

## ПОЛУЧЕНИЕ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА НАНОЧАСТИЦ МЕДИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАТИОННОГО ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА

*Н.Н. Беглецова, Е.И. Селифонова, А.М. Захаревич,  
Р.К. Чернова, Е.Г. Глуховской*

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия*

Разработана методика химического синтеза наночастиц меди в мицеллах поверхностно-активного вещества (ПАВ) катионного типа – цетилпиридиния хлорида (ЦПХ), выступающего в роли стабилизатора. За счет варьирования объемов восстановителя гидразина при фиксированном значении pH реакционной среды найдены оптимальные условия синтеза наночастиц меди с размером в пределах 40–280 нм. Полученные наночастицы меди представляют интерес для использования в таких областях, как электроника и химия. Синтезированные наночастицы меди охарактеризованы с помощью методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и спектрофотометрии.

*Ключевые слова:* химическое восстановление, наночастицы меди, поверхностно-активное вещество.

### Введение

Известно, что свойства наноразмерных частиц металлов отличаются от свойств аналогичных макрообъектов, что связано с влиянием поверхностных и квантовых эффектов. Это открывает большие возможности для создания новых материалов [1]. В настоящее время существует большое количество работ, посвященных синтезу наночастиц меди, которые по тепло- и электропроводности не уступают таким благородным металлам, как серебро и золото. При этом медь является более дешевым металлом, что с экономической точки зрения является очень выгодным. Наночастицы меди в металлическом и окисленном состояниях могут использоваться в таких областях, как электроника (в качестве активных слоев солнечных батарей [2], в газовых сенсорах [3], конденсаторах [4]), химия (в роли катализаторов [5]), медицина (для создания антибактериальных средств [6]) и др. Наночастицы меди получают разными методами, такими как сонохимическое восстановление [7, 8], лазерная абляция [9, 10], термическое разложение [11, 12], микроволновое излучение [13, 14], магнетронное распыление [15, 16], химическое восстановление солей металла [17–20] и др. Химические методы являются широко применяемыми методами синтеза наночастиц металлов. Они дают наибольший выход конечного продукта с наименьшими затратами и являются достаточно простыми в исполнении. Выбор типа восстановителя сильно влияет на размер и стабильность образующихся наночастиц. В настоящее время перспективным является стабилизация наночастиц меди с помощью поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые препятствуют агрегации наночастиц и защищают их от окисления в течение определенного интервала времени. Основным преимуществом синтеза в мицеллах является то, что наночастицы формируются в ограниченном объеме, ядре мицеллы, вследствие процесса сольubilизации. В этом случае оболочка мицеллы является определенным ограничителем роста этих агрегатов, позволяя получать частицы малых размеров.

Задачей данного исследования была разработка оптимальной методики получения наночастиц меди в мицеллярном растворе цетилпиридиния хлорида (ЦПХ) с использованием сильного восстановителя – гидразина.

### Экспериментальная часть

#### Химические реактивы

Хлорид меди (II)  $[\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$  ( $M_r = 171$  г/моль), ГОСТ 4167-74. Цетилпиридиний хлорид (ЦПХ)  $[\text{C}_{21}\text{H}_{40}\text{ClNO}]$  ( $M_r = 357,5$  г/моль) с критической концентрацией мицеллообразования (ККМ)  $10^{-3}$  М. Гидразин гидрат  $[\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}]$  ( $M_r = 50$  г/моль) (Вектон), ГОСТ 19503-88, 100%-ный водный раствор. Водный аммиак  $[\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}]$  УНР 25-5 (Вектон) ГОСТ 3760, 25%-ный водный раствор. Дистиллированная вода (растворитель) имела проводимость  $5 \cdot 10^{-6}$  См/см.

#### Методика синтеза наночастиц меди

Получение наночастиц меди осуществлялось с помощью реакции химического восстановления. В отдельной колбе готовился 0,01 М водный раствор ЦПХ  $\text{C}_{21}\text{H}_{40}\text{ClNO}$ . Полученный раствор



Рис. 1. Исходный раствор после смешивания растворов первой и второй колбы

разделяли пополам и разливали в две конические колбы объемом по 100 мл. В первую колбу с 0,01 М раствором  $\text{C}_{21}\text{H}_{40}\text{ClNO}$  добавляли навеску прекурсора  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  массой 0,0428 г, что соответствовало 0,01 М концентрации соли в этом растворе. Раствор имел светло-голубой цвет. Затем в эту же колбу добавляли 5 мл водного аммиака  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  до  $\text{pH} = 11$ . Прозрачный раствор приобретал интенсивно-голубой цвет. Во вторую колбу с 0,01 М  $\text{C}_{21}\text{H}_{40}\text{ClNO}$  в первом, во втором и в третьем экспериментах добавляли 5 мл, 15 мл и 25 мл гидразина, соответственно. Для выявления оптимальных условий синтеза наночастиц меди значение  $\text{pH}$  реакционной среды довели до 11. В водном растворе ЦПХ гидразин растворялся с выделением тепла. При этом цвет раствора во второй колбе изменялся на светло-желтый. Раствор, находящийся в первой колбе, приливали к раствору во второй колбе при постоянном перемешивании стеклянной палочкой. Полученный раствор приобрел светло-желтый цвет (рис. 1).

Затем полученный раствор перемешивали с использованием магнитной мешалки ICA RCT basic при 500 об/мин и температуре 30 °С. Перемешивание было непрерывным в течение 120 минут. Через каждые 20 минут производилась фиксация цвета водного раствора, который изменялся от светло-желтого до коричневого и бурого (рис. 2).

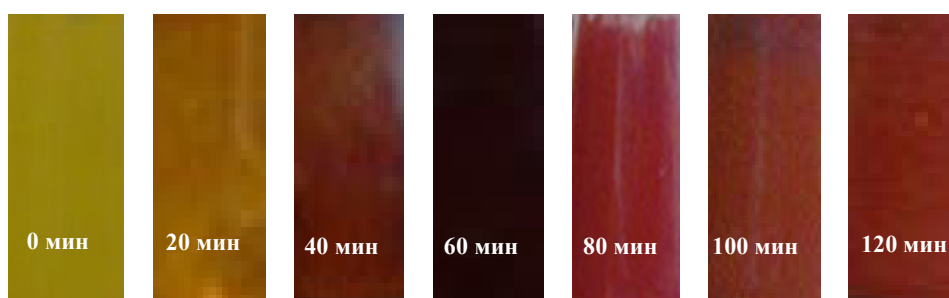


Рис. 2. Изменение окраски приготовленного мицеллярного раствора в ходе протекания химической реакции восстановления при его 2-часовом перемешивании

Изменение цвета раствора (рис. 2) косвенно свидетельствует об образовании наночастиц меди. Для подтверждения данного факта в полученной суспензии методом спектрофотометрического анализа на спектрофотометре SHIMADZU UV-2550 проводилась регистрация спектров поглощения в диапазоне длин волн от 190 до 900 нм (интерес исследования вызывает область длин волн от 500 до 750 нм, которая представлена в работе). Появление максимума поглощения раствора с наночастицами меди соответствует поверхностному плазмонному резонансу (ППР). Согласно литературным данным [21] для наночастиц меди ППР наблюдается в диапазоне длин волн  $\lambda = 570\text{--}590$  нм.

### Пробоподготовка раствора

При анализе продуктов синтеза на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) было обнаружено, что визуализация наночастиц меди затруднена наличием большого количества ПАВ на подложке. Для получения качественных изображений морфологии поверхности наночастиц меди проводилась пробоподготовка полученного коллоидного раствора с наночастицами меди по следующей схеме. Отбиралась проба раствора с наночастицами меди в количестве 1 мл и помещалась в пробирку типа «эппендорф», в которую добавляли 0,5 мл дистиллированной воды. Полученную смесь центрифугировали в течение 5 минут при 5000 об/мин на центрифуге Elmī CM-70M. Промывали осадок декантацией 0,5 мл отцентрифугированного раствора с добавлением к нему того же объема дистиллированной воды. Операции центрифугирования и промывки повторяли 6 раз. После процесса центрифугирования бралась проба раствора со дна эппендорфа, где визуально наблюдался осадок в виде частиц меди. Затем пробу наносили на кремниевые подложки, которые высушивали на термоплитке при температуре 100 °С в течение 5 минут. В дальнейшем на СЭМ Tescan Mira II LMU в режиме детектирования вторичных электронов (при ускоряющем напряжении 30 кВ) исследовалась морфология поверхности наночастиц меди.

### Результаты и обсуждение

#### Влияние концентрации гидразина

Для выбора оптимальной методики синтеза наночастиц меди исследования проводились при различных объемах восстановителя  $N_2H_4 \cdot H_2O$  5, 15 и 25 мл, при фиксированном значении  $pH = 11$  и постоянном перемешивании в течение 120 минут при температуре 30 °С (рис. 3).

На рис. 3, а показано СЭМ изображение наночастиц меди со средними размерами 140–320 нм, полученных при 5 мл  $N_2H_4 \cdot H_2O$ . Данные частицы образуют конгломераты, которые неравномерно расположены по всей поверхности подложки. Они имеют вид многогранников с различными формами, приближенными к сферической и кубической. На рис. 3, б представлен спектр поглощения с четко регистрируемой полосой ППР при длине волны 598 нм, что подтверждает образование в данном растворе наночастиц меди. На рис. 3, в представлено СЭМ изображение частиц меди со средними размерами от 60 нм и до 1000 нм, полученных при 15 мл  $N_2H_4 \cdot H_2O$ . Видно, что частицы имеют различные формы в виде неправильных многоугольников и так же расположены неравномерно по всей поверхности подложки. На рис. 3, г показан спектр поглощения раствора с продуктами синтеза наночастиц меди, имеющий полосу ППР при длине волны 585 нм, что также подтверждает присутствие в данном растворе наночастиц меди. На рис. 3, д из СЭМ изображения видно, что частицы меди, полученные при 25 мл  $N_2H_4 \cdot H_2O$ , представлены на подложке кремния в виде конгломератов отдельных частиц со средними размерами от 40 до 280 нм, форма которых близка к сферической. На рис. 3, е представлен спектр поглощения с полосой ППР при длине волны 585 нм, что подтверждает присутствие в данном растворе наночастиц меди. Анализ регистрируемых спектров поглощения показывает, что с увеличением объема восстановителя гидразина от 5 до 25 мл оптическая плотность раствора увеличивается примерно в 14 раз, т. е. количество образовавшихся наночастиц меди растет. Данное наблюдение согласуется с литературными данными.

В ходе эксперимента было установлено, что оптимальными условиями образования наночастиц меди со средними размерами 40–280 нм являются объем восстановителя гидразина – 25 мл при  $pH = 11$ . Большой разброс в размерах наночастиц меди может быть связан с агрегацией частиц в процессе их высушивания на термоплитке. При этом полученный коллоидный раствор характеризуется рядом особенностей. ПАВ образует в водных растворах агрегаты – мицеллы. Мицеллам присущ динамический характер (непрерывный обмен молекулам с объемной фазой), поэтому они могут состоять из десятков, сотен, тысяч мономерных молекул (ионов). В данной работе ПАВ бралось в концентрации чуть выше значения ККМ, что способствует самопроизвольному образованию сферических мицелл ЦПХ в водном растворе. Когезия между полярными молекулами воды больше, чем между углеводородными цепями и водой. Поэтому любые процессы, связанные с переходом углеводородных радикалов из воды в близкую по полярности фазу, являются энергетически выгодными. Гидрофобные цепи вытесняются из воды в ядра мицелл. Ядро мицелл – гидрофобно, однако может содержать некоторое количество воды. Оно является свое-

образным нанореактором для центров зародышеобразования наночастиц меди. Восстановленная медь, попавшая в нанореактор, окружена гидрофобной частью мицеллы, защищающей ее от окисления. При этом размер и форма наночастиц меди регулируется размером мицелл ПАВ.

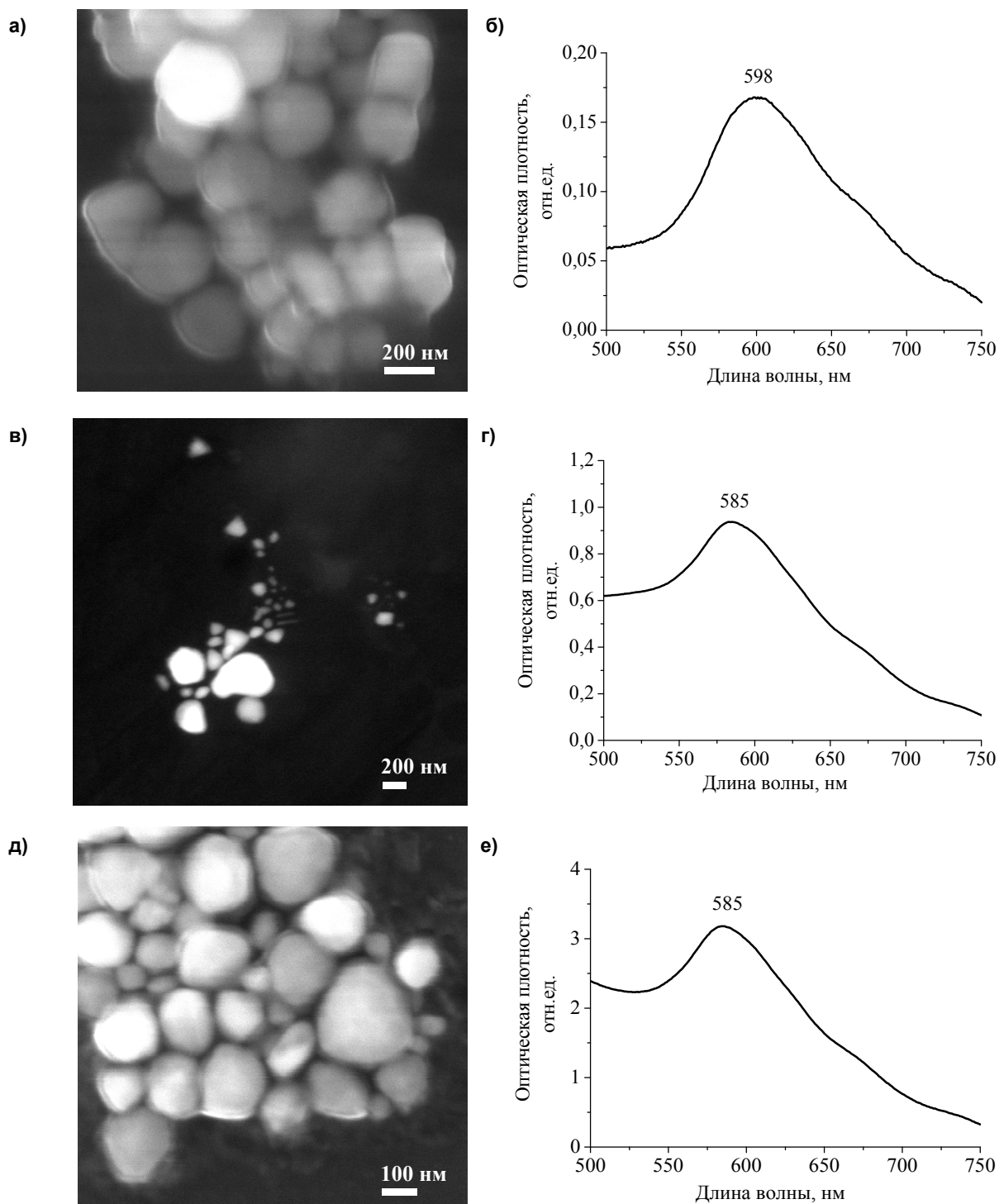
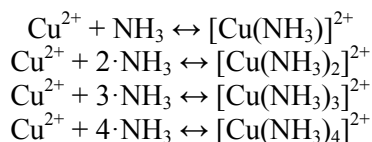


Рис. 3. СЭМ изображения (а, в, д) и спектры поглощения (б, г, е) наночастиц меди, полученных при pH = 11 и при различных объемах восстановителя  $N_2H_4 \cdot H_2O$  (5, 15 и 25 мл соответственно)

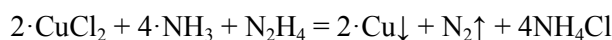
### Механизм роста наночастиц меди и роль ЦПХ

Гидразин относится к группе сильных восстановителей, окислительно-восстановительный потенциал которого сильно зависит от значения рН реакционной среды [ $E^{\circ}$ ,  $B = -0,5 (-1,15)$  для рН 3–14]. Он позволяет проводить синтез наночастиц меди при нормальных условиях. Отсутствие стабилизирующего агента приводит к образованию крупных агрегатов, поэтому в данной работе применяли стабилизирующий агент, в роли которого был катионный ПАВ – ЦПХ.

В качестве прекурсора выступала комплексная соль меди  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ , полученная в избытке аммиака по схеме:



Следовательно, в растворе будет находиться смесь нескольких аммиакатов меди, количественные соотношения между которыми зависят от концентрации аммиака. В сильнощелочной среде реакция восстановления аммиаката меди протекает с образованием наночастиц меди и выделением азота:



Синтезированные наночастицы меди с использованием в качестве ПАВ ЦПХ содержат внутренний слой, связанный с гидрофобными группами, наружный слой связан с гидрофильными группами, повернутыми в водный раствор. Таким образом, присутствие ЦПХ формирует внутренний и внешний слой вокруг наночастиц меди, являясь при этом стабилизирующим агентом, который защищает их от окисления, предотвращает агломерацию и седиментацию частиц.

### Выводы

1. Отработана и предложена методика синтеза наночастиц меди методом химического восстановления при комнатной температуре с использованием сильного восстановителя – гидразина и стабилизатора – ПАВ катионного типа.

2. Установлено, что на процесс синтеза наночастиц меди влияет такой параметр, как объем восстановителя. Анализ исследований, проведенных на СЭМ, показал, что наночастицы меди со средними размерами от 40 до 280 нм могут быть получены при объеме восстановителя 25 мл и рН = 11. Данный объем восстановителя и значение рН подготовленного раствора для синтеза наночастиц меди являются оптимальными для получения сферических частиц меди нанометрового размера.

3. Разработанная методика синтеза наночастиц меди характеризуется хорошей воспроизводимостью результатов. При этом она является простым и дешевым методом синтеза наночастиц меди без применения сложных установок, инертных газов и дополнительного нагревания, что может быть актуально и экономически выгодно при производстве наночастиц меди в больших объемах.

**Работа выполнена при поддержке грантами РФФИ № 16-07-00093 и № 16-07-00185.**

### Литература

1. Наноразмерные частицы в катализе: получение и использование в реакциях гидрирования и восстановления (обзор) / Ю.В. Попов, В.М. Мохов, Д.Н. Небыков и др. // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – Т. 12, № 7(134). – С. 5–44.
2. Synthesis and characterization of copper nanoparticles and copper-polymer nanocomposites for plasmonic photovoltaic applications / S.C. Ezugwu // Thesis. – 2013. – 114 p.
3. Dilute hydrogen sulfide sensing properties of CuO-SnO<sub>2</sub> thin film prepared by low-pressure evaporation method / J. Tamaki, K. Shimanoe, Y. Yamada et al. // Sens. Actuators B Chem. – 1998. – Vol. 49. – Iss. 1–2. – P. 121–125. DOI: 10.1016/S0925-4005(98)00144-0
4. Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure / M.K. Wu, J.R. Ashburn, C.J. et al. // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 58. – No. 9. – P. 908–910. DOI: 10.1103/PhysRevB.35.7115.
5. The catalytic methanol synthesis over nanoparticle metal oxide catalysts / C.L. Carnes, K.J. Kalbunde // J. Mol. Catal. A Chem. – 2003. – Vol. 194. – No. 1. – P. 227–236. DOI: 10.1016/S1381-1169(02)00525-3

6. Synthesis and antimicrobial activity of copper nanoparticles / J. Ramyadevi, K. Jeyasubramanian, A. Marikani et al. // *Mater. Lett.* – 2012. – Vol. 71. – P. 114–116. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.12.055
7. Sonochemical syntheses of a nano-sized copper (II) supramolecule as a precursor for the synthesis of copper (II) oxide nanoparticles / V. Safarifard, A. Morsali // *Ultrason. Sonochem.* – 2012. – Vol. 19. – Iss. 4. P. 823–829. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2011.12.013
8. Sonochemical shape control of copper hydroxysulfates / R. Kas, Ö. Birer // *Ultrason. Sonochem.* – 2012. – Vol. 19. – P. 692–700. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2011.08.007
9. Effect of aging on copper nanoparticles synthesized by pulsed laser ablation in water: structural and optical characterizations / R.K. Swarnkar, S.C. Singh, R. Gopal // *Bull. Mater. Sci.* – 2011. – Vol. 34, no. 7. – P. 1363–1369. DOI: 10.1007/s12034-011-0329-4
10. Size, composition and optical properties of copper nanoparticles prepared by laser ablation in liquids / R.M. Tilaki // *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* – 2007. – Vol. 88, iss. 2. – P. 415–419. DOI: 10.1007/s00339-007-4000-2
11. Synthesis of copper and copper (I) oxide nanoparticles by thermal decomposition of a new precursor / M. Salavati-Niasari, F. Davar // *Mater. Lett.* – 2009. – Vol. 63, Iss. 3–4. – P. 441–443. DOI: 10.1016/j.matlet.2008.11.023
12. Salavati-Niasari, M. Synthesis and characterization of metallic copper nanoparticles via thermal decomposition / M. Salavati-Niasari, F. Davar, N. Mir // *Polyhedron.* – 2008. – Vol. 27, Iss. 17. – P. 3514–3518. DOI: 10.1016/j.poly.2008.08.020
13. Microwave irradiation assisted growth of Cu, Ni, Co metals and/or oxides nanoclusters and their catalytic performance / O.A. Fouad, M.S. El-Shall // *Nano: Brief Reports and Reviews.* – 2012. – Vol. 7. – No. 5. – 10 p. DOI: 10.1142/S1793292012500348
14. Zhua, H.T. Rapid synthesis of copper nanoparticles by sodium hypophosphite reduction in ethylene glycol under microwave irradiation / H.T. Zhua, C.Y. Zhang, Y.S. Yin // *J. Cryst. Growth.* – 2004. – Vol. 270. – Iss. 3–4. – P. 722–728. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2004.07.008
15. Reactive magnetron sputtering of copper, silver, and gold / J.F. Pierson, D. Wiederkehr, A. Billard // *Thin Solid Film.* – 2005. – Vol. 478. – Iss. 1–2. – P. 196–205. DOI: 10.1016/j.tsf.2004.10.043
16. Banerjee, A.N. Size controlled deposition of Cu and Si nano-clusters by an ultra-high vacuum sputtering gas aggregation technique / A.N. Banerjee, R. Krishna, B. Das // *Appl. Phys. A.* – 2008. – Vol. 90. – P. 299–303. DOI: 10.1007/s00339-007-4271-7
17. Biçer, M. Controlled synthesis of copper nano/microstructures using ascorbic acid in aqueous CTAB solution / M. Biçer, İ. Şişman // *Powder Technol.* – 2010. – Vol. 198. – P. 279–284. DOI: 10.1016/j.powtec.2009.11.022
18. Granata, G. Study of the synthesis of copper nanoparticles: the role of capping and kinetic towards control of particle size and stability / G. Granata, T. Yamaoka, F. Pagnanelli // *J. Nanopart. Res.* – 2016. – Vol. 18, No. 133. – 12 p. DOI: 10.1007/s11051-016-3438-6
19. Синтез наночастиц меди в мицеллах поверхностно-активного вещества / Н.Н. Беглецова, О.А. Шинкаренко, Е.И. Селифонова и др. // *Материалы Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием. Практическая биомеханика. Сб. тез.* – С. 70–71.
20. Нанотехнологии на границах раздела / Е.Г. Глуховской, Р.К. Чернова, Н.Н. Беглецова и др. – Саратов: Саратовский источник, 2017. – 105 с.
21. Cu nanoparticles: synthesis, crystallographic characterization, and stability / S.A. AL-Thabaiti, A.Y. Obaid, Z. Khan // *Colloid Polym Sci.* – 2015. – 12 p. DOI: 10.1007/s00396-015-3633-5

**Беглецова Надежда Николаевна** – студентка кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского. 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83. E-mail: nadya-beg98@yandex.ru

**Селифонова Екатерина Игоревна** – кандидат химических наук, старший научный сотрудник отдела наноаналитики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского. 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83. E-mail: selif-ei@yandex.ru

**Захаревич Андрей Михайлович** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией «Диагностика наноматериалов и структур», Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского. 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83. E-mail: zaharevicham@yandex.ru

**Чернова Римма Кузьминична** – доктор химических наук, профессор кафедры «Аналитическая химия и химическая экология», заведующий отделом наноаналитики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского. 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83. E-mail: chernov-ia@yandex.ru

**Глуховской Евгений Геннадьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, заведующий лабораторией «Пленочные наноструктурированные материалы», Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского. 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83. E-mail: glukhovskoy@gmail.com

*Поступила в редакцию 17 мая 2017 г.*

---

DOI: 10.14529/chem170402

## PREPARATION OF COLLOIDAL SOLUTION OF COPPER NANOPARTICLES USING CATIONIC SURFACTANT

**N.N. Begletsova**, *nadya-beg98@yandex.ru*

**E.I. Selifonova**, *selif-ei@yandex.ru*

**A.M. Zakharevich**, *zaharevicham@yandex.ru*

**R.K. Chernova**, *chernov-ia@yandex.ru*

**E.G. Glukhovskoy**, *glukhovskoy@gmail.com*

*Saratov State University, Saratov, Russian Federation*

The technique of chemical synthesis of copper nanoparticles stabilized in the micelles of cationic surfactant, cetylpyridinium chloride (CPC), has been developed. By varying the volume of the reducing agent, hydrazine, at fixed pH values of the reaction environment the optimal conditions for synthesis of copper nanoparticles with a stable size ranging from 40 to 280 nanometers have been found. The copper nanoparticles obtained in these way are of interest for use in such fields as electronics and chemistry. The synthesized copper nanoparticles have been characterized with the aid of scanning electron microscopy (SEM) and UV-visible spectroscopy.

*Keywords: chemical reduction, copper nanoparticles, surfactant.*

### References

1. Popov Yu.V., Mokhov V.M., Nebykov D.N., Budko I.I. Nanodispersed Particles in Catalysis: Preparation and Using in Hydrogenation and Reduction Reactions (a review). *Bulletin of the Volgograd State Technical University*. 2014, vol. 12, no. 7(134), pp. 5–44.
2. Ezugwu S.C. Synthesis and Characterization of Copper Nanoparticles and Copper-Polymer Nanocomposites for Plasmonic Photovoltaic Applications. *The Thesis*. 2013, 114 p.
3. Tamaki J., Shimanoe K., Yamada Y., Yamamoto Y., Miura N., Yamazoe N. Dilute Hydrogen Sulfide Sensing Properties of CuO-SnO<sub>2</sub> Thin Film Prepared by Low-pressure Evaporation Method. *Sens. Actuators B Chem.* 1998, vol. 49, iss. 1–2, pp. 121–125. DOI: 10.1016/S0925-4005(98)00144-0
4. Wu M.K., Ashburn J.R., Torng C.J., Hor P.H., Meng R.L., Gao L. Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. *Phys. Rev. Lett.* 1987, vol. 58, no. 9, pp. 908–910. DOI: 10.1103/PhysRevB.35.7115
5. Carnes C.L., Kalbunde K.J. The Catalytic Methanol Synthesis Over Nanoparticle Metal Oxide Catalysts. *J. Mol. Catal. A Chem.* 2003, vol. 194, no. 1, pp. 227–236. DOI: 10.1016/S1381-1169(02)00525-3.
6. Ramyadevi J., Jeyasubramanian K., Marikani A., Rajakumar G., Rahuman A. Synthesis and Antimicrobial Activity of Copper Nanoparticles. *Mater. Lett.* 2012, vol. 71, pp. 114–116. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.12.055

7. Safarifard V., Morsali A. Sonochemical Syntheses of a Nano-sized Copper (II) Supramolecule as a Precursor for the Synthesis of Copper (II) Oxide Nanoparticles. *Ultrason. Sonochem.* 2012, vol. 19, iss. 4, pp. 823–829. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2011.12.013
8. Kas R., Birer Ö. Sonochemical Shape Control of Copper Hydroxysulfates. *Ultrason. Sonochem.* 2012, vol. 19, pp. 692–700. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2011.08.007
9. Swarnkar R.K., Singh S.C., Gopal R. Effect of Aging on Copper Nanoparticles Synthesized by Pulsed Laser Ablation in Water: Structural and Optical Characterizations. *Bull. Mater. Sci.* 2011, vol. 34, no. 7, pp. 1363–1369. DOI: 10.1007/s12034-011-0329-4
10. Tilaki R.M. Size, Composition and Optical Properties of Copper Nanoparticles Prepared by Laser Ablation in Liquids. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* 2007, vol. 88, iss. 2, pp. 415–419. DOI: 10.1007/s00339-007-4000-2
11. Salavati-Niasari M., Davar F. Synthesis of Copper and Copper (I) Oxide Nanoparticles by Thermal Decomposition of a New Precursor. *Mater. Lett.* 2009, vol. 63, iss. 3–4, pp. 441–443. DOI: 10.1016/j.matlet.2008.11.023
12. Salavati-Niasari M., Davar F., Mir N. Synthesis and Characterization of Metallic Copper Nanoparticles Via Thermal Decomposition. *Polyhedron.* 2008, vol. 27, iss. 17, pp. 3514–3518. DOI: 10.1016/j.poly.2008.08.020
13. Fouad, O.A., El-Shall M.S. Microwave Irradiation Assisted Growth of Cu, Ni, Co Metals and/or Oxides Nanoclusters and Their Catalytic Performance. *Nano: Brief Reports and Reviews.* 2012, vol. 7, no. 5, 10 p. DOI: 10.1142/S1793292012500348
14. Zhua, H.T., Zhang C.Y., Yin Y.S. Rapid Synthesis of Copper Nanoparticles by Sodium Hypophosphite Reduction in Ethylene Glycol Under Microwave Irradiation. *J. Cryst. Growth.* 2004, vol. 270, iss. 3–4, pp. 722–728. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2004.07.008
15. Pierson, J.F., Wiederkehr D., Billard A. Reactive Magnetron Sputtering of Copper, Silver, and Gold. *Thin Solid Films.* 2005, vol. 478, iss. 1–2, pp. 196–205. DOI: 10.1016/j.tsf.2004.10.043
16. Banerjee A.N., Krishna R., Das B. Size Controlled Deposition of Cu and Si Nano-clusters by an Ultra-high Vacuum Sputtering Gas Aggregation Technique. *Appl. Phys. A.* 2008, vol. 90, pp. 299–303. DOI: 10.1007/s00339-007-4271-7
17. Biçer, M., Şişman İ. Controlled Synthesis of Copper Nano/Microstructures Using Ascorbic Acid in Aqueous CTAB Solution. *Powder Technol.* 2010, vol. 198, pp. 279–284. DOI: 10.1016/j.powtec.2009.11.022
18. Granata, G., Yamaoka T., Pagnanelli F. Study of the Synthesis of Copper Nanoparticles: the Role of Capping and Kinetic Towards Control of Particle Size and Stability. *J. Nanopart. Res.* 2016, vol. 18, no. 133. 12 p. DOI: 10.1007/s11051-016-3438-6
19. Begletsova N.N., Shinkarenko O.A., Selifonova E.I., Tsvetkova O.Yu., Zakharevich A.M., Terin D.V., Chernova R.K., Glukhovskoy E.G. Synthesis of Copper Nanoparticles in Surfactant Micelles. *Proceedings of the All-Russian Conference of Young Scientists with International Participation. Applied Biomechanics.* 2016, pp. 70–71.
20. Glukhovskoy E.G., Chernova R.K., Begletsova N.N., Shinkarenko O.A., Selifonova E.I., Tsvetkova O.Yu., Glukhovskaya E.V. Nanotechnologies at the Interfaces. *Saratov: Saratov Source.* 2017, p. 105.
21. AL-Thabaiti S.A., Obaid A.Y., Khan Z. Cu Nanoparticles: Synthesis, Crystallographic Characterization, and Stability. *Colloid Polym Sci.* 2015, 12 p. DOI: 10.1007/s00396-015-3633-5

Received 17 May 2017

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Получение коллоидного раствора наночастиц меди с использованием катионного поверхностно-активного вещества / Н.Н. Беглецова, Е.И. Селифонова, А.М. Захаревич и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». – 2017. – Т. 9, № 4. – С. 14–21. DOI: 10.14529/chem170402

#### FOR CITATION

Begletsova N.N., Selifonova E.I., Zakharevich A.M., Chernova R.K., Glukhovskoy E.G. Preparation of Colloidal Solution of Copper Nanoparticles Using Cationic Surfactant. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry.* 2017, vol. 9, no. 4, pp. 14–21. (in Russ.). DOI: 10.14529/chem170402