

УДК 544.77.051; 544.77.051.2; 533.9.07  
DOI: 10.20535/1810-0546.2017.6.103890

М.І. Скиба<sup>1\*</sup>, О.А. Півоваров<sup>1</sup>, А.К. Макарова<sup>1</sup>, В.І. Воробйова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна

<sup>2</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

### МЕТОД ОТРИМАННЯ НАНОДИСПЕРСІЙ СРІБЛА ПІД ДІЄЮ ПЛАЗМОВОГО РОЗРЯДУ ЗА НАЯВНОСТІ ВОДОРОЗЧИННОГО ПОЛІМЕРУ

**Background.** Since the concentration of nanoparticles in silver dispersions obtained by plasma chemical method is not high, the possibility of increasing the yield of silver particles is considered.

**Objective.** The aim of the paper is to study the production of silver nanodispersions under the action of a plasma discharge when a synthetic polymer (poly(vinyl) alcohol) is introduced into the reaction medium.

**Methods.** It is proposed to increase the yield of silver particles by the synthetic polymeric group reagent addition – poly(vinyl) alcohol. The polymer under the action of a plasma discharge is a source of polymer radicals acting as an additional reductant of argentum ions and, as a consequence, an increase in the yield of silver particles is provided.

**Results.** In the presence of a water-soluble polymer, silver nanodispersions obtained by plasma chemical method got metal phase content almost 2–6 times higher than samples without using it.

**Conclusions.** The production of concentrated silver nanodispersions is decisive for their further practical application. The introduction of a water-soluble polymer has a significant effect on increasing the yield of silver nanoparticles with its insignificant concentration in solution (up to 5.0 g/dm<sup>3</sup>).

**Keywords:** silver dispersions; nanoparticles; plasma discharge; polyvinyl alcohol.

#### Вступ

Отримання концентрованих водних нанодисперсій із заданими властивостями на основі частинок срібла є необхідною стадією як для їх подальшого практичного застосування у вигляді розчинів, так і для створення наноструктурованих матеріалів на їх основі. Завдяки поєднанню унікальних фізико-хімічних і бактерицидних властивостей нанодисперсії срібла можуть бути основою для створення нових матеріалів для використання в технологіях водопідготовки та водоочищення, в медицині, текстильній та косметичній промисловості тощо. Однією з основних проблем, що стримує їх широке залучення в різні галузі виробництва, є відсутність високоефективних та інноваційних технологій отримання нанодисперсій срібла, здатних забезпечити рентабельність їх подальшого використання для модифікації існуючих матеріалів і створення нових на їх основі. Таким чином, розробка нових способів одержання нанодисперсій срібла наразі є актуальною.

Ключову роль при одержанні нанодисперсій срібла відіграють як спосіб їх формування, так і вибір додаткових відновлювальних/стабілі-

зуючих агентів. На сьогодні одним із найбільш інноваційних, екологічно безпечних та енергоощадних методів отримання нанорозмірних сполук є застосування плазмових розрядів [1]. Повідомляється про можливість одержання наночастинок металів та їх оксидів безпосередньо за допомогою плазмового розряду, що генерується між зануреними в рідину електродами [2, 3], на межі розділу фаз газ–рідина при зниженому тиску [4], плазми атмосферного тиску при взаємодії з рідиною [5] тощо. Наразі застосовують плазмові розряди переважно у газовій фазі, з цією метою використовують коронний, бар'єрний або іскровий плазмові розряди. Серед плазмохімічних розрядів перспективною, з точки зору практичного застосування, є контактна нерівноважна низькотемпературна плазма (КНП). У попередній роботі авторами показана ефективність використання низькотемпературної контактної нерівноважної плазми (КНП) для одержання нанодисперсій срібла з водних розчинів солі металу в одну технологічну стадію без застосування додаткових реагентів-відновників [6]. При всіх встановлених позитивних результатах досліджень доцільним є пошук способів підвищення виходу частинок срібла.

\*corresponding author: margaritaskiba88@gmail.com

Аналіз літератури [7–10] свідчить про ефективність введення в реакційне середовище при різних способах формування частинок срібла реагентів-стабілізаторів/відновників. Наразі застосовують як органічні, так і синтетичні речовини, оскільки природа функціональної групи визначає властивості одержаних нанодисперсій срібла. У низці праць відзначається ефективність застосування речовин саме полімерної групи: полі(вінілового) спирту [8–10], полівінілпіролідону [11–13], полістирену [14] або поліметилметакрилату.

### Постановка задачі

Становить науковий і практичний інтерес дослідження плазмохімічного одержання нанодисперсій срібла за наявності реагенту синтетичної полімерної групи. Метою роботи є дослідження одержання нанодисперсій срібла під дією плазмового розряду при введенні в реакційне середовище – полі(вініловий) спирт (ПВС).

### Методика експерименту

Дослідження проводили в газорідному реакторі періодичної дії об'ємом 0,1 дм<sup>3</sup>. Використовувались електроди з нержавкої сталі Х18Н10Т. Катод ( $d = 4$  мм) розміщено в рідинній частині, а анод ( $d = 2,4$  мм) – на відстані 10 мм від поверхні розчину. Об'єм розчину в реакторі становив 0,7 дм<sup>3</sup>. Охолодження реакційної суміші забезпечували безперервною циркуляцією холодної води. Тиск у реакторі становив  $80 \pm 4$  кПа. Для отримання плазмового розряду на електроди подавали напругу 500–1000 В. Сила струму підтримувалась на рівні  $120 \pm 6$  мА. Час плазмової обробки розчинів становив 5 хв. Розчини готували розчиненням аргентум нітрату в дистильованій воді в заданому співвідношенні. Спектри нанодисперсій срібла отримували на спектрофотометрі UV-5800PC із використанням кварцових кювет у діапазоні довжин хвиль 190–700 нм. Мікрофотографії частинок та їх розміри одержували на растровому мікроскопі JEOL JSM-6510LV. Використана напруга прискорення 3–20 кВ. Тверду фазу нанодисперсії срібла, отриману в результаті плазмохімічної обробки розчину, відцентрофуговану та висушену на повітрі при 25 °С, досліджували із застосуванням рентгенівського дифрактометра Ultima IV Rigaku. Розмірні характеристики нанодисперсій срібла та

їх агрегативну стійкість було досліджено із використанням аналізатора Malvern Zetasizer. Для одержання нанодисперсій срібла використовували аргентум нітрат, полі(вініловий) спирт (ПВС) (ММ = 10000–360000, ступінь гідролізу 86,7–88,7 %). ПВС розчиняли в дистильованій воді. У водний розчин нітрату срібла додавали розчин ПВС при дотриманні заданих співвідношень реагентів, розміщували його в реакторі та обробляли розрядом плазми.

### Результати досліджень

Аналіз літературних даних [8–10] свідчить, що при одержанні нанодисперсій срібла реагенти полімерної групи можуть чинити подвійний ефект: підвищувати ефективність отримання частинок срібла та/або збільшувати їх агрегативну стійкість за рахунок дії останнього і як відновника, і як стабілізатора. Як реагент полімерної групи було досліджено водорозчинний полімер ПВС. Вибір останнього зумовлений такими факторами: висока ефективність стабілізації, екологічна безпека та комерційна доступність. Крім того, амфіфільність ланцюгів полімеру дає змогу уникнути застосування при синтезі токсичних органічних розчинників, а можливість приготування водних розчинів ПВС робить процес синтезу наночастинок екологічно чистим, вони є потенційно придатними до застосування в біомедичних цілях.

Наявність ПВС у реакційному середовищі під час плазмохімічного одержання нанодисперсій срібла було оцінено за двома показниками: за впливом на ефективність виходу частинок срібла та на їх агрегативну стійкість. Для характеристики нанодисперсій срібла застосовували метод оптичної спектроскопії. Відповідно до теорії Мі-Друде, оптичні властивості нанодисперсій срібла характеризуються наявністю яскраво вираженої резонансної смуги поглинання поверхневого плазмонного резонансу (ППР) у діапазоні 380–450 нм [13].

Попередньо було досліджено вплив молекулярної маси ПВС при плазмохімічному одержанні нанодисперсій срібла. Варіювання середньої молекулярної маси (ММ) полімеру здійснювали в діапазоні від 10000 до 360000. Встановлено, що збільшення довжини ланцюга полімеру в 4 рази (ММ ПВС від 10000 до 40000), за інших рівних експериментальних умов, сприяє підвищенню ефективності одержання частинок срібла та їх агрегативної стійкості. Крім того, визначено, що в результаті заміни

ПВС-10 на ПВС-40 формуються частинки срібла меншого діаметра з вузьким розподілом за розмірами. При використанні полімеру з більшим значенням молекулярної маси (ММ ПВС 60000), вірогідно, зростає роль процесів його зшивання під дією КНП з формуванням матриць, у яких утворення частинок металу пригнічується сильними дифузійними обмеженнями, в результаті чого процес утворення частинок закінчується на стадії формування малоатомних кластерів срібла. Разом із зазначеними вище закономірностями збільшення молекулярної маси полімеру сприяє зниженню відносної швидкості формування частинок срібла внаслідок гальмування дифузії іонів  $\text{Ag(I)}$  при збільшенні в'язкості оброблюваного середовища. Враховуючи сказане, для подальших досліджень застосовували ПВС ММ 40000.

Досліджено вплив концентрації ПВС у реакційному середовищі на ефективність плазмохімічного одержання нанодисперсій срібла. На рис. 1 зображені спектри поглинання нанодисперсій срібла, отримані за різних кількості введення ПВС і початкової концентрації аргентум нітрату.

Аналіз отриманих даних свідчить, що без застосування ПВС (рис. 1, *a*, *б*, крива 1) в результаті дії плазмового розряду на розчин аргентум нітрату утворюються частинки срібла, що характеризуються наявністю максимуму поглинання ППР ( $\lambda_{\text{макс}}$ ) при 442 нм. При введенні в реакційну суміш перед обробкою розрядом

плазми полімеру (рис. 1, *a*, *б*, криві 2–5) на спектрі фіксується формування піка  $\lambda_{\text{макс}}$  у межах 384–410 нм, що також характеризує утворення частинок срібла. Збільшення інтенсивності піка, порівняно з даними без введення ПВС, свідчить, що, вірогідно, останній виступає як додатковий відновник і збільшує вихід частинок срібла. Підвищення концентрації ПВС з 0,5 до 1,25 г/дм<sup>3</sup> (рис. 1, *a*, криві 2, 3) сприяє різкому збільшенню інтенсивності піка ППР та його значному зсуву в короткохвильову область, що можна пояснити утворенням більшої кількості частинок срібла та/або зменшенням їх розміру. За більшої початкової концентрації аргентум нітрату підвищення концентрації ПВС з 0,5 до 1,25 г/дм<sup>3</sup> (рис. 1, *б*, криві 2, 3) має позитивний вплив, проте такої кількості полімеру не достатньо; і збільшення концентрації ПВС до 2,5 г/дм<sup>3</sup> (рис. 1, *б*, крива 4) сприяє одержанню максимального підвищення інтенсивності піка ППР та зсуву в короткохвильову область до ~410 нм. За обох досліджуваних концентрацій аргентум нітрату перевищення концентрацією ПВС експериментально визначеної "концентраційної межі" зумовлює зниження інтенсивності піка ППР: при 0,04 г/дм<sup>3</sup> збільшення з 1,25 до 2,5–5,0 г/дм<sup>3</sup> (рис. 1, *a*, криві 4, 5) та при 0,08 г/дм<sup>3</sup> – з 2,5 до 5,0 г/дм<sup>3</sup> (рис. 1, *б*, крива 5). Проте важливим є те, що ці значення вищі за дані без застосування полімеру. Вірогідно, його роль як відновника є домінантою за відносно високих концентрацій і

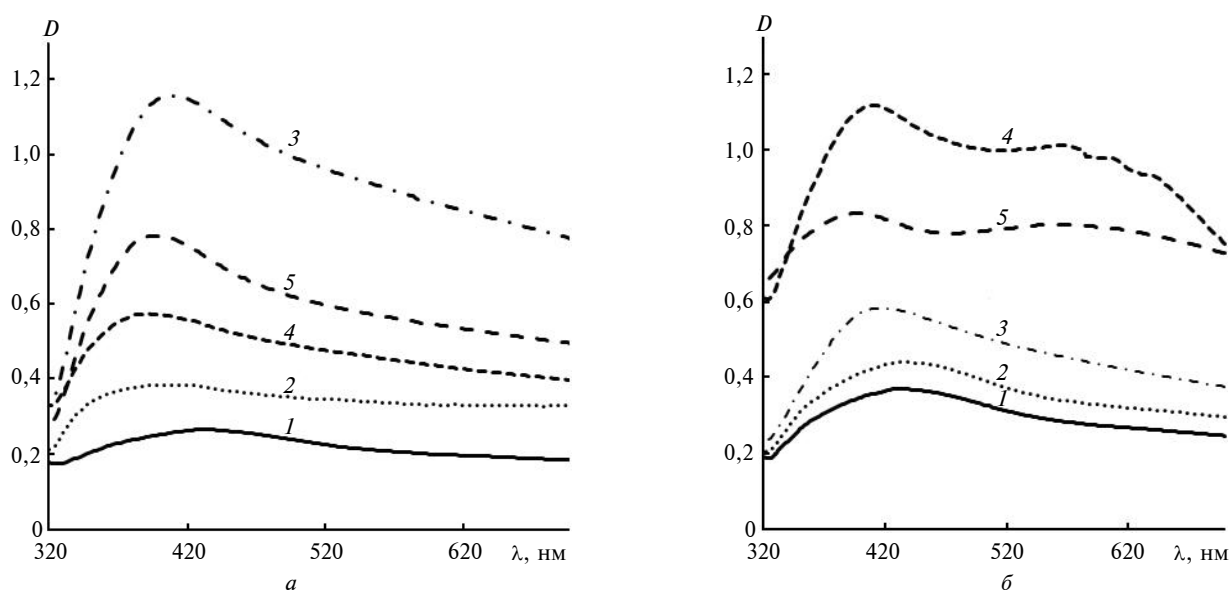


Рис. 1. Залежність інтенсивності поглинання ( $D$ ) плазмохімічно одержаних нанодисперсій срібла від довжини хвилі ( $\lambda$ ) за різних концентрацій аргентум нітрату, г/дм<sup>3</sup>: 0,04 (*a*), 0,08 (*б*) та полімеру, г/дм<sup>3</sup>: без застосування (1); 0,5 (2); 1,25 (3); 2,5 (4); 5,0 (5)

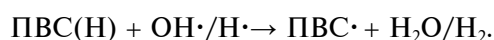
сприяє отриманню великих за розміром частинок у результаті їх утворення і росту. Крім того, свій внесок можуть давати реакції та їх продукти в середовищі під дією розряду КНП за високої концентрації полімеру, що потребує додаткових досліджень.

Таким чином, можна зробити висновок, що наявність ПВС у середовищі під час плазмохімічного утворення частинок срібла має позитивний вплив і сприяє підвищенню ефективності їх одержання. Всі довжини хвиль належать до діапазону плазмонного поглинання срібних частинок. Існує граничне значення концентрації, залежно від початкової кількості аргентум нітрату, що закономірно збільшується з підвищенням кількості прекурсору в середовищі.

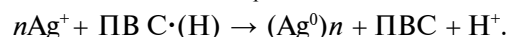
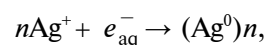
На сьогодні немає єдиного уявлення про характер взаємодії молекул ПВС з іонами й атомами *d*-металів, однак не викликає сумнівів той факт, що процес координації ПВП до частинок металу залежить від просторової структури полімеру. Збільшення оптичної густини отриманих розчинів срібла за наявності полімеру, що спостерігається, вірогідно, зумовлене зв'язуванням полімерного ланцюга з частинками срібла, в результаті чого формується полімерна матриця, що екранує ядро від контакту з молекулами води. На початковому етапі формується перший шар ПВС, що виникає в результаті нековалентних взаємодій між молекулою полімеру й атомами срібла, а решта зовнішніх полімерних шарів формуються за допо-

могою водневих зв'язків між фрагментами полімерного ланцюга ПВС.

Крім того, полімер може виступати як додатковий відновник іонів срібла. Як відомо, іони  $\text{Ag}^+$  мають високу реакційну здатність до гідратованих електронів і гідроксильних радикалів. Таким чином, вірогідно, в зазначених експериментальних умовах, за рахунок радикалів  $\text{OH}\cdot$  і  $\text{H}\cdot$  молекул води, які відтягують атом водню з  $\text{CH}(\text{OH})-\text{i}/\text{або}-\text{CH}_2-$  груп ПВС, утворюються полімерні радикали відповідно до реакції



Відповідно, відновлення іонів  $\text{Ag}^+$  відбувається за рахунок як сильно відновлюваних гідратованих електронів, так і полімерних радикалів:



Одним із параметрів, що визначає подальше практичне застосування дисперсій срібла, є їх агрегативна стійкість. Ступінь агрегування наночастинок металу може бути ефективно оцінений зміною характеристик поглинання: зміщення піка ППР у спектрі та його інтенсивності. Досліджено вплив наявності ПВС під час плазмохімічного одержання нанодисперсій срібла на їх агрегативну стійкість (рис. 2). Встановлено, що протягом усього проміжку часу поглинання максимуму поглинання не змінюється

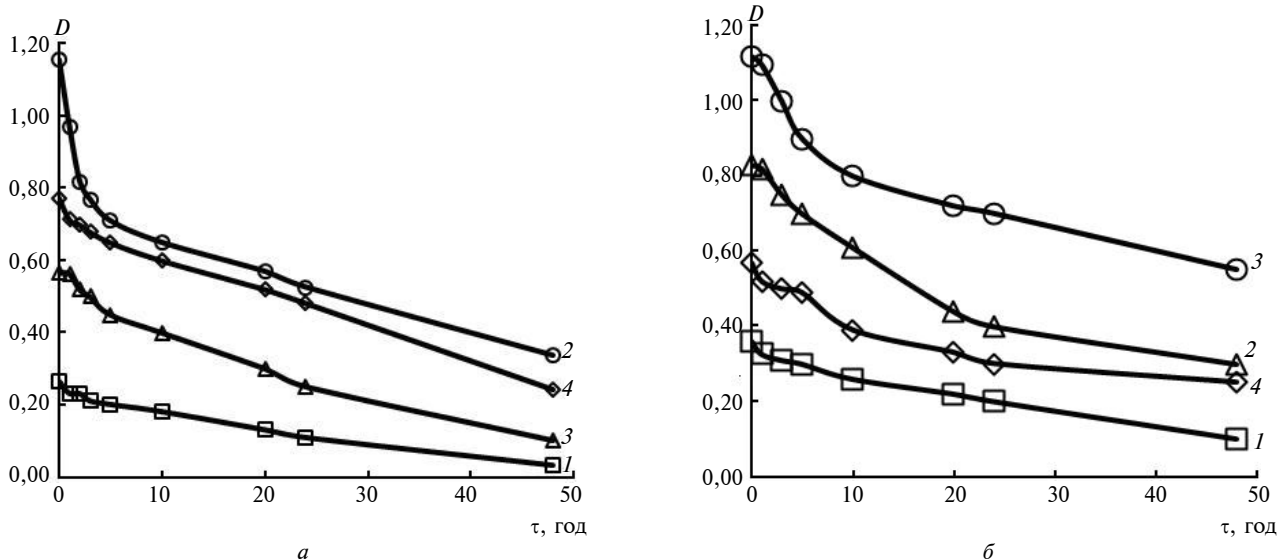


Рис. 2. Залежність зміни інтенсивності поглинання ( $D_{\text{ППР}\lambda_{\text{max}}}$ ) плазмохімічно одержаних нанодисперсій срібла від тривалості зберігання за різної концентрації аргентум нітрату,  $\text{г}/\text{дм}^3$ : 0,04 (а), 0,08 (б) та полімеру,  $\text{г}/\text{дм}^3$ : без застосування (1); 1,25 (2); 2,5 (3); 5,0 (4)

при зниженні інтенсивності смуги поглинання. Таким чином, найбільша стабільність одержаних наночастинок спостерігається під час їх зберігання протягом 1–5 год. За наявності ПВС для всіх досліджуваних його концентрацій через 1–5 год зберігання дисперсій срібла інтенсивність поглинання знижується лише на 0,5–16,0 %. При подальшому зберіганні розчинів протягом 24–48 год стабільність розчинів знижується.

Додатково агрегативну стійкість плазмохімічно одержаних нанодисперсій срібла за різної концентрації полімеру та без його застосування оцінено за значенням  $\zeta$ -потенціалу частинок срібла в розчині. Для нанодисперсій, одержаних при ПВС, значення становить від  $-17,3$  до  $-23,7$  мВ, а без полімеру –  $14,3$  мВ. Отримані дані підтверджують, що додавання ПВС сприяє одержанню більш стабільних дисперсій срібла, ніж без його введення. Проте отримані значення характерні для метастабільних систем, і одержані нанодисперсії срібла придатні для подальшого практичного застосування протягом нетривалого часу.

Тверду фазу плазмохімічно отриманої нанодисперсії срібла ( $I = 120$  мА,  $P = 0,08$  МПа,  $\tau = 5$  хв,  $C_{\text{AgNO}_3} = 0,04$  г/дм<sup>3</sup>,  $C_{\text{ПВС}} = 1,25$  г/дм<sup>3</sup>) здійснювали методом рентгеноструктурного аналізу. Одержані дані (рис. 3) свідчать про наявність рефлексів від кристалографічних площин 111, 200, 220, 311 і 222, максимумами яких знаходяться на кутах  $38,1^\circ$ ,  $44,3^\circ$ ,  $64,4^\circ$ ,  $77,4^\circ$  та  $81,6^\circ$  відповідно, що відповідають металевим частинкам срібла. Пік із центром приблизно  $19^\circ$  і один, близький до  $23^\circ$ , відповідають кристалічним частинкам молекул ПВС.

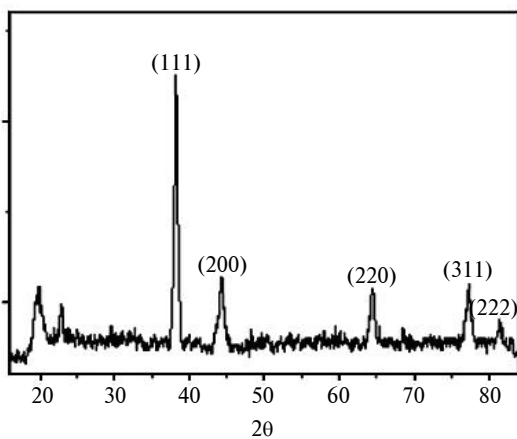


Рис. 3. Рентгенограма дисперсної фази, плазмохімічно одержаної за наявності полімеру нанодисперсії срібла ( $I = 120$  мА,  $P = 0,08$  МПа,  $\tau = 5$  хв)

Зразки плазмохімічно одержаних нанодисперсій срібла за різних концентрацій аргентум нітрату та визначеним доцільним вмістом полімеру ( $C_{\text{AgNO}_3} = 0,04$  г/дм<sup>3</sup>,  $C_{\text{ПВС}} = 1,25$  г/дм<sup>3</sup> та  $C_{\text{AgNO}_3} = 0,08$  г/дм<sup>3</sup>,  $C_{\text{ПВС}} = 2,5$  г/дм<sup>3</sup>) досліджували за допомогою електронної мікроскопії (рис. 4).

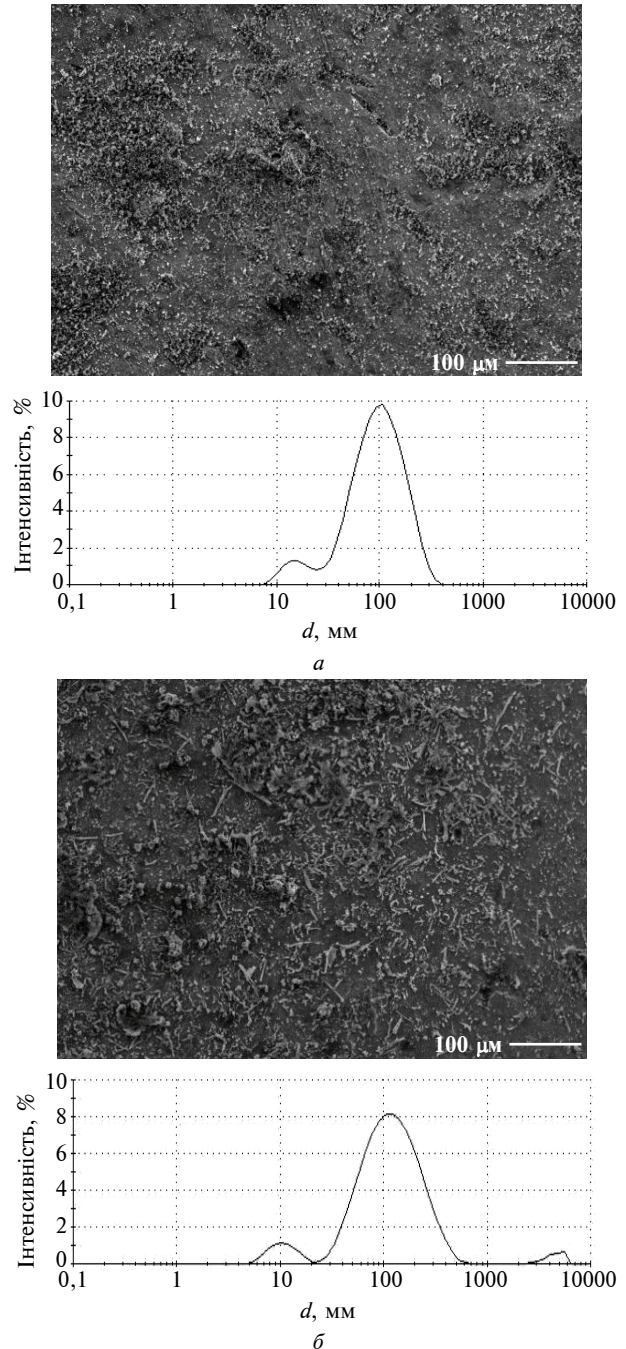


Рис. 4. Мікрофотографії (СЕМ) та розподілення за розмірами частинок дисперсій срібла, одержаних плазмохімічним способом за різних концентрацій аргентум нітрату: а –  $0,04$  г/дм<sup>3</sup>; б –  $0,08$  г/дм<sup>3</sup>

Зображення частинок срібла (SEM), одержаних під дією розряду КНП за наявності полімеру для різних концентрацій аргентум нітрату, свідчить про наявність агломерованих та окремих неагломерованих частинок срібла. Для більш детального аналізу розмірних характеристик нанодисперсій срібла їх було досліджено із використанням аналізатора Malvern Zetasizer. Отримані дані свідчать, що зразки містять у своєму складі значну частину фракції до 100 нм; також фіксується наявність агломератів, більших за розміром (150–200 нм). Крім того, встановлено, що середній розмір частинок дещо збільшується з підвищенням концентрації аргентум нітрату під час плазмохімічного одержання дисперсій.

### Висновки

Досліджено одержання нанодисперсій срібла із застосуванням розряду контактної нерівноважної плазми за наявності синтетичного полімеру – полі(вінілового) спирту. Досліджено вплив молекулярної маси ПВС при плазмохімічному одержанні нанодисперсій срібла. Встановлено, що збільшення довжини ланцюга полімеру в 4 рази (ММ ПВС від 10000 до 40000) сприяє підвищенню ефективності одержання

частинок срібла та їх агрегативної стійкості, формуються частинки срібла меншого діаметра з вузьким розподілом за розмірами. Встановлено формування частинок срібла за наявності полімеру, для яких характерним є пік  $\lambda_{\text{макс}} = 400\text{--}440$  нм. Утворення металевої фази підтверджено із застосуванням рентгенофазового дослідження. Мікроскопічні дослідження (SEM) свідчать про наявність неагломерованих і агломерованих частинок срібла. Середній розмір частинок срібла становить до 100 нм. Встановлено, що введення полімеру в реакційне середовище під час плазмохімічного формування частинок срібла сприяє підвищенню ефективності їх одержання. Досліджено вплив концентрації полімеру на ефективність утворення нанодисперсій срібла. Показано, що збільшення початкової концентрації аргентум нітрату в розчині потребує підвищення кількості полімеру для збільшення виходу частинок срібла. Встановлено, що синтетичний полімер також сприяє збільшенню агрегативної стійкості утворених нанодисперсій срібла порівняно зі зразками без його застосування.

У подальшому буде визначено вплив сили струму плазмохімічного розряду на ефективність одержання нанодисперсій срібла та їх агрегативну стійкість.

### Список літератури

1. Genki S., Tomohiro A. Nanomaterial synthesis using plasma generation in liquid // J. Nanomater. – 2015. – **2015**. – 21 p.
2. Sun B., Sato M., Clements J.S. Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water // J. Electrostatics. – 1997. – № 3. – P. 189–202.
3. Optical emission spectroscopy as a diagnostic for plasmas in liquids: opportunities and pitfalls / P. Bruggeman, T. Verreycken, M. Gonz'alez et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2010. – **43**, № 12. – 8 p.
4. Kaneko T., Baba K., Hatakeyama R. Static gas-liquid interfacial direct current discharge plasmas using ionic liquid cathode // J. Appl. Phys. – 2009. – **105**, № 10. – 5 p.
5. Jamroz P., Greda K., Pohl P. Development of direct current, atmospheric-pressure, glow discharges generated in contact with flowing electrolyte solutions for elemental analysis by optical emission spectrometry // TrAC Trends Anal. Chem. – 2012. – **41**. – P. 105–121.
6. Плазмохімічне одержання наночасток срібла / О.О. Пасенко, М.І. Скиба, А.К. Макарова та ін. // Вопросы химии и хим. технологии. – 2016. – № 4 (108). – С. 93–97.
7. Formation of surface layers on silver nanoparticles in aqueous and water-organic media / A.Yu. Olenin, Yu.A. Krutyakov, A.A. Kudrinskii, G.V. Lisichkin // Colloid J. – 2008. – **70**, № 1. – P. 71–76.
8. One-pot synthesis of PVA-capped silver nanoparticles their characterization and biomedical application / S. Rupali, R. Mangesh, L. Chitra, M. Sambhaji // Adv. Natural Sci.: Nanosci. Nanotechnol. – 2012. – **3**, № 1. – P. 103–105.
9. Gamma-irradiation assisted seeded growth of Ag nanoparticles within PVA matrix / H. Wael, K. Yasser, S. Yasser et al. // Mater. Chem. Phys. – 2011. – **128**. – № 1-2. – P. 109–113.
10. Fabrication and characterization of silver-polyvinyl alcohol nanocomposites / Z.H. Mbhele, M.G. Salemane, J.M. Nedeljković et al. // Chem. Mater. – 2003. – **15**. – P. 5019–5024.
11. Preparation of silver nanoparticles with controlled particle size / A. Zielińska, E. Skwarek, A. Zaleska et al. // Procedia Chem. – 2009. – **1**, № 2. – P. 1560–1566.

12. Chou K., Yueh-Sheng L. Effect of polyvinyl pyrrolidone molecular weights on the formation of nanosized silver colloids // *Mater. Chem. Phys.* – 2004. – 83, № 1. – P. 82–88.
13. Mechanisms of PVP in the preparation of silver nanoparticles / W. Hongshui, Q. Xueliang, Ch. Jianguo et al. // *Mater. Chem. Phys.* – 2005. – 94, № 2-3. – P. 449–453.
14. Fabrication of compact silver nanoshells on polystyrene spheres through electrostatic attraction / A.G. Dong, Y.J. Wang, Y. Tang et al. // *Chem. Commun.* – 2002. – № 4. – P. 350–351.

## References

- [1] S. Genki *et al.*, “Nanomaterial synthesis using plasma generation in liquid”, *J. Nanomater.*, vol. 2015, 21 p., 2015. doi: 10.1155/2015/123696
- [2] B. Sun *et al.*, “Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water”, *J. Electrostatics*, no. 3, pp. 189–202, 1997. doi: 10.1016/S0304-3886(97)00002-8
- [3] P. Bruggeman *et al.*, “Optical emission spectroscopy as a diagnostic for plasmas in liquids: opportunities and pitfalls”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 43, no. 12, 8 p., 2010. doi: 10.1088/0022-3727/43/12/124005
- [4] T. Kaneko *et al.*, “Static gas-liquid interfacial direct current discharge plasmas using ionic liquid cathode”, *J. Appl. Phys.*, vol. 105, no. 10, 5 p., 2009. doi: 10.1063/1.3133213
- [5] P. Jamroz *et al.*, “Development of direct current, atmospheric-pressure, glow discharges generated in contact with flowing electrolyte solutions for elemental analysis by optical emission spectrometry”, *TrAC Trends Anal. Chem.*, vol. 41, pp. 105–121, 2012. doi: 10.1016/j.trac.2012.09.002
- [6] O. Pasenko *et al.*, “Obtaining silver nanoparticles by plasmochemical method”, *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, no. 4 (108), pp. 93–97, 2016 (in Ukrainian).
- [7] A. Olenin *et al.*, “Formation of surface layers on silver nanoparticles in aqueous and water-organic media”, *Colloid J.*, vol. 70, no. 1, pp. 71–76, 2008. doi: 10.1134/S1061933X08010110
- [8] S. Rupali *et al.*, “One-pot synthesis of PVA-capped silver nanoparticles their characterization and biomedical application”, *Adv. Natural Sci.: Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 3, no. 1, pp. 015013, 2012. doi: 10.1088/2043-6262/3/1/015013
- [9] H. Wael *et al.*, “Gamma-irradiation assisted seeded growth of Ag nanoparticles within PVA matrix”, *Mater. Chem. Phys.*, vol. 128, no. 1-2, pp. 109–113, 2011. doi: 10.1016/j.matchemphys.2011.02.076
- [10] Z. Mbhele *et al.*, “Fabrication and Characterization of Silver – Polyvinyl Alcohol Nanocomposites”, *Chem. Mater.*, vol. 15, pp. 5019–5024, 2003. doi: 10.1021/cm034505a
- [11] A. Zielińska *et al.*, “Preparation of silver nanoparticles with controlled particle size”, *Procedia Chem.*, vol. 1, no. 2, pp. 1560–1566, 2009. doi: 10.1016/j.proche.2009.11.004
- [12] K. Chou *et al.*, “Effect of polyvinyl pyrrolidone molecular weights on the formation of nanosized silver colloids”, *Mater. Chem. Phys.*, vol. 83, no. 1, pp. 82–88, 2004. doi: 10.1016/j.matchemphys.2003.09.026
- [13] W. Hongshui *et al.*, “Mechanisms of PVP in the preparation of silver nanoparticles”, *Mater. Chem. Phys.*, vol. 94, no. 2-3, pp. 449–453, 2005. doi: 10.1016/j.matchemphys.2005.05.005
- [14] A.G. Dong *et al.*, “Fabrication of compact silver nanoshells on polystyrene spheres through electrostatic attraction”, *Chem. Commun.*, no. 4, pp. 350–351, 2002. doi: 10.1039/b110164c

М.І. Скиба, О.А. Півоваров, А.К. Макарова, В.І. Воробйова

## МЕТОД ОТРИМАННЯ НАНОДИСПЕРСІЙ СРІБЛА ПІД ДІЄЮ ПЛАЗМОВОГО РОЗРЯДУ ЗА НАЯВНОСТІ ВОДОРІЗЧИННОГО ПОЛІМЕРУ

**Проблематика.** Оскільки концентрація плазмохімічно одержаних наночастинок у дисперсіях срібла є невисокою, розглядається можливість підвищення виходу частинок срібла.

**Мета дослідження.** Метою роботи є дослідження процесу одержання нанодисперсій срібла під дією плазмового розряду при введенні в реакційне середовище синтетичного полімеру – полі(вінілового) спирту.

**Методика реалізації.** Пропонується підвищити вихід частинок срібла за допомогою додавання реагенту синтетичної полімерної групи – полі(вінілового) спирту, який у середовищі розряду плазми є джерелом полімерних радикалів, що виступають як додатковий відновник іонів аргентуму.

**Результати дослідження.** За наявності водорозчинного полімеру плазмохімічно одержано нанодисперсії срібла з майже в 2–6 разів більшим вмістом металевої фази порівняно зі зразками без його застосування.

**Висновки.** Одержання концентрованих нанодисперсій срібла є визначальним для їх подальшого практичного застосування. Введення водорозчинного полімеру має значний вплив на підвищення виходу наночастинок срібла за незначної його концентрації в розчині (до 5,0 г/дм<sup>3</sup>).

**Ключові слова:** дисперсії срібла; наночастинок; плазмовий розряд; полівініловий спирт.

М.И. Скиба, А.А. Пивоваров, А.К. Макарова, В.И. Воробьева

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ НАНОДИСПЕРСИЙ СЕРЕБРА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА В ПРИСУТСТВИИ ВОДОРАСТВОРИМОГО ПОЛИМЕРА

**Проблематика.** Поскольку концентрация плазмохимически полученных наночастиц в дисперсиях серебра является не-высокой, рассматривается возможность повышения выхода частиц серебра.

**Цель исследования.** Целью работы является исследование получения нанодисперсий серебра под воздействием плазменного разряда при введении в реакционную среду синтетического полимера – поли(винилового) спирта.

**Методика реализации.** Предлагается повысить выход частиц серебра с помощью добавления реагента синтетической полимерной группы – поли(винилового) спирта, который под воздействием разряда плазмы является источником полимерных радикалов, выступающих в качестве дополнительного восстановителя ионов аргентума. Как следствие, обеспечивается повышение выхода частиц серебра.

**Результаты исследования.** В присутствии водорастворимого полимера плазмохимически получены нанодисперсии серебра с почти в 2–6 раз большим содержанием металлической фазы по сравнению с образцами без его применения.

**Выводы.** Получение концентрированных нанодисперсий серебра является определяющим для их дальнейшего практического применения. Введение водорастворимого полимера имеет значительное влияние на повышение выхода наночастиц серебра при незначительной его концентрации в растворе (до 5,0 г/дм<sup>3</sup>).

**Ключевые слова:** дисперсии серебра; наночастицы; плазменный разряд; поливиниловый спирт.

Рекомендована Радою  
хіміко-технологічного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
21 квітня 2017 року