

Научная статья  
УДК 543  
DOI 10.18101/2306-2363-2025-1-36-48

### Получение порошка оксида цинка из глубоких эвтектических растворителей

© Сажнев Михаил Павлович

студент  
MiSaXa47@yandex.ru

© Харин Олег Игоревич

студент  
kharinoleg2001@mail.ru

© Макаров Николай Александрович

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой химической технологии керамики и огнеупоров  
makarov.n.a@muctr.ru

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева  
Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9

**Аннотация.** Порошок оксида цинка ZnO был осажден из систем хлорид — мочевины водой и натриевой щёлочью. Полученный материал обжигали при температурах 500–700 °С и исследовали методами РФА, БЭТ, РФЛа, СЭМ, ЭДС. Также для изучения структуры глубокого эвтектического растворителя применяли ИК-спектроскопию. По данным РФА рассчитали параметры решётки для всех образцов. Оксид цинка кристаллизуется в гексагональной структуре вюрцита P63mc с параметрами решётки  $a = 3,24992 \text{ \AA}$  и  $c = 5,20658 \text{ \AA}$ . Для получения оксида цинка на основе проведённых анализов определены оптимальный состав исходного ГЭР и температура синтеза прекурсора.

**Ключевые слова:** оксид цинка, глубокие эвтектические растворители, синтез, термообработка, структура.

#### Для цитирования

Сажнев М. П., Харин О. И., Макаров Н. А. Получение порошка оксида цинка из глубоких эвтектических растворителей // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2025. Вып. 1. С. 36–48.

#### Введение

Оксид цинка — полупроводниковое соединение типа  $A^{II}B^{VI}$ , которое характеризуется широкой запрещенной зоной 3,3 эВ, сравнительно высокой энергией связи экситона 60 мэВ при комнатной температуре [1–4] и естественной электропроводностью n-типа [5]. Утверждается [6], что вакансии  $O_2$  ( $V_O$ ) являются донорами, могут быть ответственны за проводимость n-типа и междоузлия Zn ( $Zn_i$ ) являются слабыми быстродиффундирующими донорами, поэтому они не стабильны. Вакансии цинка являются глубокими акцепторами с низкими энергиями образования химических связей в условиях, приводящих к росту проводимости n-типа. Кроме того, система склонна к самокомпенсации — при введении акцеп-

торов автоматически увеличивается концентрация компенсирующих доноров. Глубокая валентная зона ZnO, обусловленная сильной связью Zn-O, также затрудняет генерацию свободных дырок. Оксид цинка представляет собой сложный полупроводник, который кристаллизуется в гексагональной структуре вюрцита (P63mc) [7]. Близкая к тетраэдрической координации, она приводит к возникновению полярной симметрии в ZnO, что является причиной его сильной анизотропии, в том числе в процессе роста кристаллов [8]. Все эти свойства обуславливают применение оксида цинка в качестве материала для варисторной керамики [9], прозрачных проводящих оксидов (TCO) [10], биосенсоров, в том числе за счёт своей биосовместимости [11] и терморегулирующих покрытий ТРП [12,13], а также сорбентов для поглощения SO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S [14]. Из-за описанных выше особенностей структуры и свойств оксида цинка для его применения необходим чёткий контроль состава и морфологии кристаллов. В статье приводятся результаты исследования порошков оксида цинка, полученных путем осаждения из глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) — систем, образованных из эвтектической смеси кислот Льюиса или Бренстеда, и оснований, которые могут содержать множество анионов и/или катионов [15].

#### Экспериментальная часть

В качестве исходной эвтектической системы для синтеза была выбрана смесь: хлорид цинка — мочевины (мольное соотношение 3 к 10). Осаждение из ГЭР проводили двумя способами: водой и натриевой щёлочью. Состав исходных смесей для получения ГЭР и чистота компонентов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Составы смесей для получения ГЭР

Компонент 1	ZnCl <sub>2</sub> (чистота — «Ч»)
Компонент 2	(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO (чистота — «ЧДА»)

Смесь исходных порошков помещалась в водяную баню, где плавилась при температуре 80 °С, после плавления и обесцвечивания перемешивалась магнитной мешалкой в течение 120 минут. После этого смесь осаждали охлаждённой до 5 °С водой объёмом 2,125 л. Полученную систему фильтровали и промывали дистиллированной водой.

Альтернативным было осаждение щёлочью. Твердый гранулированный NaOH добавляли в систему в мольном соотношении 2:1 к хлориду цинка и затем выдерживали 30 минут. Полученную систему фильтровали и промывали водой до достижения нейтральной среды (pH = 7).

После фильтрования порошки сушили при температуре 70 °С и далее синтезировали в печи на воздухе при температурах 500–700 °С, со скоростью нагрева 2 °С/мин и выдержкой 2 часа. Наименования образцов, полученных в ходе экспериментов, представлены в таблице 2.

Таблица 2

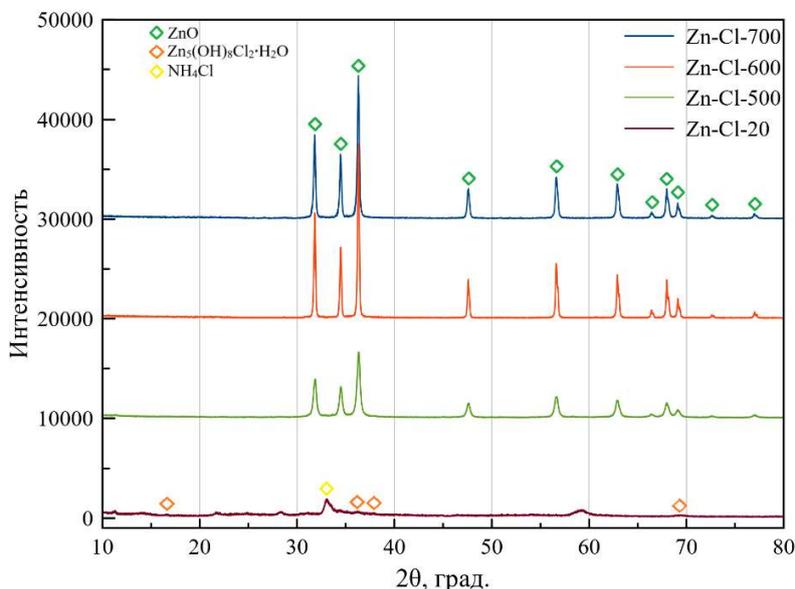
Наименования образцов

Температура синтеза, °С	Способ осаждения	
	Вода	NaOH
500	Zn-Cl-500	Na-Zn-Cl-500
600	Zn-Cl-600	Na-Zn-Cl-600
700	Zn-Cl-700	Na-Zn-Cl-700

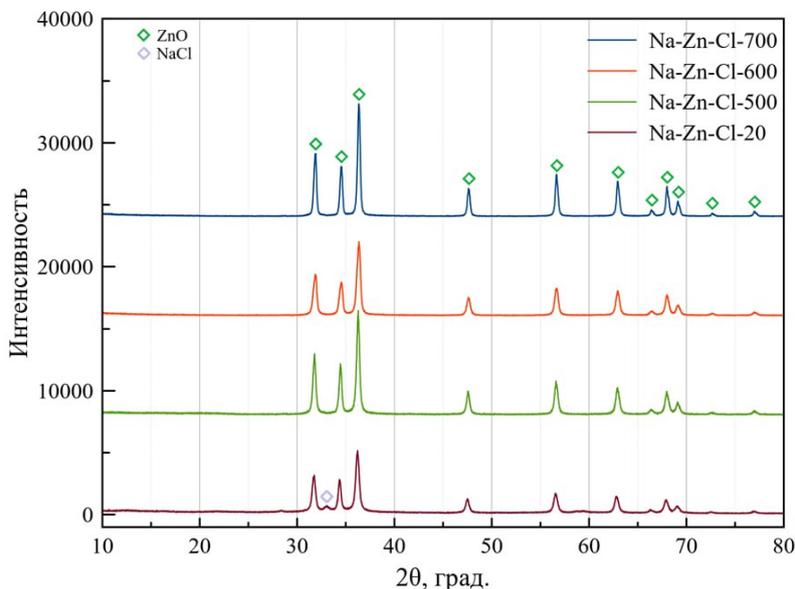
После термообработки для анализа порошков использовали методы рентгенофазового анализа (РФА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) для контроля фазового и химического состава, а также оценки морфологии кристаллов. Для изучения структуры ГЭР применялась ИК-спектроскопия методом НПВО.

**Обсуждение результатов**

Для подтверждения фазового состава прекурсоров и прокаленных порошков проведён рентгенофазовый анализ. Результаты представлены на рисунках 1 и 2. В случае применения дистиллированной воды в качестве осадителя в составе прекурсора наблюдается наличие фаз симонколлелита и хлорида аммония, которые образуются в ходе гидролиза ГЭР водой. Синтез при температурах 500–700 °С позволяет получить единственную фазу — оксид цинка ZnO.



**Рис. 1.** Результаты РФА порошков, полученных при взаимодействии глубокого эвтектического растворителя системы хлорид цинка — мочевины с дистиллированной водой



**Рис. 2.** Результаты РФА порошков, полученных при взаимодействии глубокого эвтектического растворителя системы хлорид цинка — мочевины с натриевой щёлочью

В случае осаждения гидроксидом натрия наблюдается вторая фаза — хлорид натрия с пиками слабой интенсивности.

Оценку химического состава полученных порошков проводили с помощью метода ЭДС. Соответствующие результаты представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Результаты ЭДС порошков, полученных при взаимодействии глубокого эвтектического растворителя системы хлорид цинка — мочевины с дистиллированной водой

Температура синтеза, °С	Zn-Cl		
	Zn, атомн. %	O, атомн. %	Zn/O
500	40,620	59,380	0,684
600	41,270	58,730	0,702
700	44,240	55,760	0,793

При увеличении температуры синтеза наблюдается стремление порошка к стехиометрическому составу, причём цинк находится в недостатке. Таким образом, с ростом температуры синтеза снижается количество вакансий по цинку, из-за чего соотношение становится более стехиометрическим. При этом не было обнаружено примесных элементов.

Таблица 4

Результаты ЭДС порошков, полученных при взаимодействии  
глубокого эвтектического растворителя системы хлорид цинка — мочевины  
с натриевой щёлочью

Температура синтеза, °С	Na-Zn-Cl		
	Zn, атомн. %	Na, атомн. %	Примеси, атомн. %
500	58,429	38,426	3,145
600	64,608	28,034	7,358
700	64,433	30,674	4,893

По данным ЭДС, проведённого для порошков, полученных при осаждении NaOH, можно увидеть наличие натрия в образцах, а также наличие других элементов, например, хлора (статья «примеси»). Наличие натрия в любой форме крайне нежелательно и контроль его наличия на стадии синтеза затруднён. При повышении температуры синтеза также наблюдается увеличение содержания цинка.

Для оценки морфологии кристаллов, а также их размеров проведена сканирующая электронная микроскопия.

Результаты СЭМ представлены на рисунках 3–5.

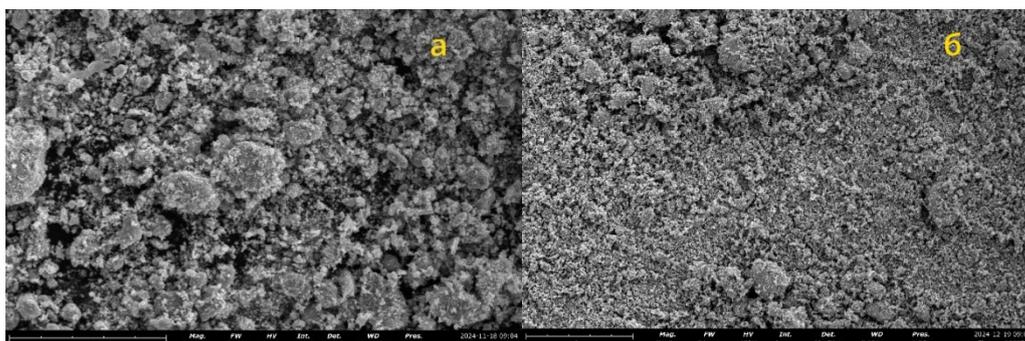


Рис. 3. Микроструктуры порошков Zn-Cl-500 (а) и Na-Zn-Cl-500 (б)

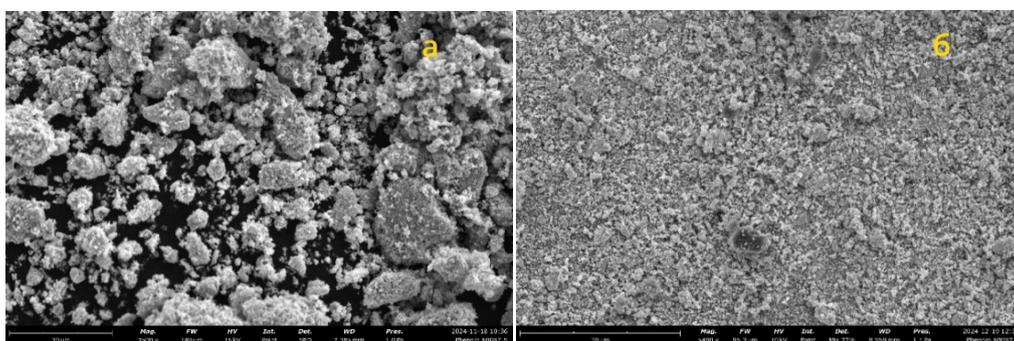


Рис. 4. Микроструктуры порошков Zn-Cl-600 (а) и Na-Zn-Cl-600 (б)

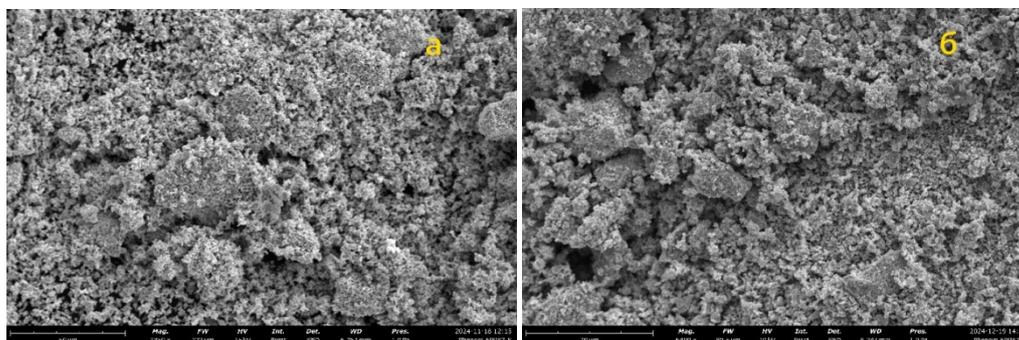


Рис. 5. Микроструктуры порошков Zn-Cl-600 (а) и Na-Zn-Cl-600 (б)

В случае гидролиза водой частицы ZnO имеют преимущественно цилиндрическую форму со средней длиной 2,1 мкм и средним диаметром 0,6 мкм. При этом размер частиц с увеличением температуры синтеза уменьшается.

Аналогичной морфологией обладают порошки, полученные осаждением гидроксидом натрия. Размер частиц для Na-Zn-Cl — 0,8 мкм.

Температура прокаливания влияет на морфологию и размер частиц. Так, при 500 °C частицы ZnO в основном аморфные и агрегированные, при 600 °C в образце Zn-Cl-600 появляются стержнеобразные кристаллы, а при 700 °C формируются четко выраженные кристаллические структуры.

Для Zn-Cl-700 характерны цилиндрические частицы (длина 2,1 мкм, диаметр 0,6 мкм).

Тип осадителя влияет на размер частиц. Так, осаждение гидроксидом натрия приводит к уменьшению размера частиц (Na-Zn-Cl-700 — 0,8 мкм) по сравнению с аналогичным Zn-Cl-700, осаждённым водой — 2,1 мкм.

Для оценки удельной поверхности в таблице 5 представлены результаты БЭТ.

Таблица 5

Сравнение результатов БЭТ

Образец	$S_{уд}, м^2/г$
Na-Zn-Cl-500	$18,5286 \pm 0,03$
Na-Zn-Cl-600	$15,7685 \pm 0,03$
Na-Zn-Cl-700	$8,8092 \pm 0,03$
Zn-Cl-500	$17,52 \pm 0,10$
Zn-Cl-600	$7,02 \pm 0,05$
Zn-Cl-700	$2,00 \pm 0,01$

С ростом температуры синтеза закономерно снижается удельная поверхность частиц. При осаждении NaOH удельная поверхность частицы выше, а скорость седиментации ниже.

На основе РФА определены параметры решётки и рентгеновская плотность порошков. Эталонное значение рентгеновской плотности оксида цинка —  $5,673 г/см^3$ ,  $a — 3,24992 \text{ \AA}$ ,  $c — 5,20658 \text{ \AA}$  [16]. Результаты расчёта параметров решётки представлены в таблице 6.

Таблица 6

Результаты расчёта параметров решётки и рентгеновской плотности

Температура синтеза, °С	Zn-Cl			Na-Zn-Cl		
	a, Å	c, Å	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	a, Å	c, Å	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>
500	3,2455	5,1981	5,689	3,2483	5,2017	5,689
600	3,2461	5,1999	5,683	3,2452	5,1959	5,684
700	3,2456	5,2005	5,680	3,2441	5,1936	5,693

Рентгеновская плотность, как и параметры a и c, ведет себя нелинейно. Это связано с изменением концентрации и вида дефектов кристаллической решетки.

Для образцов Zn-Cl наблюдается тенденция к увеличению параметра c, что может быть связано с изменением дефектов кристаллической решетки, ростом кристаллитов или релаксацией напряжений.

Исходя из совокупности всех приведённых результатов наиболее оптимальным образцом для синтеза керамики является Zn-Cl-500 за счёт чистоты, низкой температуры синтеза и высокой активности.

Одной из возможных переменных в процессе синтеза является время варки системы.

Дальнейшие исследования направлены на определение оптимального времени варки системы до её осаждения.

В таблице 7 представлены наименования образцов, синтезированных в течение различного времени.

На рисунке 5 приведены результаты РФА для порошков, полученных из хлорида цинка и осаждённых водой в зависимости от времени синтеза.

Таблица 7  
Наименования образцов

Время синтеза, час	Наименование
0,5	Zn-Cl-0,5
1,0	Zn-Cl-1
1,5	Zn-Cl-1,5
2,0	Zn-Cl-2

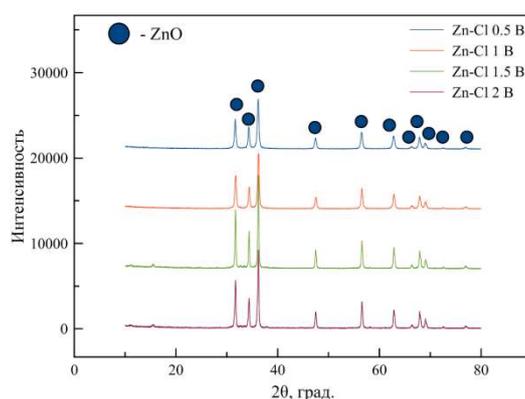


Рис. 6. Результаты рентгенофазового анализа для порошков, полученных из хлорида цинка после прокаливании при различном времени синтеза

М. П. Сажнев, О. И. Харин, Н. А. Макаров. Получение порошка оксида цинка из глубоких эвтектических растворителей

Как следует из результатов РФА, во всех случаях образуется целевая фаза ZnO. Энергодисперсионный анализ проведён в целях подтверждения химического состава полученных порошков. Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8  
Результаты EDX для порошков, полученных из хлорида цинка при осаждении водой в зависимости от времени варки

Наименование образца	Содержание элементов, атомн. %			
	Zn	O	Cl	Примеси
Zn-Cl-0.5	43,294	54,780	1,926	0,000
Zn-Cl-1	42,732	55,141	2,127	0,000
Zn-Cl-1.5	40,869	52,786	5,375	0,970
Zn-Cl-2	41,963	51,702	5,351	0,985

С увеличением времени варки наблюдается рост концентрации адсорбированного хлора, что может негативно сказаться на свойствах получаемого материала, особенно применяемого в биомедицинских целях. Наличие примесей в образцах Zn-Cl-1.5 и Zn-Cl-2 не связано с увеличением времени синтеза.

Для оценки наличия возможного содержания углерода в образцах, а также подтверждения количества примесей был проведён рентгенофлуоресцентный анализ (РфЛА). Результаты представлены в таблице 9.

Таблица 9  
Результаты РфЛА для порошков, полученных из хлорида цинка после прокаливании при различном времени синтеза

Наименование образца	Содержание элементов, мас. %				
	Zn	C	O	Cl	Zn/O
Zn-Cl-0.5	55,90	20,75	22,43	0,92	71,36
Zn-Cl-1	55,80	21,27	21,92	1,01	71,80
Zn-Cl-1.5	53,15	22,74	22,11	1,99	70,62
Zn-Cl-2	59,00	16,31	22,20	2,49	72,66

С увеличением времени варки наблюдается снижение содержания углерода и увеличение количества хлора. Оптимальным образцом при этом является Zn-Cl-2 за счёт наименьшего количества примесей. Также при более длительной варке оксид цинка более стехиометричен (соотношение Zn/O — 72,66) и, следовательно, образец Zn-Cl-2 также предпочтителен.

На рисунках 7 и 8 представлены результаты исследования микроструктуры порошков.

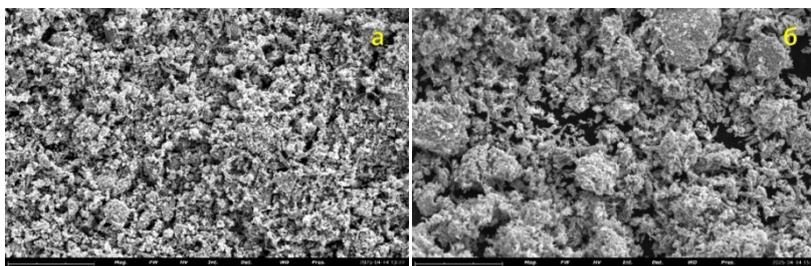


Рис. 7. Результаты СЭМ для образцов Zn-Cl-0.5 (а) и Zn-Cl-1 (б)

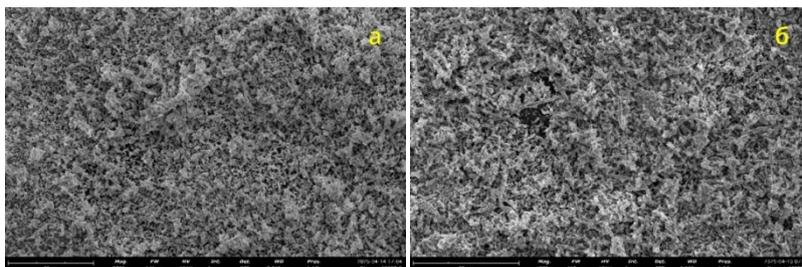


Рис. 8. Результаты СЭМ для образцов Zn-Cl-1.5 (а) и Zn-Cl-2 (б)

С увеличением времени варки системы наблюдается анизотропный рост кристаллов стержнеобразной формы, что характерно для оксида цинка. Средний размер частиц при этом остается на одном уровне. Анизотропия роста обусловлена гексагональной структурой вюрцита. Рост вдоль направления с происходит быстрее, чем в направлении а. Благодаря этому оксид цинка имеет игольчатые или стержневидные структуры. Соответственно, чем дольше длится процесс роста кристаллов, тем более выражены отличия в скоростях роста в различных направлениях.

Игольчатые структуры менее склонны к образованию крупных агрегатов. Однако несмотря на меньшую степень агрегации применение в синтезе керамики игольчатых структур не столь эффективно.

Имея более высокое соотношение длины к диаметру, игольчатые частицы сложно уплотняются, образуя большие поры. Также ввиду их анизотропии усадка в процессе спекания также становится анизотропной.

Рассчитаны параметры решётки ZnO в зависимости от времени варки на основе данных, полученных в ходе рентгенофазового анализа.

Результаты представлены в таблице 10.

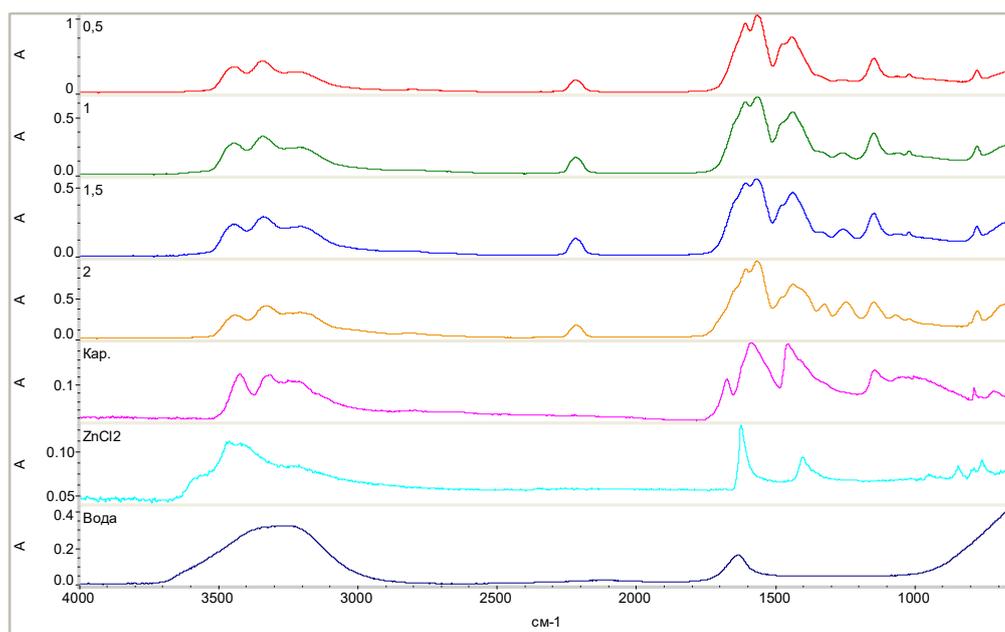
Таблица 10

Результаты расчёта параметров решётки и рентгеновской плотности в зависимости от времени синтеза

Время синтеза, час.	Zn-Cl-500		
	Параметр а, Å	Параметр с, Å	Плотность, г/см <sup>3</sup>
0,5	3,2554	5,2140	5,646
1,0	3,2512	5,2088	5,666
1,5	3,2515	5,2115	5,662
2,0	3,2517	5,2114	5,662

Наблюдается резкое падение обоих параметров при времени синтеза 1 час. При этом плотность образца Zn-Cl-1 ближе к рентгеновской, однако все образцы менее плотные по сравнению с эталоном — 5,673. Отличия вызваны дефектной структурой оксида цинка.

Для оценки структуры жидкого ГЭР была проведена ИК-спектроскопия методом НПВО. Результаты представлены на рисунке 9. Исследование проводилось на оборудовании ЦКП РХТУ им. Д. И. Менделеева.



**Рис. 9.** Результаты ИК-спектроскопии для полученного ГЭР в зависимости от времени варки системы. Также проведены спектры воды, хлорида цинка и карбамида (Кар.)

Жидкая система хлорид цинка — мочевины образует тетраэдрические комплексы  $[\text{Zn}(\text{urea})_4]^{2+}$ , а также смешанные хлорид-карбамидные комплексы  $[\text{Zn}(\text{urea})_n\text{Cl}_m]^{(2-\mu)}$ , где  $\mu$  — заряд лигандов  $\text{Cl}^-$ . При недостатке мочевины (возникающем в том числе в ходе варки системы) возможно появление полимерных структур типа  $[\text{Zn}(\mu\text{-Cl})_2(\text{urea})_2]_n$ .

В ИК-спектре системы  $\text{ZnCl}_2$  — мочевины наблюдаются характерные полосы поглощения, которые позволяют сделать выводы о взаимодействиях между компонентами. В области валентных колебаний N–H ( $3100\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ ) для свободной мочевины обычно видны две чёткие полосы: асимметричное колебание при  $\sim 3440\text{ см}^{-1}$  и симметричное при  $\sim 3340\text{ см}^{-1}$ . В случае образования координационного комплекса эти полосы смещаются в низкочастотную область на  $20\text{--}50\text{ см}^{-1}$  и становятся более размытыми, что свидетельствует об участии групп N–H в образовании водородных связей с хлорид-ионами и соответственно об участии их в создании координационных соединений.

Важнейшим диагностическим признаком является поведение полосы карбонильной группы C=O мочевины. У свободной мочевины она проявляется как интенсивный пик около  $1\ 680\text{--}1\ 700\ \text{см}^{-1}$ . При координации мочевины к иону цинка через атом кислорода эта полоса смещается на  $40\ \text{см}^{-1}$  в область  $1\ 630\text{--}1\ 660\ \text{см}^{-1}$ , что указывает на ослабление связи C=O вследствие донорно-акцепторного взаимодействия. Величина этого сдвига ( $\sim 50\ \text{см}^{-1}$ ) подтверждает образование координационных связей Zn–O.

В низкочастотной области спектра ( $400\text{--}600\ \text{см}^{-1}$ ) также могли бы наблюдаться полосы, соответствующие колебаниям связей Zn–Cl и Zn–O. Для мостиковых хлоридных структур ( $\mu\text{-Cl}$ ) характерны полосы в районе  $300\text{--}400\ \text{см}^{-1}$ . Их наличие свидетельствует о возможном образовании полимерных цепочек  $[\text{Zn}(\mu\text{-Cl})_2(\text{urea})_2]_n$  в системе. Интенсивность этих полос зависит от соотношения компонентов: при избытке мочевины они менее выражены, так как доминируют тетракоординированные комплексы  $[\text{Zn}(\text{urea})_4]^{2+}$ . Однако оценка низкочастотного спектра затруднительна ввиду особенностей метода — возможна оценка спектра от  $500\ \text{см}^{-1}$ .

Образование полимерных структур подтверждает ускоренное затвердевание ГЭР при прекращении нагревания. При этом увеличение времени варки до 2,5 часа и более провоцирует ещё более активное затвердевание системы, а также её полимеризацию за счёт выкипания части мочевины.

Следовательно, оценка структуры посредством ИК-спектроскопии методом НПВО представляет трудности, поскольку ГЭР более не является жидкой фазой.

На основании приведённых анализов для различного времени варки были выбраны образцы Zn-Cl-2 за счёт наименьшего содержания углерода в порошке, а также стремления к стехиометрии (Zn/O — 72,66%).

### Заключение

Проведённые исследования позволили установить ключевые закономерности синтеза оксида цинка из глубокого эвтектического растворителя системы  $\text{ZnCl}_2$  — мочевины. Гидролиз дистиллированной водой приводит к образованию прекурсора на основе симонколлеита и хлорида аммония, который при прокаливании при  $500\text{--}700\ ^\circ\text{C}$  трансформируется в чистую фазу ZnO без примесей. В случае использования натриевой щёлочи в продукте сохраняется остаточный NaCl, что ограничивает его применение в высоко чистых процессах.

Установлено, что повышение температуры синтеза способствует приближению состава ZnO к стехиометрии за счёт уменьшения концентрации вакансий по цинку, при этом образцы, полученные гидролизом водой, демонстрируют более предсказуемый и воспроизводимый состав по сравнению с системами, содержащими натрий.

Морфология полученного ZnO характеризуется стержнеобразными частицами с выраженной анизотропией, обусловленной гексагональной структурой вюрцита. Установлено, что увеличение времени варки системы усиливает анизотропию кристаллов, однако это негативно сказывается на их спекаемости из-за затруднённой упаковки и неоднородной усадки.

Наибольшую удельную поверхность демонстрируют образцы, синтезированные при  $500\ ^\circ\text{C}$ , что делает их перспективными для каталитических и сенсорных применений. При этом оптимальным с точки зрения чистоты и стехиометрии яв-

ляется образец Zn-Cl-2, полученный при двухчасовой варке системы, так как он содержит минимальное количество углеродных примесей и имеет наиболее сбалансированное соотношение Zn/O.

Инфракрасная спектроскопия подтвердила образование координационных комплексов  $[\text{Zn}(\text{urea})_4]^{2+}$  и полимерных структур  $[\text{Zn}(\mu\text{-Cl})_2(\text{urea})_2]_n$  в ГЭР, что объясняет в том числе изменение реологических свойств системы при длительной варке. Таким образом, результаты работы позволяют заключить, что синтез ZnO посредством гидролиза ГЭР водой с последующим прокаливанием при 500 °C является оптимальным методом получения оксида цинка с контролируемой морфологией.

Керамические материалы на основе полученного порошка применимы, в первую очередь, для катализа и производства сорбентов. Для синтеза плотной керамики электротехнического назначения необходимо введение добавок, таких как висмут, сурьма, кобальт, марганец, ванадий.

Для дальнейших исследований целесообразно оптимизировать условия синтеза для минимизации содержания хлора и углерода в конечном продукте, а также возможный поиск другой эвтектической системы.

### Литература

1. Ayoub I. [et al.] Advances in ZnO: Manipulation of defects for enhancing their technological potentials. *Nanotechnology Reviews*. 2022; 11(1): 575–619.
2. Islam F. [et al.]. Exploring the journey of zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) toward biomedical applications. *Materials*. 2022; 15(6): 2160.
3. Sharma D. K. [et al.]. A review on ZnO: Fundamental properties and applications. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 49: 3028–3035.
4. Vyas S. A short review on properties and applications of zinc oxide based thin films and devices: ZnO as a promising material for applications in electronics, optoelectronics, biomedical and sensors. *Johnson Matthey Technology Review*. 2020; 64(2): 202–218.
5. Jiang S., Lin K., Cai M. ZnO nanomaterials: current advancements in antibacterial mechanisms and applications. *Frontiers in Chemistry*. 2020; 8: 580.
6. Lany S., Zunger A. Dopability, intrinsic conductivity, and nonstoichiometry of transparent conducting oxides. *Physical Review Letters*. 2007; 98(4): 045501.
7. Heiland G., Kunstmann P., Pfister H. Z. Phys. 1963. Т. 176. С. 485.
8. Ellmer K. Transparent conductive zinc oxide and its derivatives. *Handbook of transparent conductors*. 2011: 193–263.
9. Киселев М. М. Разработка состава для производства безвисмутовой варисторной керамики / М. М. Киселев [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32, № 2(198). С. 91–93.
10. Ponja S. D. [et al.]. Highly conductive and transparent gallium doped zinc oxide thin films via chemical vapor deposition. *Scientific Reports*. 2020; 10(1): 638.
11. Shiryaev M. A. Biosensors based on zinc oxide / M. A. Shiryaev, S. A. Eremin, A. N. Baranov. *Nanotechnologies in Russia*. 2014; 9(3): 99–115.
12. Massina C. J., Klaus D. M. Prospects for implementing variable emittance thermal control of space suits on the martian surface. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2016; 8: 1–8.
13. Kou J. L., Fan S., Minnich A. J. Daytime radiative cooling using near-black infrared emitters. *ACS Photonics*. 2017; 4(3): 626–630.
14. Способ получения сорбента для очистки газов от сернистых соединений / З. Е. Еркина [и др.]. 2004. Текст: непосредственный.

15. Smith E. L., Abbott A. P., Ryder K. S. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical reviews*. 2014; 114(21): 11060–11082.

16. Abrahams S. C., Bernstein J. L. Remeasurement of the structure of hexagonal ZnO. *Structural Science*. 1969; 25(7): 1233–1236.

Статья поступила в редакцию 11.06.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принята к публикации 24.06.2025.

#### Synthesis of Zinc Oxide Powder from Deep Eutectic Solvents

*Mikhail P. Sazhnev*

Student

MiSaXa47@yandex.ru

*Oleg I. Kharin*

Student

kharinoleg2001@mail.ru

*Nikolai A. Makarov*

Dr. Sci. (Engineering), Prof.,

Head of Ceramic Chemical Technology and Refractory Materials Department

makarov.n.a@muctr.ru

Mendeleev University of Chemical Technology

9 Miusskaya ploshad, 125047 Moscow, Russia

*Abstract.* Zinc oxide (ZnO) powder was precipitated from chloride–urea systems using water and sodium hydroxide. The resulting material was calcined at temperatures ranging from 500 to 700 °C and analyzed using X-ray diffraction (XRD), Brunauer–Emmett–Teller (BET) surface area analysis, photoluminescence spectroscopy (PL), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Infrared (IR) spectroscopy was also used to study the structure of the deep eutectic solvent (DES). Lattice parameters for all samples were calculated based on XRD data. Zinc oxide crystallized in the hexagonal wurtzite structure (space group  $P6_3mc$ ) with lattice constants  $a = 3.24992 \text{ \AA}$  and  $c = 5.20658 \text{ \AA}$ . Based on the analytical results, the optimal composition of the starting DES and the precursor synthesis temperature for obtaining zinc oxide were determined.

*Keywords:* zinc oxide, deep eutectic solvents, synthesis, heat treatment, structure.

*For citation*

Sazhnev M. P., Kharin O. I., Makarov N. A. Synthesis of Zinc Oxide Powder from Deep Eutectic Solvents. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics*. 2025; 2: 36–48 (in Russ.).

The article was submitted 11.06.2025; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 24.06.2025.