants. When using corona discharge, toxic decomposition products can be formed in sodium dodecyl sulfate solutions, which cause chronic toxicity of the solution. Comparison of the values of specific energy consumption showed a much higher efficiency of the UV lamp DRB-20 in the destruction of anionic surfactants in comparison with the positive corona discharge, as the magnitude of specific energy consumption for the lamp is  $3.67 \times 10^{-4} \text{ kW}\cdot\text{h/dm}^3$ , and for the plasma generator -  $4.4 \times 10^{-3} \text{ kW}\cdot\text{h/dm}^3$ . It is also shown that in terms of chemical efficiency, water purification from anionic surfactants is more effective when using VUV radiation than positive corona discharge, because this value for VUV is almost 18 times higher than the same indicator when using a plasma generator.

Due to the high need for the introduction of new efficient, cost-effective and safe methods of water purification from surfactants in further studies it is planned to increase the efficiency of surfactant destruction in aqueous solutions through the use of transition metal catalysts ( $\text{TiO}_2$ ). This approach will help to increase the concentration of reactive oxygen species, namely hydroxyl radicals and achieve a much better and faster effect of purification of aqueous solutions from surfactants or other contaminants.

**Keywords:** anionic surfactants, destruction, pulsed positive corona discharge, vacuum ultraviolet radiation, biotesting, specific energy consumption.

### References

1. Mohajerani M., Mehrvar M. and Ein-Mozaffari F. (2009). An Overview Of The Integration Of Advanced Oxidation Technologies And Other Processes For Water And Wastewater Treatment // *International Journal of Engineering*, vol. 3, No 2, pp. 120-146.
2. Wadman P. (1989). Reduction Potentials of One-Electron Couples Involving Free Radicals in Aqueous Solution // *J. Phys. Chem. Ref Data*, vol. 18, No 4, pp. 1637-1755.
3. Heit G., Braun A. M. (1997). VUV-photolysis of aqueous systems: spatial differentiation between volumes of primary and secondary reactions // *Wat. Sci. Tech*, vol. 35, No 4, pp. 25-30.
4. Gettoff N. (1993). Purification of drinking water by irradiation. A review // *Proc. Indian Acad. Sci. (Chem/ Sci.)*, vol. 105, No 6, pp. 373-391.
5. Shutov D. A., Isakina A. A., Konovalov A. S., Bobkova E. S. (2013). Destruction of Sulfonol in Its Aqueous Solutions by Contact Glow Discharge Treatment: 1. Product Formation Kinetics // *High Energy Chemistry*, vol. 47, No 4, pp. 201-204.
6. Shutov D. A., Konovalov A. S., Isakina A. A., Bobkova E. S. (2013). Destruction of Sulfonol in Its Aqueous Solutions by Contact Glow Discharge Treatment: 2. Mechanisms and Kinetic Simulation // *High Energy Chemistry*, vol. 47, No 5, pp. 258-261.

7. Shutov D. A., Olkhova E. O., Kostyleva A. N., Bobkova E. S. (2014). Destruction of Sodium Lauryl Sulfate in Its Aqueous Solutions by Contact Glow Discharge Treatment // *High Energy Chemistry*, vol. 48, No 5, pp. 343-345.
8. Mamaenko A. A., Dolenko S. A., Alekseenko E. Y., Zui O. V., Goncharuk V. V. (2018). Comparison of Efficiency of the Effect of the Corona Discharge and Vacuum UV-Radiation in Destruction of Anionic Surfactants // *Journal of Water Chemistry and Technology*, vol. 40 (3), pp. 121-125.
9. Mamayenko A. V., Dolenko S. A., Zuy O. V., Prikhodko R. V., Goncharuk V. V. (2019). Ispolzovaniye ionnoy khromatografii dlya ustanovleniya mekhanizma destrukttsii APAV vakumnym UF-izlucheniyyem i koronnym razryadom [The use of ion chromatography to establish the mechanism of destruction of anionic surfactants by vacuum UV radiation and corona discharge] // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*, 1 (41), pp. 46-52.
10. DSTU 4173:2003. (2004). Yakist vody. Vyznachannya hostroi letalnoi toksychnosti na Daphnia magna Straus ta Ceriodaphnia affinis Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) [Water quality. Determination of acute lethal toxicity to Daphnia magna Straus and Ceriodaphnia affinis Lilljeborg (Cladocera, Crustacea)] (ISO 6341:1996, MOD), Kyiv, 22 p.
11. DSTU 4174:2003. (2004). Yakist vody. Vyznachannya subletalnoi ta khronichnoi toksychnosti khimichnykh rehovyn ta vody na Daphnia magna Straus i Ceriodaphnia affinis Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) [Water quality. Determination of sublethal and chronic toxicity of chemicals and water on Daphnia magna Straus and Ceriodaphnia affinis Lilljeborg (Cladocera, Crustacea)] (ISO 1076:2000, MOD), Kyiv, 26 p.
12. Tisler T., Zagorc-Koncan J. (1997). Comparative assessment of toxicity of phenol, formaldehyde, and industrial wastewater to aquatic organisms // *Water Air and Soil Pollution*, vol. 97, No 3, pp. 315-322.
13. Eytcheson S. A., LeBlanc G. A. (2018). Hemoglobin Levels Modulate Nitrite Toxicity to Daphnia magna // *Scientific Reports*, vol. 8, No 7172, pp. 1-8.
14. Camargo J. A., Alonso A., Salamanca A. (2005). Nitrate toxicity to aquatic animals: a review with new data for freshwater invertebrates // *Chemosphere*, 58, pp. 1255-1267.
15. Belinskiy V. V., Bozhko I. V., Charnyy D. V. (2010). Impulsnyy koronnyy razryad na poverkhnosti elektroprovodyashchey zhidkosti i ego ispolzovaniye dlya obrabotki vody [Pulsed corona discharge on the surface of an electrically conductive liquid and its use for water treatment] // *Tekhn. Elektrodinamika*, No 3, pp. 21-27.
16. Terenin A. N. (1967). Fotonika molekul krasiteley i rodstvennykh organicheskikh soyedineniy. [Photonics of dye molecules and related organic compounds] L.: Nauka, 616 p.
17. Matthews R. W., McEvoy S. R. (1992). A comparison of 254 nm and 350 nm excitation of TiO<sub>2</sub> in simple photocatalytic reactors // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 66, No 3, pp. 355-366.

---

УДК 676.2.026.72.04

**ПЛОСКОНОС В. Г., к.т.н., доц.; ЛАСТОВ'ЯК Ю. Я., магістрант; НАЗАРЕНКО Д. С., магістрант  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

## **ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКОВАНИХ ПШЕНИЧНИХ КРОХМАЛЬНИХ КЛЕЇВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ФІЗИКО- МЕХАНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ В ПРОЦЕСАХ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ ТА КАРТОНУ**

З метою підвищення фізико-механічних показників паперової продукції проведено експериментальні дослідження із застосуванням модифікованих пшеничних крохмальних клеїв в процесах виробництва паперу та картону. Визначено оптимальний градус млива макулатурної маси та оптимальну витрату крохмального клею.

**Ключові слова:** модифікований пшеничний крохмальний клей, виробництво паперу та картону, ступінь млива, витрата крохмального клею.