

УДК 621.357:533+661.43+66.088:621.357:533:661.8+66.067.8.081.3

Маргарита Скиба, Олександр Пивоваров, Анна Макарова,
Вікторія Воробйова, Олена Гнатко

ПЛАЗМОХІМІЧНО ОБРОБЛЕНА ВОДА ТА ВОДНІ РОЗЧИНИ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ПИТНОЇ ВОДИ

Маргарита Скиба, Александр Пивоваров, Анна Макарова,
Виктория Воробьева, Елена Гнатко

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННАЯ ВОДА И ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

Margarita Skiba, Alexander Pivovarov, Anna Makarova, Victoria Vorobyova, Elena Gnatko

PLASMA-CHEMICAL DISCHARGE TREATED WATER AND WATER SOLUTIONS FOR DRINKING WATER DISINFECTION

У роботі показано ефективність використання контактної нерівноважної низькотемпературної плазми як інструменту оброблення води та водних розчинів NaCl, AgNO₃, AgCl з метою одержання продуктів, що характеризуються дезінфікуючими властивостями. Зазначено технологічно доцільні умови плазмохімічного одержання дезінфікуючих сполук у воді та водних середовищах. Проаналізовано хімічні процеси у воді та водних розчинах NaCl, AgNO₃, AgCl під дією плазмового розряду. Досліджено антагоністичну дію плазмохімічно отриманих сполук на ряд мікроорганізмів (*Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus saprophibicus*, *Staphylococcus epidermidis*, *E.coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans* та ін.) порівняно з існуючими дезінфікуючими розчинами.

Ключові слова: одержання, плазмовий розряд, окисні сполуки, наночастки срібла, дезінфекція, питна вода.

Рис.: 1. Табл.: 3. Бібл.: 9.

В работе показана эффективность использования контактной неравновесной низкотемпературной плазмы как инструмента обработки воды и водных растворов NaCl, AgNO₃, AgCl с целью получения продуктов, характеризующихся дезинфицирующими свойствами. Указано технологически целесообразные условия плазмохимического получения дезинфицирующих соединений в воде и водных средах. Проанализированы химические процессы в воде и водных растворах NaCl, AgNO₃, AgCl под действием плазменного разряда. Исследовано антагонистическое действие плазмохимически полученных соединений на ряд микроорганизмов (*Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus saprophibicus*, *Staphylococcus epidermidis*, *E.coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans* и др.) По сравнению с существующими дезинфицирующими растворами.

Ключевые слова: получение, плазменный разряд, окислительные соединения, наночастицы серебра, дезинфекция, питьевая вода.

Рис.: 1. Табл.: 3. Библ.: 9.

The paper shows the effectiveness of use of the contact as the nonequilibrium low-temperature plasma treatment of water and aqueous solutions tool NaCl, AgNO₃, AgCl in order to obtain products characterized disinfectant properties. Said process conditions suitable plasma chemical disinfectants produce compounds in water and aqueous media. Analyzed chemical processes in water and aqueous solutions of NaCl, AgNO₃, AgCl under the action of a plasma discharge. We studied the antagonistic action of the compounds obtained Plasmochemical a number of microorganisms (*Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus saprophibicus*, *Staphylococcus epidermidis*, *E.coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans* and others) in comparison with existing disinfectants.

Key words: preparation, plasma discharge, oxidizing compounds, silver nanoparticles, disinfection, drinking water.

Fig.: 1. Tabl.: 3. Bibl.: 9.

Постановка проблеми. Основною проблемою в нашому регіоні та в багатьох країнах світу є проблема постачання якісної питної води. Через застарілі технології, зношеність очисних споруд та трубопровідної системи загалом, цілий спектр як неорганічних, так і органічних домішок може потрапляти до споживачів. Навіть використання домашнього фільтра через накопичення та розмноження мікроорганізмів не може гарантувати безпеку [1]. Таким чином, сучасний екологічний стан та недостатня якість питної води викликає необхідність розроблення нових ефективних комплексних заходів для знезараження води.

На сьогодні водні розчини антимікробних препаратів є одним з найважливіших засобів боротьби зі збудниками інфекцій. Проте слід зазначити, що значне розширення за останні роки асортименту дезінфікуючих засобів все ще не дозволяє кардинально вирішувати питання комплексного знезараження водив наслідок відсутності інноваційних, енергоощадних та екологічно безпечних технологій одержання розчинів знезара-

ження води. Тому питання розроблення способів і технології одержання антимікробних препаратів є нині актуальним.

Аналіз досліджень і публікацій. На сучасному етапі розвитку технологій водоочищення та знезараження питної води значна увага приділяється застосуванню плазмових розрядів як інструменту оброблення води, так і одержання за їх допомогою розчинів, що характеризуються унікальними дезінфікуючими властивостями. Окремі наукові співтовариства застосовують плазмові розряди переважно у газовій фазі, з цією метою застосовують коронний [2], бар'єрний [3] або іскровий плазмові розряди [4]. Серед плазмохімічних розрядів перспективним з погляду практичного застосування є контактна нерівноважна низькотемпературна плазма (КНП). Плазмовий розряд генерується між електродом, що знаходиться в газовій фазі, та поверхнею рідини, в об'ємі якої знаходиться другий електрод. Таким чином хімічні перетворення на границі розподілу фаз обумовлені комплексним впливом електрохімічного окиснення-відновлення; реакціями фотолізу, що ініціюються, УФ-опроміненням; потоком заряджених часток з газової фази на поверхню рідкого середовища [5]. Очевидно, що варіювання складу рідких фаз можливо певною мірою керувати маршрутами протікання таких хімічних перетворень. Представляє науковий і практичний інтерес досліджувати властивості таких розчинів.

Методика досліджень. Дослідження проводили в модельному плазмохімічному реакторі, конструкцію та технологічні параметри якого детально наведено авторами в роботі [6]. Розчини хлориду натрію, срібла та нітрату срібла готували розчиненням наважок прекурсорів кваліфікації «ч.д.а.» у дистильованій воді. Вміст пероксиду водню у плазмохімічно обробленій воді та розчинах визначали за допомогою тест-систем «Merckoquant Peroxide Tests», які дозволяють селективно визначати H_2O_2 у присутності до 100 мг/л хлору або гіпохлорит-іонів. Концентрацію гіпохлорит-іонів визначали методом потенціометричного титрування. Антагоністичні властивості продуктів плазмохімічного оброблення води та водних розчинів $NaCl$, $AgNO_3$, $AgCl$ досліджували у Дніпропетровському обласному лабораторному центрі Держсанепідслужби України.

Мета статті. Головною метою роботи є дослідження хімічних процесів у воді та водних розчинів під дією контактної нерівноважної плазми з подальшим аналізом антибактеріальних властивостей отриманих продуктів реакцій.

Результати та їх обговорення. Плазмохімічне оброблення води: особливості хімічних перетворень у системі плазмовий розряд – рідина.

Нині авторами роботи достовірно встановлено, що при обробці води та водних розчинів контактною нерівноважною низькотемпературною плазмою в системі генерується велика кількість реакційно-здатних частинок – вільних і сольватованих електронів, протонів, радикалів, заряджених і збуджених атомів і молекул [5; 6]. Процеси їх взаємодії відбуваються в нерівноважних умовах, обумовлених нерівноважністю плазмового розряду і необоротністю процесів взаємодії радикальних частинок як у газовій, так і в рідкій фазах. Узагальнюючи перелік хімічних реакцій, що беруть участь у хімічних перетвореннях у результаті плазмового оброблення води, слід зазначити, що всі вони можуть бути представлені в такому вигляді: реакції з: H_2O , OH , O , H , H_2 , O_2 ; HO_2 ; H_2O_2 ; O_3 ; мономолекулярні реакції розпадання іонів H_3O^+ ; хімічні реакції для негативних іонів O_2^- , H^- , O^- , O_2^- ; мономолекулярні реакції розпадання іонів O_2^- , H^- , O^- , O_2^- OH^- ; реакції вивільнення електрона O_2^- , H^- , O^- , O_2^- OH^- ; іон-іонна рекомбінація; процеси зіткнень електронів з малими складовими; хімічні реакції коливально-збуджених молекул H_2O ; хімічні реакції, пов'язані з релаксацією коливальної енергії H_2O .

Отримано окремі кінетичні залежності, що дозволяють оцінити характер змін заряджених частинок під час оброблення КНП хімічно чистої води (рис.).

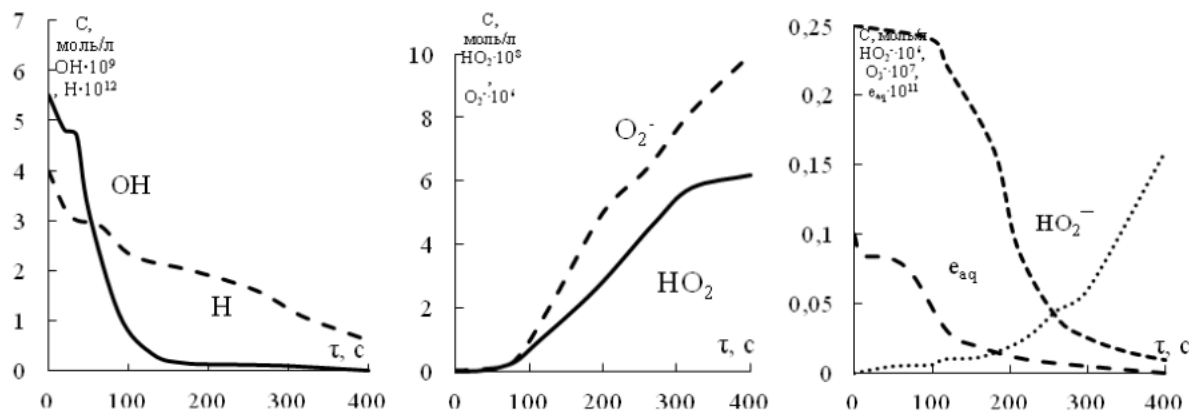


Рис. Зміни концентрацій радикалів H, OH, O₂⁻, HO₂ у процесі плазмового оброблення хімічно чистої води

У табл. 1 наведено виходи окремих компонентів реакційного середовища, у процесі плазмового оброблення водяного середовища.

Таблиця 1

Тепловий ефект і вільна енергія Гіббса реакцій утворення поліоксидів водню

Реакція	ΔH° ,	ΔG° ,	Реакція	ΔH° ,	ΔG° ,
	кДж/моль			кДж/моль	
$2H_2O_2 \rightarrow HO_3H + H_2O$	-4,1	-122,8	$6H_2O_2 \rightarrow HO_7H + 5H_2O$	-196,7	-390,1
$3H_2O_2 \rightarrow HO_4H + 2H_2O$	-55,34	-192,7	$7H_2O_2 \rightarrow HO_8H + 6H_2O$	-248,8	-460,8
$4H_2O_2 \rightarrow HO_5H + 3H_2O$	-102,8	-258,8	$8H_2O_2 \rightarrow HO_9H + 7H_2O$	-295,3	-526,0
$5H_2O_2 \rightarrow HO_6H + 4H_2O$	-156,6	-331,9	$9H_2O_2 \rightarrow HO_{10}H + 8H_2O$	-347,51	-596,9

Відповідно до робіт [5; 7] гідроксил-радикали, утворені в результаті впливу плазмо-хімічного розряду атмосферного тиску, димеризуються з утворенням поліоксидів водню. З використанням термодинамічного підходу було проведено оцінювання ймовірності реалізації різних маршрутів процесу утворення пероксиду водню і його полімерних сполук. На підставі термодинамічних даних були розраховані теплові ефекти реакцій утворення поліоксидів водню при температурі 298 К, а для оцінки ймовірності їх перебігу – вільні енергії Гіббса (табл. 1). Отримані дані свідчать, що процес утворення поліоксидів водню протікає з виділенням тепла, кількість якого збільшується зі зростанням чисельності атомів кисню в молекулі. Оскільки у всіх випадках отримано негативну зміну вільної енергії Гіббса, то це вказує на протікання процесів полімеризації пероксиду водню у водних розчинах з утворенням поліоксидів водню різного складу. Слід зазначити, що збільшення кількості атомів кисню в молекулі полімеру, очевидно, призводить до великих кінетичних ускладнень у процесі полімеризації, пов’язаних зі зростанням стеричних форм і ентропійної складової. Для оцінки достовірності результатів, отриманих термодинамічним методом, проведені експериментальні дослідження.

Встановлено, що в результаті плазмохімічного оброблення води, залежно від умов утворення плазмового розряду, утворюється 100–1000 мг/л пероксидних сполук. Отримані авторами кількісні значення останнього відрізняються від його виходу, розрахованого за законом Фарадея, значно перевершуючи його. Криволінійний характер, зміни швидкості процесу як для водопровідної, так і для дистильованої води означає, що на процес утворення пероксиду водню впливають й інші чинники.

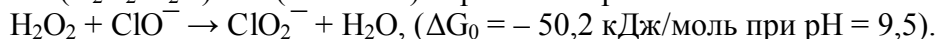
Плазмохімічне оброблення водних розчинів NaCl. Унаслідок досить малих значень енергій активації процесів взаємодії таких радикалів, як H, OH, HO₂, O₂, H₂O, швидкості їх реагування дуже великі і після припинення контактного впливу на розчин плазмового розряду їх зміст швидко зменшується. Слід зазначити, що під час стехіометричного аналізу хімічних перетворень у системі «газ-рідина» в умовах електричного розряду бажано враховувати всі можливі стадії хімічних взаємодій. Послідовність реа-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

лізації цих стадій визначає можливі маршрути хімічних перетворень. Підсумовування таких стадій проводять таким чином, щоб підсумкові стехіометричні рівняння не мали проміжні сполуки, якими є, наприклад, радикальні частинки. Тому в плазмохімічно оброблених розчинах хлориду натрію як основні реакційні компоненти слід розглядати відносно стійкі нерадикальних частки продукти окислення і відновлення молекул води й окислення іонів хлору. Також слід враховувати, що в таких редокс-процесах беруть участь іони H^+ і (або) OH^- , зміна кількості яких визначає кислотність розчинів і значною мірою впливає на значення редокс-потенціалів, а значить і на окиснювальну здатність продуктів перетворень, що розглядаються.

Здійснене авторами [8] порівняння даних діаграм Пурбе для хлору і кисню показує, що в розчинах при $pH > 7$ найбільш ймовірними продуктами окислення води і хлорид-іонів є пероксид водню H_2O_2 і гіпохлорит-іони ClO^- (стандартні вільні енергії Гіббса для окисно-відновних напівреакцій становлять відповідно $-233,5$ і $-221,9$ кДж/моль). Вірогідно, що під впливом низькотемпературної плазми в розчинах хлориду натрію генеруються обидва окиснювача. Оскільки вміст молекул води значно вище концентрації хлорид-іонів, то можна очікувати, що вміст H_2O_2 у розчині буде більше, ніж вміст ClO^- . Разом з тим треба враховувати, що молекула H_2O та іон Cl^- значно відрізняються потенціалами іонізації (12,6 і 9 eV) і тому ефективність процесів відриву електрона (як першої стадії їх окиснення) істотно відрізняються. З цього погляду під час плазмохімічного оброблення концентрованих розчинів $NaCl$ можливе більш швидке накопичення ClO^- , ніж H_2O_2 . На підставі вищезазначеного нами запропоновано схему хімічних перетворень, що відображає накопичення та взаємодію обох окисників.

За умови: $E(H_2O_2/H_2O) > E(ClO^-/Cl^-)$ переважно протікає окиснення ClO^- :

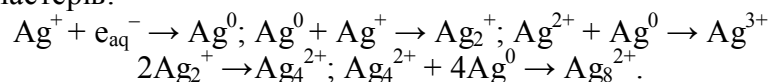


А за умови: $E(H_2O_2/H_2O) < E(ClO^-/Cl^-)$ окисненню піддається H_2O_2 :



Розглянута схема змін концентрацій окисників і ОВП розчинів $NaCl$ дозволяє пояснити експериментальні дані, представлені на рисунку. Авторами [8] встановлено, що синтез окисників способом плазмового оброблення водних розчинів натрію хлориду оптимально проводити за атмосферного тиску, оскільки забезпечується достатньо високий вихід сумарної концентрації окисників при найбільшій кількості натрію діоксохлорату (III) як найбільш цінного продукту синтезу. Вміст натрію хлориду повинен становити 3 г/л, адже це оптимальна концентрація, за якої сумарна концентрація таких окисників, як H_2O_2 і ClO_2^- відносно вища, ніж у разі використання розчинів з більшими чи меншими концентраціями $NaCl$.

Плазмохімічне оброблення водних розчинів нітрату та хлориду срібла. Авторами роботи [9] встановлено ефективність використання КНП для одержання наночасток срібла (НЧ) з водних розчинів $AgNO_3$ та $AgCl$ без додаткового введення відновників. Встановлено, що утворенню НЧ срібла передують ряд проміжних стадій утворення стійких малих кластерів, злипання яких приводить до утворення квазіметалічних та нанорозмірних частинок. Зокрема, нейтральні атоми Ag^0 та іони Ag^+ формують таке сімейство «магічних» кластерів:



За допомогою УФ-спектроскопії у плазмохімічно оброблених розчинах фіксують пік поверхневого плазмонного максимуму поглинання при 400–420 нм, що є характерним для сферичних наночасток срібла. Встановлено, що колоїдні розчини, отримані з нітрату срібла, за інших рівних умов, характеризуються більш вузьким розподілом частинок за розмірами. Отримані дані, вірогідно, зумовлені більшою окисною здатніс-

то перхлорат-іонів щодо інтермедіатів срібла: ($E^\circ(\text{ClO}_4^- + 8\text{H}^+/\text{Cl} + 4\text{H}_2\text{O}) = 1,38 \text{ В}$) у порівнянні з нітрат-іонами $E^\circ(2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+/\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}) = 1,25 \text{ В}$. Результатом окислення є формування меншої кількості інтермедіатів, які згодом утворюють частки більшого розміру. Технологічно доцільним є плазмохімічне оброблення розчинів нітрату срібла з вихідною концентрацією 0,5 г/л ($\tau = 10 \text{ хв}$; $I = 120 \text{ мА}$), що забезпечує отриманих часток срібла розміром від 7 до 50 нм.

Застосування плазмохімічно обробленої води та водних розчинів NaCl, AgNO₃, AgCl для знезараження питної води. Було досліджено антагоністичну дію хімічного перекису водню на тест культури в концентраціях наближених до наявних у плазмохімічно обробленій воді. Отримані дані свідчать про відсутність антагоністичної дії водного розчину синтетичного перексиду водню з концентрацією 10–100 мг/л, незначна антагоністична дія синтетичного водного розчину з концентрацією 500 мг/л і більш стабільна з концентрацією 1000 мг/л. У табл. 2 наведено дані антибактеріальної активності плазмохімічно обробленої води (параметри обробки води ($\tau = 20 \text{ хв}$; $C_{\text{H}_2\text{O}_2} = 500 \text{ мг/л}$; $\text{pH} = 6,4$; $I = 130 \text{ мА}$) та розчинів NaCl ($\tau = 10 \text{ хв}$; $I = 120 \text{ мА}$; $C_{\text{NaCl}} = 3 \text{ г/л}$) порівняно зі штучно приготованим водним розчином лізоформіну, стериліуму.

Таблиця 2

Антагоністична дія плазмохімічно обробленої води та розчинів NaCl

№ п/п	Мікроорганізми	Величина зони затримки зростання мікроорганізмів, мм					
		Лізоформ, %			Стериліум	Плазмохімічно оброблена	
		1,0	1,5	2,0		Вода	Розчин NaCl
1	<i>Staphylococcus aureus</i>	20	23	24	13	20	10,5
2	<i>Staphylococcus saprophibicus</i>	13	14	16	8	10	10
3	<i>Staphylococcus epidermidis</i>	20	24	25	11	13,5	11
4	<i>E.coli</i>	15	14	17	8	12,5	9
5	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10	14	14	8	12	10
6	<i>Candida albicans</i>	20	19	20	13	11	11
7	<i>Streptococcus pyogenes</i>	15	16	16	20	8	8
8	<i>Proteus vulgaris</i>	20	25	26	34	14	9

Аналіз отриманих даних табл. 2 свідчить, що плазмохімічно оброблена вода та плазмохімічно оброблений розчин NaCl є активними щодо подавляючої дії на певні мікроорганізми. Одним з можливих механізмів дії плазмохімічно обробленої води та водних розчинів NaCl на бактерії є зміна зовнішніх поверхонь клітки, що робить доступним рецептори для реактогенних ензимів, наприклад, лізоцину. Окисні сполуки, що містяться в обробленій воді та розчинах хлориду натрію, викликають у мікроорганізмів руйнування поверхневої структури та внутрішніх мембран. Цільність цитоплазмової мембрани руйнує роботу цілого переліку пов'язаних з мембраною ферментів, наприклад, дегідрогінез, та знижує ефективність роботи систем репарації ДНК.

Досліджено антагоністичну дію колоїдних розчинів наночастинок срібла різної концентрації, отриманих плазмохімічним способом, проти кишкової палички (*E.coli*) (табл. 3).

Таблиця 3

Антагоністична дія плазмохімічно оброблених розчинів AgNO₃ та AgCl

Концентрація, г/л	Затримка росту, %	
	AgNO ₃	AgCl
0,085	18 (±5)	6 (±4)
0,2	31 (±6)	24 (±5)
0,5	57 (±8)	36 (±6)

Встановлено, що наночастки срібла обох прекурсорів інгібують ріст кишкової палички *E.coli* за різних концентрацій. Проте слід зазначити, що за однакових умов плазмохімічного одержання наночастинок срібла з водних розчинів прекурсорів ($\tau = 10 \text{ хв}$; $I =$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

120 мА) інгібуюча дія часток, отриманих з прекурсорю AgNO_3 є вища майже в два рази і становить 18–57 %.

Висновки. Встановлено, що застосування контактної нерівноважної низькотемпературної плазми як інструменту впливу на воду та водні розчини NaCl , AgNO_3 , AgCl сприяє фізико-хімічним перетворенням з утворенням продуктів, що мають антагоністичну дію на мікроорганізми. Запропоновано схеми хімічних перетворень у воді та водних розчинах NaCl , AgNO_3 , AgCl під дією плазмового розряду. Встановлено підвищену антагоністичну дію отриманих продуктів плазмохімічного синтезу на певні мікроорганізми (*Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus saprophibicus*, *Staphylococcus epidermidis*, *E.coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Candida albicans* та ін.) порівняно з існуючими дезінфікуючими розчинами (лізоформ, стериліум).

Список використаних джерел

1. *Соціо-еколого-економічні проблеми водопостачання в Україні* / О. М. Маценко, О. Ю. Чигрин, В. І. Тарановський, А. І. Долгодуш // Механізм регулювання економіки. – 2011. – № 4. – С. 264–271.
2. *Tendero C. Atmospheric pressure plasmas: A review* / C. Tendero, C. Tixier, P. Tristant, J. Desmaison // *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*. – 2006. – Vol. 61 (1). – Pp. 2–30.
3. *Kaneko T. Static gas-liquid interfacial direct current discharge plasmas using ionic liquid cathode* / T. Kaneko, K. Baba, R. Hatakeyama // *Journal of Applied Physics*. – 2009. – Vol. 105 (10). – Pp. 103–306.
4. *Ostrikov K. Plasma nanoscience: setting directions, tackling grand challenges* / K. Ostrikov, U. Svelbar, A. B. Murphy // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2011. – № 44 (17). – Pp. 1–60.
5. *Contact nonequilibrium plasma as a tool for treatment of water and aqueous solutions: Theory and practice* / A. A. Pivovarov, A. V. Kravchenko, A. P. Tishchenko, N. V. Nikolenko, O. V. Sergeeva, M. I. Vorobeva, S. V. Treshchuk // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2015. – Vol. 85, № 5. – Pp. 1339–1350.
6. *Півоваров О. А. Використання контактної нерівноважної низькотемпературної плазми в гідрометалургійній промисловості : монографія* / О. А. Півоваров, М. І. Скиба. – Дніпропетровськ: Акцент ПП, 2015. – 206 с.
7. *Півоваров А. А. Неравновесная плазма: процессы активации воды и водных растворов* / А. А. Півоваров, А. П. Тищенко. – Днепропетровск : Грек, 2006. – 225 с.
8. *Pivovarov O. Treating aqueous solutions of sodium chloride by nonequilibrium low temperature plasma* / O. Pivovarov, R. Zakharov, M. Nikolenko // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2015. – Vol. 9, № 1. – Pp. 95–99.
9. *Воробйова М. І. Формування колоїдних наночасток срібла з водних розчинів AgNO_3 під дією контактної нерівноважної плазми* / М. І. Воробйова, О. А. Півоваров // Вісник ЧДТУ. – 2014. – № 4. – С. 39–44.

References

1. Matsenko, O.M., Chyhryn, O.Yu., Taranovskyi, V.I., Dolhodush, A.I. (2011). *Sotsio-ekoloho-ekonomichni problemy vodopostachannia v Ukraini* [Socio-ecological-economic challenges of water supply in Ukraine]. *Mekhanizm rehuliuвання ekonomiky – Mechanism of Economic Regulation*, no. 4, pp. 264–271 (in Ukrainian).
2. Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 61 (1), pp. 2–30.
3. Kaneko, T., Baba, K., Hatakeyama R. (2009). Static gas-liquid interfacial direct current discharge plasmas using ionic liquid cathode. *Journal of Applied Physics*, vol. 105 (10), pp. 103–306.
4. Ostrikov, K., Svelbar, U., Murphy A. B. (2011). Plasma nanoscience: setting directions, tackling grand challenges. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, no. 44 (17), pp. 1–60.
5. Pivovarov, A.A., Kravchenko, A.V., Tishchenko, A.P., Nikolenko, N.V., Sergeeva, O.V., Vorobeva, M.I., Treshchuk, S.V. (2015). Contact nonequilibrium plasma as a tool for treatment of water and aqueous solutions: Theory and practice. *Russian Journal of General Chemistry*, vol. 85, no. 5, pp. 1339–1350.

6. Pivovarov, O.A., Skyba, M.I. (2015). *Vykorystannia kontaktnoi nerivnovazhnoi nyzkotemperaturnoi plazmy v hidrometalurhiinii promyslovosti* [Application the contact nonequilibrium low-temperature plasma in hydrometallurgical industry]. Dnipropetrovsk: Aktsent PP (in Ukrainian).

7. Pivovarov, A.A., Tishchenko, A.P. (2006). *Neravnovesnaia plazma protsessy aktivatsii vody i vodnykh rastvorov* [The nonthermal plasma: the activation of the processes of water and aqueous solutions]. Dnepropetrovsk: Grek (in Russian).

8. Pivovarov, O., Zakharov, R., Nikolenko, M. (2015). Treating aqueous solutions of sodium chloride by nonequilibrium low temperature plasma. *Chemistry & Chemical Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 95–99.

9. Vorobiova, M.I., Pivovarov, O.A. (2014). Formuvannia koloidnykh nanochastok sribla z vodnykh rozchyniv AgNO₃ pid diieiu kontaktnoi nerivnovazhnoi plazmy [Formation of the colloid silver nanoparticles from aqueous solutions AgNO₃ under the influence of the contact nonequilibrium plasma]. *Visnyk ChDTU – Visnyk of Chernihiv State Technological University*, no. 4, pp. 39–44 (in Ukrainian).

Скиба Маргарита Іванівна – кандидат технічних наук, асистент кафедри технології неорганічних речовин та екології, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпропетровськ, 49053, Україна).

Скиба Маргарита Ивановна – кандидат технических наук, ассистент кафедры технологии неорганических веществ и экологии, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет» (просп. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, 49053, Украина).

Skiba Margarita – PhD in Technical Sciences, assistant of the Department of Inorganic Substances Technology and Ecology, State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Technology” (8 Gagarin Av., 49053 Dnepropetrovsk, Ukraine).

E-mail: Rita-vorobyova@yandex.ru

Півоваров Олександр Андрійович – доктор технічних наук, професор, ректор, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпропетровськ, 49053, Україна).

Пивоваров Александр Андреевич – доктор технических наук, профессор, ректор, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет» (просп. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, 49053, Украина).

Pivovarov Alexander – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Technology” (8 Gagarin Av., 49053 Dnepropetrovsk, Ukraine).

E-mail: apivo@fm.ua

Макарова Анна Костянтинівна – аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпропетровськ, 49053, Україна).

Макарова Анна Константиновна – аспирант кафедры технологии неорганических веществ и экологии, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет» (просп. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, 49053, Украина).

Makarova Anna – PhD student of Inorganic Substances Technology and Ecology, State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Technology” (8 Gagarin Av., 49053 Dnepropetrovsk, Ukraine).

E-mail: anmak123@mail.ru

Воробійова Вікторія Іванівна – кандидат технічних наук, асистент кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Воробийова Виктория Ивановна – кандидат технических наук, ассистент кафедры физической химии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» (просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина).

Vorobyova Victoria – PhD in Technical Sciences, assistant of Physical Chemistry Department, National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute” (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: viktorkathebest@yandex.ru

Гнатко Олена Миколаївна – старший викладач кафедри прикладної механіки, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпропетровськ, 49053, Україна).

Гнатко Елена Николаевна – старший преподаватель кафедры прикладной механики, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет» (просп. Гагарина, 8, г. Днепропетровск, 49053, Украина).

Gnatko Elena – Senior Lecturer, Department of Applied Mechanics, State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Technology” (8 Gagarin Av., 49053 Dnepropetrovsk, Ukraine).

E-mail: i-gen@mail.ru