

Рентгенівський аналіз зразків, які містять наночастинки сполук кадмію

С.Ю. Капітула^{1,*}, Б.Д. Нечипорук¹, Н.Б. Данілевська², Б.А. Татарин²

¹ Рівненський державний гуманітарний університет, вул. Остафова, 31, 33028 Рівне, Україна

² Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки,
проспект Волі, 13, 43025 Луцьк, Україна

(Одержано 18.05.2015; у відредагованій формі – 13.10.2015; опубліковано online 20.10.2015)

Показана можливість отримання наночастинок сполук кадмію електролітичним методом з використанням кадмієвих електродів і кухонної солі в якості електроліту. При температурі електроліту 98 °С отримані наночастинки CdCO_3 , $\beta\text{-Cd(OH)}_2$ і $\gamma\text{-Cd(OH)}_2$ розміри яких оцінені за формулою Дебая-Шеррера в 22 нм, 21 нм і 19 нм відповідно. Вміст даних сполук визначався рентгенофазовим методом. Проведено аналіз впливу умов синтезу на вміст карбонату кадмію.

Ключові слова: Гідроксид кадмію, Карбонат кадмію, Рентгеноструктурний аналіз, Структурна амплітуда, Фактор повторювальності, Кутовий множник, Просторова група.

PACS numbers: 61.05.C, 61.46.Df, 61.82.Fk

1. ВСТУП

Гідроксид кадмію використовується для отримання інших сполук кадмію, а також в електротехніці для виготовлення анодів нікель-кадмієвих та срібно-кадмієвих акумуляторів [1]. Перспективне створення на основі стабільних колоїдних частинок CdS і частинок ядро-оболонка $\text{CdS} / \text{Cd(OH)}_2$ квантових точок, які використовуються, як біомітки для аналізу крові та інших біологічних об'єктів. Гідроксид кадмію Cd(OH)_2 в наноструктурованому вигляді можна використовувати, як прекурсор для отримання оксиду кадмію [2, 3].

Оксид кадмію CdO відноситься до широкозонних напівпровідникових сполук $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ [4, 5], ширина забороненої зони якого складає 2,3 еВ. Тонкі плівки CdO перспективні в якості прозорих електродів і антивідбиваючих покриттів у фотоелектричних перетворювачах, сонячних елементах та інших оптоелектронних приладах [6, 7].

Карбонат кадмію перспективний матеріал для використання в якості покриття поверхні електролітичних капсул, твердофазних реакцій і також для отримання оксиду кадмію [8].

Метою даної роботи є дослідження впливу технологічних режимів на фазовий склад нанокристалів сполук кадмію.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дрібнодисперсні порошки сполук кадмію було отримано в скляному електролізері у якому кадмієві електроди мали циліндричну форму з розмірами: діаметр 10 мм і висота 170 мм. Як електроліт використовували розчин хлористого натрію в дистильованій воді з концентрацією 500 мг/л. Процес електролізу проводився за температури електроліту, яка змінювалась в межах від кімнатної до 100 °С. Тривалість експерименту варювала від 1 до 4 год, при густині струму $2,75 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2$.

Живлення електролізера здійснювалося від регульованого стабілізованого джерела постійного стру-

му. Для рівномірного використання кадмієвих електродів здійснювався реверс напряму постійного струму. Після закінчення електролізу електроліт, фільтрували за допомогою паперового фільтру, й отриманий порошок промивали п'ятикратним об'ємом дистильованої води. Зразки висушували на повітрі за кімнатної температури. У кожному експерименті визначали масу кадмієвих електродів і масу отриманого порошку.

Рентгенівські дослідження проводилися на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4 з використанням $\text{CuK}\alpha$ випромінювання за кімнатної температури. Анодна напруга і сила струму склали відповідно 41 кВ і 21 мА. Крок сканування дорівнював $0,05^\circ$, а час експозиції 5 с.

3. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ

На рис. 1 показано рентгенівську дифрактограму порошку, отриманого на протязі 4 год. з реверсування напряму постійного струму через 30 хвилин. Температура електроліту складала 98 °С. Для її аналізу проводили її порівняння з дифрактограмами таких речовин: гексагональної модифікації $\beta\text{-Cd(OH)}_2$, моноклінної модифікації $\gamma\text{-Cd(OH)}_2$ і карбонату кадмію CdCO_3 . Використовуючи відомі міжплоскощинні відстані вище згаданих речовин [9] і формулу Вульфа-Брегга, ми розрахували кутове положення рефлексів цих речовин для рентгенівського $\text{CuK}\alpha$ випромінювання. Результати розрахунку кутового положення та експериментальні результати, отримані з аналізу дифрактограми (рис. 1), наведено в таблиці 1. Порівняння теоретичних та експериментальних результатів показали, що в наших умовах утворюється суміш порошків: гексагональної і моноклінної модифікації Cd(OH)_2 , а також кадмій карбонату.

Отримання гексагональної і моноклінної модифікацій гідроксиду кадмію було очікуваним результатом, на відміну від CdCO_3 . Автори роботи [1] проводили

* kapitulasrhiy@gmail.com

Таблиця 1 – Результати аналізу дифрактограми отриманого порошку

β -Cd(OH) ₂ гексагональна фаза			γ -Cd(OH) ₂ моноклінна фаза			CdCO ₃		
<i>d</i> , Å	2θ теор.	2θ експ.	<i>d</i> , Å	2θ теор.	2θ експ.	<i>d</i> , Å	2θ теор.	2θ експ.
4,70	18,89	18,9	5,12	17,33	17,9	3,77	23,61	23,5
3,02	29,59	29,7	3,23	27,57	29,7	2,94	30,42	30,4*
2,55	35,21	35,4	2,93	30,55	30,4*	2,46	36,54	36,6
1,86	49,00	49,1	2,89	30,94	30,4*	2,23	40,47	40,2
1,74	52,62	52,4	2,84	31,57	31,3	2,06	43,97	44,0
1,63	56,48	56,2	2,41	37,26	37,1	1,88	48,44	48,0
1,51	61,43	61,5	1,93	47,14	47,1	1,83	49,85	49,9
1,44	64,77	64,5	1,92	47,41	47,4	1,58	58,44	58,3
			1,82	50,06	50,1	1,50	61,89	61,9
			1,65	55,58	55,2	1,47	63,29	63,2
			1,64	56,24	56,1			

• - ці рефлекси моноклінної модифікації Cd(OH)₂ і карбонату кадмію в наших експериментах не розділялися.

дослідження розчинення металевого кадмію під дією змінного струму промислової частоти в розчинах NaOH. Вони показали, що, в результаті електролізу були отримані обидві модифікації Cd(OH)₂, приблизно в рівних пропорціях, хоча моноклінна модифікація вважається менш стабільною. Також у роботі [10] було отримано гексагональну фазу гідроксиду кадмію, дифрактограма якої добре відповідає нашим результатам.

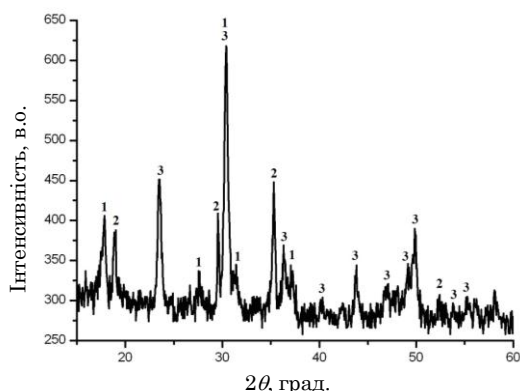


Рис. 1 – Дифрактограма зразка дрібнодисперсного порошку сполук кадмію, отриманого протягом 4 год (1 – γ -Cd(OH)₂, 2 – β -Cd(OH)₂, 3 – CdCO₃)

Для кубічних частинок Шеррер отримав значення $K = 0,94$, а для сферичних часток і близьких до них (еквівалентний еліпсоїд) $K = 0,89$ [11]. Останнє значення використовувалося в наших розрахунках. Для визначення розміру наночастинок, ми використовували такі рефлекси: для карбонату кадмію – (012) (кутове положення $2\theta = 23,5^\circ$); для гексагональної фази Cd(OH)₂ – (001) (кутове положення $2\theta = 18,9^\circ$); для моноклінної фази Cd(OH)₂ – (020) (кутове положення $2\theta = 17,9^\circ$). У результаті обчислення були отримані такі результати: 22 нм, 21 нм і 19 нм, відповідно.

Для проведення кількісного аналізу отриманого наноструктурованого порошку був використаний рентгенівський аналіз. Відомо, що інтегральна інтенсивність дифракційних максимумів при використанні дифрактометра з плоским зразком описується рівнянням [12]:

$$I = I_0 ((e^4 \lambda^3 l) / (32 \pi m^2 c^4 R)) (N^2/2\mu) PLG p |F|^2,$$

де I_0 – інтенсивність падаючого рентгенівського випромінювання, e і m – заряд і маса електрона, λ – довжина рентгенівського випромінювання, l – довжина шляху відбитого променя в лічильнику, c – швидкість світла, R – радіус гоніометра, N – число елементарних комірок в одиниці об'єму, μ – лінійний коефіцієнт поглинання, PLG – кутовий множник, p – фактор повторюваності, $|F|^2$ – модуль структурної амплітуди.

В випадку суміші речовин інтегральна інтенсивність пропорційна об'ємному вмісту компонент. В дифрактометрі фокусування рентгенівських променів відбитих від плоскої пластинки робить поглинання незалежним від кута θ , бо воно послаблює інтенсивність всіх дифрагованих пучків в однакове число разів і не впливає на відносні інтенсивності [13]. Тому у випадку суміші, яка складається з трьох компонент необхідно буде розв'язувати систему трьох рівнянь з трьома невідомими.

$$c_1/c_2 = (I_1 N_2^2 PLG_2 p_2 |F_2|^2) / (I_2 N_1^2 PLG_1 p_1 |F_1|^2)$$

$$c_1/c_3 = (I_1 N_3^2 PLG_3 p_3 |F_3|^2) / (I_3 N_1^2 PLG_1 p_1 |F_1|^2)$$

$c_1 + c_2 + c_3 = 1$, де c_1 , c_2 , c_3 об'ємні концентрації компонент.

В нашому випадку отримується суміш, яка складається з таких речовин: гідроксид кадмію (гексагональна модифікація), гідроксид кадмію (моноклінна модифікація) і карбонат кадмію (II). Фізичні властивості цих сполук приведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Фізичні властивості сполук кадмію

Речовина	Просторова група	Параметри елементарної комірки, нм	Густина, 10 ³ кг/м ³
β -Cd(OH) ₂	$P\bar{3}m1$	$a = 0,3487$ $c = 0,4679$	4,79
γ -Cd(OH) ₂	Im	$a = 0,5642$ $b = 1,02233$ $c = 0,34042$ $\alpha = 90^\circ$ $\beta = 91,523^\circ$ $\gamma = 90^\circ$	4,88
CdCO ₃	$R\bar{3}c$	$a = 0,6124$ $\alpha = 47,4^\circ$	4,96

Об'єм елементарної комірки для триклинної сингонії визначається формулою: $V = a b c (1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma)^{1/2}$. А тому об'єми елементарних комірок наших речовин визначали відповідно за формулами: $V = \frac{1}{2} a^2 c \sqrt{3} (\beta - Cd(OH)_2)$, $V = a b c \sin \beta (\gamma - Cd(OH)_2)$, $V = a^3 (1 - 3 \cos^2 \alpha + 2 \cos^3 \alpha)^{1/2} (CdCO_3)$.

Значення кутового множника PLG у випадку використання дифрактометра визначається за формулою [13]:

$$PLG = (1 + \cos^2 2\theta) / \sin^2 \theta \cos \theta$$

З формули видно, що значення кутового множника залежить лише від кута дифракції рентгенівських променів θ , який визначається з експериментальних дифрактограм.

В загальному випадку структурна амплітуда є комплексним числом, яке визначається за формулою [13]:

$$F = \sum f_n \cos 2\pi(hx_n + ky_n + lz_n) + j \sum f_n \sin 2\pi(hx_n + ky_n + lz_n),$$

де x_n, y_n, z_n – координати атомів виражені в долях тих ребер, які прийняті за осі координат, f_n – фактор атомного розсіювання кожного атома для значення $\sin \theta / \lambda$, яке відповідає індексам Міллера (hkl), а $j = \sqrt{-1}$ – комплексна одиниця.

Гексагональна модифікація гідроксиду кадмію ($\beta - Cd(OH)_2$) належить до просторової групи $P3m1$, містить 1 атом в елементарній комірці, які мають такі координати [9]:

Cd (1): (a) 0 0 0.

ОН (2): (d) 1/3 2/3 z, 2/3 1/3 \bar{z} , де $z \approx 1/4$

Модуль структурної амплітуди дорівнює:
 $|F_{(001)}| = f_1$.

Для рефлексу (001) кут $2\theta = 18,90^\circ$ і $\sin \theta / \lambda = 0,11$, а тому атомний множник розсіювання для іона Cd^{2+} дорівнює $f_1 = 43,33$, фактор повторюваності $p = 2$ [13]. Тоді квадрат модуля структурної амплітуди дорівнює $|F_{(001)}|^2 = 1877$. PLG = 71,27 для кута дифракції $2\theta = 18,90^\circ$.

Моноклінна модифікація гідроксиду кадмію ($\gamma - Cd(OH)_2$) належить до просторової групи Im , містить 4 атоми в елементарній комірці, які мають такі координати [14]:

Cd (4): 0 0,15252 0; 0 0,84748 0; 0,5 0,34748 0; 0,5 0,65252 0.

O (2): 0,116 0 0,489; 0,5 0,616 0,489.

O (2): 0,688 0 0,942; 0,188 0 0,942.

O (4): 0,881 0,2793 0,495; 0,881 0,7207 0,495; 0,381 0,2207 0,495; 0,381 0,7207 0,495.

H (2): 0 0,5 0,332; 0,5 0 0,332.

H (2): 0,666 0 0,25; 0,166 0,5 0,25.

H (4): 0 0,332 0,5; 0 0,668, 0,5; 0,882 0,5 0,5; 0,118 0,5 0,5.

Модуль структурної амплітуди дорівнює:

$$|F_{(020)}| = |(-1,3559 f_1 - 0,6191 f_2 + 4,9712 f_3) + j 1,7135 f_2|. \text{ Для рефлексу (020) кут } 2\theta = 18,0^\circ \text{ і } \sin \theta / \lambda = 0,10, \text{ а тому атомні множники розсіювання}$$

дорівнюють: для іона атома кадмію $f_1 = 43,80$, іона атома кисню $f_2 = 8,0$ і атома водню $f_3 = 0,802$, фактор повторюваності $p = 2$ [13]. Тоді квадрат модуля структурної амплітуди дорівнює $|F_{(020)}|^2 = 3831$.

PLG = 78,75 для кута дифракції $2\theta = 18,0^\circ$.

Карбонат кадмію $CdCO_3$ кристалізується в тригональній структурі і належить до просторової групи $D_{3d}^6 - R\bar{3}c$, містить 2 атоми в елементарній комірці, які мають такі координати [9]:

2Cd: $\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}; \frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}$.

2C: 0 0 0; $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$.

6O: $x \bar{x} 0; x 0 \bar{x}; 0 x \bar{x}; \frac{1}{2} - x \frac{1}{2} + x \frac{1}{2}; \frac{1}{2} - x \frac{1}{2} \frac{1}{2} + x \frac{1}{2}; \frac{1}{2} \frac{1}{2} - x \frac{1}{2} + x$; де $x = 0,26$

Модуль структурної амплітуди дорівнює: $|F_{(012)}| = 3,7414 f_3$. Для рефлексу (012) кут $2\theta = 23,50^\circ$ і $\sin \theta / \lambda = 0,132$, а тому атомні множники розсіювання дорівнюють для іона атома кисню $O^{-2} f_3 = 7,232$, фактор повторюваності $p = 6$ [15]. Тоді квадрат модуля структурної амплітуди дорівнює $|F_{(012)}|^2 = 732$. PLG = 45,34 для кута дифракції $2\theta = 23,50^\circ$.

Таблиця 3 – Результати попередніх розрахунків

Рефлекс	Інтегральна інтенсивність, I	N 10 ²⁷ м ⁻³	p	PLG	F ²
(001) $\beta - Cd(OH)_2$	35	22,21	2	71,27	1877
(020) $\gamma - Cd(OH)_2$	69	5,09	2	78,75	3831
(012) CdCO ₃	34	17,72	6	45,34	732

Розв'язавши систему трьох рівнянь з трьома невідомими ми отримали об'ємні значення вмісту компонент в зразку: $c_1 = 0,154 (\beta - Cd(OH)_2)$; $c_2 = 0,587 (\gamma - Cd(OH)_2)$; $c_3 = 0,259 (CdCO_3)$. Легко показати, що масові вмісти даних сполук складають відповідно: $m_1 = 0,151$; $m_2 = 0,586$; $m_3 = 0,263$.

У воді завжди присутні розчинені гази, їх концентрація залежить від типу газу, тиску і температури води. Розчинність вуглекислого газу у воді досягає значної величини, так при тиску 0,1 МПа і за температури 16 °С вона становить 1921 мг/л [15], що може привести до утворення карбонату кадмію. Крім того останній може поступати в електролізер в процесі отримання наночастинок з оточуючого повітря (в наших дослідах використовувався електролізер відкритого типу). Для перевірки цієї гіпотези був проведений експеримент при таких самих умовах, але перед приготуванням електроліту вода витримувалася на протязі 1 год. при температурі кипіння з метою видалення розчинених газів.

На рис. 2 приведено дифрактограму порошку, отриманого з випаровуванням води. З неї видно, що зменшується інтенсивність рефлексів, які відповідають $CdCO_3$. Даний факт свідчить про те, що утворення карбонату кадмію, обумовлено присутністю розчиненого вуглекислого газу в воді, яка використовувалася для приготування електроліту. Розрахунки проведені так само, як і для зразка, дифрактограма якого показана на рис 1 показали, масовий вміст

речовин β -Cd(OH)₂, γ -Cd(OH)₂ і CdCO₃ складає 34,3 %, 45,8 % і 19,9 % відповідно. Видно, що вміст карбонату кадмію зменшився на 6,4 %.

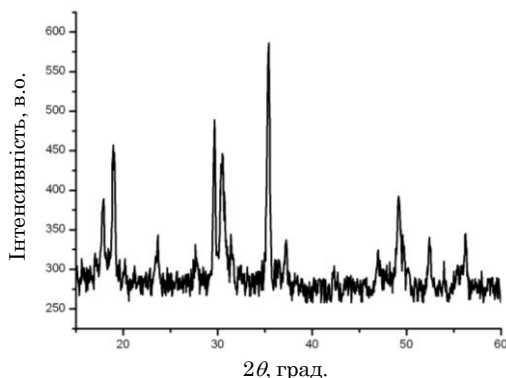


Рис. 2 – Рентгенівська дифрактограма зразка з наночастинками, отриманих з електроліту, воду для приготування якого, витримували при температурі кипіння протягом 1 год

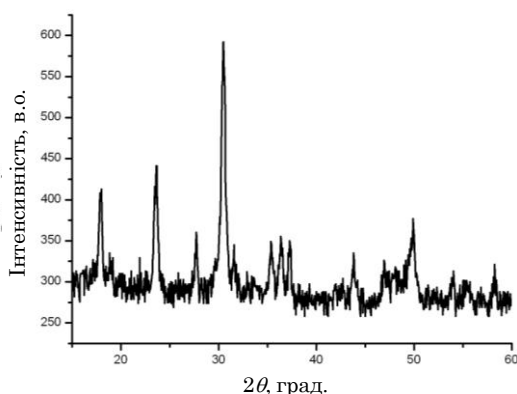


Рис. 3 – Рентгенівська дифрактограма зразка із синтезованими наночастинками, отриманих з електроліту, через який прокачували повітря в процесі їх отримання

Наступна серія експериментів були проведена з випаровуванням води і прокачуванням повітря через електроліт в процесі отримання наночастинок. Швидкість прокачування повітря складала величину порядку 2,5 л/год. На рис. 3 приведено дифрактограму зразка отриманого в умовах випаровування води і прокачування повітря. З неї видно, що в цьому випадку збільшуються інтенсивності рефлексів CdCO₃, що свідчить про участь атмосферного вуглекислого газу в утворенні карбонату кадмію. Розрахунки проведені так само, як і для зразка, дифрактограма якого показана на рис 1 показали, масовий вміст речовин β -Cd(OH)₂, γ -Cd(OH)₂ і CdCO₃ складає

6,7 %, 40,7 % і 52,6 % відповідно. Видно, що вміст карбонату кадмію збільшився і перевищує свій вміст в зразку, дифрактограма якого показана на рис. 1.

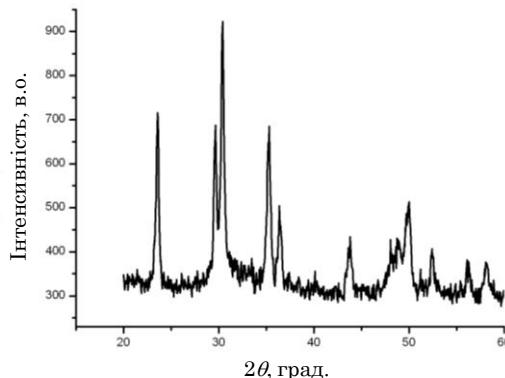


Рис. 4 – Дифрактограма дрібнодисперсного порошку, отриманого на протягом 4 год за температури електроліту 25 °С

Ще один експеримент був проведений при таких самих умовах, але температура електроліту становила 25 °С. Із дифрактограми (рис. 4) видно, що в результаті проведеного експерименту було отримано дрібнодисперсні порошки карбонату кадмію. Зрозуміло, що за цієї температури розчинність вуглекислого газу у воді буде більшою, ніж за температури 98 °С.

При отриманні оксиду цинку за подібних умов автори роботи [16] не спостерігали отримання карбонату цинку. Можливо, що в умовах нашого експерименту створенні сприятливі умови для синтезу карбонату кадмію, що потребує додаткового дослідження.

4. ВИСНОВКИ

Встановлено, що при використанні електролітичного методу за температури електроліту 98 °С при використанні кадмієвих електродів отримують зразки, що містять в своєму складі такі сполуки: гексагональна модифікація гідроксиду кадмію, моноклінна модифікація гідроксиду кадмію, карбонат кадмію.

Проведені рентгеноструктурні дослідження і використання формули Дебая-Шеррера дали можливість оцінити розміри наночастинок: 22 нм, 21 нм, 19 нм відповідно для CdCO₃, β -Cd(OH)₂ і γ -Cd(OH)₂, а також об'ємний і масовий вміст компонент.

Утворення карбонату кадмію обумовлене розчиненням вуглекислим газом у воді, яка використовується для приготування електроліту, а також можливістю його попадання в електролізер в процесі отримання сполук кадмію.

Рентгеновский анализ образцов, содержащих наночастицы соединений кадмия

С.Ю. Капитула¹, Б.Д. Нечипорук¹, Н.Б. Данилевская², Б.А. Татарин²¹ Ровенский государственный гуманитарный университет, ул. Остафова, 31, 33028 Ровно, Украина² Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки, Проспект Свободы, 13, 43025 Луцк, Украина

Показана возможность получения наночастиц соединений кадмия электролитическим способом с использованием кадмиевых электродов и раствора поваренной соли в качестве электролита. При температуре электролита 98 °С получены наночастицы CdCO₃, β-Cd(OH)₂ и γ-Cd(OH)₂ размеры которых оценены с помощью формулы Дебая-Шеррера в 22 нм, 21 нм и 19 нм соответственно. Содержание этих соединений определялось рентгенофазовым методом. Проведено изучение влияния условий синтеза на содержание карбоната кадмия.

Ключевые слова: Гидроксид кадмия, Карбонат кадмия, Рентгеноструктурный анализ, Структурная амплитуда, Фактор повторяемости, Угловой множитель, Пространственная группа.

X-ray Analysis of Samples Containing the Nanoparticles Compounds of Cadmium

S.Yu. Kapitula¹, B.D. Nechiporuk¹, N.B. Danilevskaya², B.A. Tatarin²¹ Rivne State Humanitarian University, 31, Ostafova Str., 33028 Rivne, Ukraine² Lesya Ukrainka Eastern European National University, 13, Prosp. Voli, 43025 Lutsk, Ukraine

It is shown the possibility of production of the nanoparticles compounds cadmium electrolyte method using cadmium electrode and table salt as an electrolyte. When the temperature of the electrolyte 98 °C obtained nanoparticle CdCO₃, β-Cd(OH)₂ and γ-Cd(OH)₂ dimensions which are estimated by the formula Debye-Šerrera at 22 nm, 21 nm 19 nm respectively. The contents of the data of the compounds was determined by the XRD method. Analysis of the influence of synthesis conditions on the content of cadmium Carbonate.

Keywords: Cadmium Hydroxide, Cadmium Carbonate, XRD, Structure factor, Multiplicity, pLG, Space group.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.В. Коробочкин, Е.Ф. Ханова, *Известия Томского политехнического университета* **306** № 1, 36 (2008) (V.V. Korobochkin, Ye.F. Khanova, *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* **306** No 1, 36 (2008)) [in Russian].
2. А.С. Ворох, Н.С. Кожевникова, *Доклады академии наук* **419** № 1, 58 (2008) (A.S. Vorokh, N.S. Kozhevnikova, *Doklady akademii nauk* **419** No 1, 58 (2008)).
3. B.G. Jeyaparakash, K. Kesavan, R. Ashokkumar, S. Mohan, A. Amalari, *J. Am. Sci.* **6** No 2, 75 (2010) [in Russian].
4. Ю.А. Загоруйко, Н.О. Коваленко, О.А. Федоренко, А.Г. Федоров, П.В. Матейченко, *Письма в ЖТФ* **33** № 4, 51 (2007) (Yu.A. Zagoruyko, N.O. Kovalenko, O.A. Fedorenko, A.G. Fedorov, P.V. Mateychenko, *Techn. Phys. Lett.* **33** No 2, 163 (2007)).
5. Zai-Xing Yang, Wei Zhong, Yan-Xue Yin, Xin Du, Yu Deng, Chaktong Au, You-Wei Du, *Nanoscale Res. Lett.* **5**, 961 (2010).
6. D.E. Zhang, X.D. Pan, H. Zhu, S.Z. Li, G.Y. Xu, X.B. Zhang, A.L. Ying, Z.W. Tong, *Nanoscale Res. Lett.* **3**, 284 (2008).
7. Akram Hosseinian, Ali Reza Mahjoub, Maryam Movahedi *J. Appl. Chem. Res.* **4**, 43 (2010).
8. Kun Wang, Qingmeng Guan, Qian Liu, Wei Liu, Jianrong Cai, *Mater. Lett.* **80**, 46 (2012).
9. Л.И. Миркин, *Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов* (М.: Физматлит: 1961) (L.I. Mirkin, *Spravochnik po rentgenostrukturnomu analizu polikristalov* (M.: Fizmatlit: 1961)) [in Russian].
10. Sibusiso N. Mlodo, Ellen M. Andrews, P. John Thomas, Paul O'Brien, *Chem. Commun.* **2768** (2008).
11. Г.Н. Камерон, А.Л. Паттерсон, *УФН* **XXII** № 4, 442 (1939) (G.N. Kameron, A.L. Patterson, *Phys.-Usp.* **XXII** No 4, 442 (1939)).
12. Л.М. Ковба, В.К. Трунов, *Рентгенофазовый анализ* (М.: Издательство Московского университета: 1976) (L.M. Kovba, V.K. Trunov, *Regenofazovyy analiz* (M.: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta: 1976)) [in Russian].
13. Г. Липсон, Г. Стипл, *Интерпретация порошковых рентгенограмм* (М.: Мир: 1972) (G. Lipson, G. Stipl, *Interpretatsiya poroshkovykh rentgenogramm* (M.: Mir: 1972)) [in Russian].
14. A. Riou, Y. Cudennec, Y. Gerault, *Mat. Res. Bull.* **25**, 987 (1990).
15. *Краткий справочник физико-химических величин* (Под. ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя) (Л.: Химия: 1974) (*Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* (Pod. red. K.P. Mishchenko, A.A. Ravdelya) (L.: Khimiya: 1974)) [in Russian].
16. В.Р. Гаевський, Б.Д. Нечипорук, М.Ю. Новоселецький, Б.П. Рудик, *УФЖ* **58** № 4, 388 (2013) (V.R. Gaev's'kyi, B.D. Nechiporuk, N.Yu. Novoselets'kyi, B.P. Rudyk, *Ukr. J. Phys.* **58** No 4, 385 (2013)).