



Обзорная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.357.7+669.587+661.635.68

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.026

EDN: AZGDBA

ПОЛИФОСФАТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ ЦИНКОВАНИЯ

Евгений Геннадиевич Афонин

Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств, Калуга, Россия
afonineg.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5457-8646>

Аннотация. Покрытия цинком недороги, эффективны и широко применяются в промышленности для защиты стали от коррозии. В статье представлен краткий обзор химических составов и технологических характеристик известных из литературы электролитов для получения покрытий цинком и его сплавами, содержащих комплексы цинка(+2) с анионами полифосфорных кислот $H_2O_3P[PO_2(OH)]_nOPO_3H_2$. Полифосфатные электролиты позволяют наносить покрытия цинком, сплавами цинк-олово, цинк-медь хорошего качества. Например, из электролита с pH 7,5–8,5, содержащего 20–23 г/дм³ сульфата цинка, 14–16 г/дм³ дигидрата хлорида олова(+2), 200–300 г/дм³ триполифосфата натрия, 1–3 г/дм³ желатина, при температуре 55–65 °С, катодной плотности тока 1–4 А/дм² получают беспористые, однородные, мелкокристаллические покрытия сплавом Zn–Sn (катодный выход по току 60–70 %, массовая доля цинка в покрытии 1–33 %). В обзоре приведены данные о термодинамической устойчивости триполифосфатных комплексов цинка(+2) в водном растворе, кристаллических соединениях цинка(+2) с триполифосфат-ионами $P_3O_{10}^{5-}$, даны рекомендации по составам триполифосфатных электролитов для получения покрытий цинком, сплавами цинк-олово, цинк-медь, цинк-никель.

Ключевые слова: электролит цинкования, полифосфатный электролит, триполифосфат, химический состав электролита, технологическая характеристика электролита, комплексобразование, приготовление электролита.

Для цитирования: Афонин Е. Г. Полифосфатные электролиты цинкования // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 186–194. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.026. EDN: <https://elibrary.ru/AZGDBA>.

Review article

POLYPHOSPHATE ELECTROLYTES FOR ZINC PLATING

Evgeniy G. Afonin

Kaluga research institute of telemechanical devices, Kaluga, Russia
afonineg.chem@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5457-8646>

Abstract. Zinc coatings are inexpensive, effective, and widely used in industry for sacrificial protection of steel against corrosion. The article provides a brief overview of the available literature on the chemical compositions and technological characteristics of the electrolytes for the production of zinc and its alloys coatings containing zinc(+2) complexes with anions of polyphosphoric acids $H_2O_3P[PO_2(OH)]_nOPO_3H_2$. Good quality Zn, Zn-Cu, Zn-Sn coatings was obtained from an electrolytes containing metals complexes with tripolyphosphate-ion $P_3O_{10}^{5-}$. For example, non-porous, uniform, fine crystalline Zn-Sn alloy coatings were obtained from the electrolytes with pH 7,5–8,5 containing 20–23 g/dm³ of zinc sulfate, 14–16 g/dm³ of tin(+2) chloride dihydrate, 200–300 g/dm³ of sodium tripolyphosphate, 1–3 g/dm³ of gelatin at temperature 55–65 °C, cathodic current density 1–4 A/dm² with current efficiency 60–70 % (Zn 1–33 wt% in an alloys). Literature data on Zn(+2) - tripolyphosphate complex formation in aqueous solutions and on crystalline Zn(+2) - tripolyphosphate compounds are presented. Methods for preparing of Zn(+2), Zn(+2)-Sn(+2), Zn(+2)-Cu(+2), Zn(+2)-Ni(+2)- $P_3O_{10}^{5-}$ electroplating baths from metal(+2) salts and sodium or potassium tripolyphosphates are also described in this review.

Keywords: zinc plating electrolyte, polyphosphate electrolyte, tripolyphosphate, chemical composition of electrolyte, technological characteristic of electrolyte, complex formation, electrolyte preparing method.

For citation: Afonin, E. G. (2026). Polyphosphate electrolytes for zinc plating. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 186–194. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.026. EDN: <https://elibrary.ru/AZGDBA>.

ВВЕДЕНИЕ

Покрытия цинком, полученные гальваническим методом, широко применяются для защиты поверхности деталей из черных металлов от атмосферной коррозии и коррозии в пресной воде, а также для их декоративной отделки [1–4].

Гальваническое цинкование можно проводить из водных электролитов различного химического состава

[2, 5–9]: кислых некомплексных (сульфатных, хлоридных, перхлоратных, бромидных, тетрафтороборатных, сульфаматных, метансульфонатных, ацетатных), щелочных цинкатных, слабокислых, нейтральных и слабощелочных комплексных (цианидных, дифосфатных, аммиакатных, хлоридно-аммиакатных, этилендиаминовых, полиэтиленполиаминовых, моноэтаноламиновых, триэтаноламиновых, оксалатных, лактатных, D-

© Афонин Е. Г., 2026

глюконатных, тартратных, цитратных, аминокетатных, аминотриацетатных, этилендиаминтетраацетатных, аминотриметиленфосфонатных, этилендиаминтетраметиленфосфонатных, 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфонатных) и некоторых других.

Полифосфатные электролиты цинкования относятся к группе комплексных электролитов; электроосаждение цинкового покрытия происходит из комплексов цинка(+2) с анионами полифосфорных кислот, чаще всего триполифосфорной кислоты $H_5P_3O_{10}$; полифосфатные электролиты цинкования по химической природе родственны дифосфатным электролитам цинкования, в которых электроосаждение цинка идет из его комплексов с анионами дифосфорной кислоты $H_4P_2O_7$. Термодинамически прочные триполифосфатные комплексы удерживают катионы цинка(+2) в водном растворе в слабощелочной среде в условиях, когда без лиганда (триполифосфат-иона) катионы Zn^{2+} выпадают в осадок в форме гидроксида или гидроксосолей.

В настоящей статье дан обзор химического состава и некоторых технологических характеристик полифосфатных электролитов для получения покрытий цинком, сплавами цинка с оловом или медью.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛИФОСФАТОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ЦИНКОВАНИЯ

Полифосфаты натрия и калия являются солями линейных полифосфорных кислот $H_2O_3P[PO_2(OH)]_nPO_3H_2$, $n = 1, 2, 3, \dots$ (рис. 1), например триполифосфорная кислота $H_5P_3O_{10}$ (рис. 2) и триполифосфат натрия $Na_5P_3O_{10}$, триполифосфат калия $K_5P_3O_{10}$ (рис. 3).

Известно большое число полифосфатов натрия и калия, например [10–13], но практическое значение имеют лишь немногие из них. Химической промышленностью производятся как средства для умягчения воды, пищевые добавки, компоненты буровых растворов, флотореагенты и другие, являются недорогими и часто пригодными для использования в составах электролитов для покрытия металлами кристаллические триполифосфат натрия ($Na_5P_3O_{10}$ CAS 7758-29-4 и $Na_5P_3O_{10} \cdot 6H_2O$ CAS 15091-98-2), триполифосфат калия ($K_5P_3O_{10}$ CAS 13845-36-8), стеклообразные полифосфат натрия (соль Грэма $(NaPO_3)_n$), полифосфат калия $(KPO_3)_n$ и некоторые другие [10–26]. Технический триполифосфат натрия ГОСТ 13493-86 [15] представляет собой безводную соль $Na_5P_3O_{10}$ (не менее 94,0 % основного вещества, не более 0,1 % нерастворимых в воде веществ, содержание мышьяка и фторидов не нормируется) [15] с примесью ортофосфата, дифосфата, сульфата, хлорида натрия и некоторых других веществ [12]; пищевой триполифосфат натрия ГОСТ 31638-2012 является слабо гигроскопичным безводным веществом $Na_5P_3O_{10}$ (не менее 85 % основного вещества, не более 0,1 % нерастворимых в воде веществ, не более 0,005 % фторидов, не более 0,0003 % мышьяка, не более 0,0004 % свинца) [16] или кристаллогидратом $Na_5P_3O_{10} \cdot 6H_2O$ (не менее 65 % основного вещества) [16]; пищевой триполифосфат калия ГОСТ 31638-2012 представляет собой гигроскопичное бесцветное вещество $K_5P_3O_{10}$ (не менее 85 % основного вещества, не более 2,0 % нерастворимых в воде веществ, не более 0,001 % фторидов, не более 0,0003 % мышьяка, не более 0,0004 % свинца) [16]. Промышленностью также выпускаются триполифосфаты натрия и калия с заявленным содержанием основного вещества

95–99 %, например [24–26]. Перекристаллизацией из воды, водного раствора NaOH, водных растворов этанола или ацетона можно получить 98–99 %-ный препарат $Na_5P_3O_{10} \cdot 6H_2O$ [10, 11].

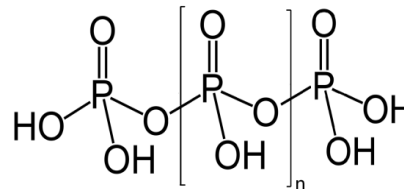


Рисунок 1 – Общая структурная формула полифосфорных кислот

Figure 1 – General structural formula of polyphosphoric acids

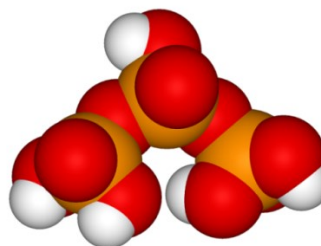


Рисунок 2 – Объемная формула триполифосфорной кислоты (Wikipedia)

Figure 2 – Volume formula of triphosphoric acid (from Wikipedia)

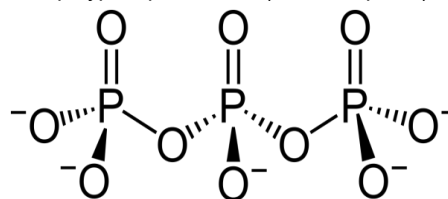


Рисунок 3 – Химическое строение триполифосфат-иона

Figure 3 – Chemical structure of triphosphate-ion

Триполифосфаты натрия и калия представляют собой бесцветные кристаллические порошки, хорошо растворимые в воде: $Na_5P_3O_{10}$ 13–14 % при 0–50 °С, $K_5P_3O_{10}$ 194 г/100 г воды при 10 °С, 212 г/100 г воды при 50 °С [10–12, 24], pH 1 %-ных водных растворов очищенных солей 9,7–9,9.

Пищевой полифосфат калия ГОСТ 33773-2016 [18] представляет собой хорошо растворимый в воде стеклообразный материал, который является в основном смесью калиевых солей линейных полифосфорных кислот (рис. 1) (массовая доля циклических полифосфатов не более 8,0 %, массовая доля фторидов не более 0,001 %). Технический полифосфат натрия ГОСТ 20291-80 [14] – бесцветное стеклообразное вещество, хорошо растворимое в воде (массовые доли $(NaPO_3)_n$ не менее 88 %, неактивных фосфатов не более 7 %).

Безводный триполифосфат натрия существует в форме двух моноклинных кристаллических модификаций, пр. гр. C2/c [27, 28]; гексагидрат триполифосфата натрия образует триклинные кристаллы [29, 30]; известны также структуры некоторых других солей триполифосфорной кислоты с катионами натрия, калия и аммония [31–34] (табл. 1).

**КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЕ ИОНОВ ЦИНКА(+2)
С ТРИПОЛИФОСФАТ-ИОНАМИ В ВОДНОМ
РАСТВОРЕ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ
ТРИПОЛИФОСФАТЫ ЦИНКА(+2)**

В водных растворах, содержащих цинк(+2) и триполифосфат-ион, в слабощелочной среде, характерной для триполифосфатных электролитов цинкования, образуются комплексы $[\text{ZnP}_3\text{O}_{10}]^{3-}$ ($\lg K_{\text{уст.}} = 6,5-8,4$ при $I = 0,1-0,15$ и $t = 20-25^\circ\text{C}$) [11, 35–44] и, возможно, $[\text{Zn}(\text{P}_3\text{O}_{10})_2]^{8-}$ [35, 42] с термодинамической устойчивостью, достаточно высокой для того, чтобы удерживать цинк(+2) от осаждения в форме гидроксида. В слабокислой среде образуются также протониро-

ванные комплексы $[\text{ZnHP}_3\text{O}_{10}]^{2-}$ ($\lg K_{\text{уст.}} = 3,7-5,1$ при $I = 0,1-0,15$ и $t = 20-25^\circ\text{C}$) [38, 40, 43] и $[\text{ZnH}_2\text{P}_3\text{O}_{10}]^-$ ($\lg K_{\text{уст.}} = 3,11$ при $I = 0,15$ и $t = 25^\circ\text{C}$) [43], а в сильнощелочных средах вероятно образование гидроксотриполифосфатных комплексов $[\text{Zn}(\text{OH})(\text{P}_3\text{O}_{10})]^{4-}$ и переход их в гидроксокомплекс $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ по мере роста концентрации ионов OH^- .

Из водных растворов выделены кристаллические триполифосфатные комплексы цинка состава $\text{Zn}_5(\text{P}_3\text{O}_{10})_2 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ [45, 46], $\text{Zn}_2\text{HP}_3\text{O}_{10} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [47], $\text{NaZn}_2\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ [11, 48], $\text{NH}_4\text{Zn}_2\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [49, 52, 53], $\text{LiZn}_2\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ [51, 53], $\text{Na}_3\text{ZnP}_3\text{O}_{10} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [11, 50, 54] (табл. 2).

Таблица 1 – Кристаллографические параметры триполифосфатов щелочных металлов и аммония (Пр. гр. – пространственная группа симметрии, z – число формульных единиц в элементарной ячейке)

Table 1 – Crystal data for sodium, potassium and ammonium tripolyphosphates (Sp. gr. – space symmetry group, z – number of formula units)

Формула вещества	Сингония	Пр. гр.	z	a, Å b, Å c, Å	α, град β, град γ, град	Литература
$\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	триклинная	P1	2	7,572(1) 9,801(1) 10,308(1)	90,92(2) 94,48(2) 92,23(2)	[29]
				10,370(2) 9,848(4) 7,615(3)	92,24(7) 94,55(9) 90,87(6)	[30]
$\text{Na}_3\text{K}_2\text{P}_3\text{O}_{10}$	моноклинная	C2/c	4	9,8866(4) 5,6332(2) 18,6577(8)	90 96,199(3) 90	[31]
$\text{Na}(\text{NH}_4)_4\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	моноклинная	C2/c	4	11,813(8) 7,292(3) 20,20(8)	90 105,19(5) 90	[32]
$\text{Na}_4\text{HP}_3\text{O}_{10} \cdot \text{H}_2\text{O}$	ромбическая	Pbcn	4	6,932(5) 12,033(4) 11,885(4)	90 90 90	[33]
$(\text{NH}_4)_5\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot \text{H}_2\text{O}$	моноклинная	Pn	2	6,429(2) 10,326(3) 11,013(4)	90 90,0(3) 90	[34]

Таблица 2 – Кристаллографические параметры триполифосфатов цинка(+2) (Пр. гр. – пространственная группа симметрии, z – число формульных единиц в элементарной ячейке)

Table 2 – Crystal data for zinc(+2) tripolyphosphates (Sp. gr. – space symmetry group, z – number of formula units)

Формула вещества	Сингония	Пр. гр.	z	a, Å b, Å c, Å	α, град β, град γ, град	Литература
$\text{Zn}_5(\text{P}_3\text{O}_{10})_2 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$	триклинная	P1	1	10,766(8) 10,316(8) 8,525(5)	111,39(5) 115,08(5) 70,19(5)	[45, 46]
$\text{Zn}_2\text{HP}_3\text{O}_{10} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	триклинная	P1	2	10,714(8) 10,658(8) 8,391(5)	114,51(1) 103,21(1) 74,31(1)	[47]
$\text{LiZn}_2\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	триклинная	P1	2	10,305(1) 10,505(1) 8,761(1)	101,79(1) 113,42(1) 94,24(1)	[51, 53]
$\text{NaZn}_2\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	триклинная	P1	2	10,454(5) 10,675(5) 8,629(4)	101,14(2) 109,85(2) 99,03(2)	[48]
$\text{NH}_4\text{Zn}_2\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	триклинная	P1	2	10,529(3) 10,737(3) 8,497(3)	102,93(2) 111,90(2) 96,01(2)	[52, 53]
		–	2	10,73(2) 8,474(8) 10,725(10)	65,03(10) 105,94(10) 102,90(12)	[49, 50]
$\text{Na}_3\text{ZnP}_3\text{O}_{10} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	моноклинная	P2 ₁ /n	4	15,03(1) 9,241(3) 14,70(1)	90 90 90	[54]

ПОЛИФОСФАТНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ ЦИНКОВАНИЯ

Таблица 3 – Химический состав и некоторые технологические характеристики полифосфатных электролитов для получения покрытий цинком и сплавами цинка (t – рабочая температура электролита, i_k – катодная плотность тока)

Table 3 – Chemical compositions and some technological characteristics of polyphosphate solutions for zinc and zinc alloys electrodeposition (t – temperature of operation, i_k – cathode current density)

N	Компоненты электролита	Концентрация компонента	pH	i_k , А/дм ²	t , °C	Литература
1	Сульфат цинка Триполифосфат натрия	20 г/дм ³ 100 г/дм ³		0,3–0,8	комнатная	[55]
2	Соль цинка Триполифосфат натрия	мольное соотношение 1 : 4	7–8	0,5–3	50	[56, 64]
3	Гидроксид цинка Триполифосфат натрия Декстрин	7 г/дм ³ 100 г/дм ³ 1 г/дм ³		0,3–0,8	комнатная	[55]
4	Сульфат цинка Триполифосфат натрия Ацетат аммония Декстрин	25–30 г/дм ³ 180–190 г/дм ³ 30 г/дм ³ 1–2 г/дм ³				[7]
5	ZnSO ₄ ·7H ₂ O Na ₅ P ₃ O ₁₀ трилон Б NH ₄ Cl NaOH	57,5 г/дм ³ 58 г/дм ³ 47 г/дм ³ 30 г/дм ³ 4,0 г/дм ³		0,5–3	50	[64]
6	Zn ⁺² полифосфат (в расчете на P ₂ O ₅) NaOH фурфурол желатин	20 г/дм ³ 100 г/дм ³ 160 г/дм ³ 1–3 см ³ /дм ³ 0,2 г/дм ³			22	[64]
7	ZnSO ₄ SnCl ₂ ·2H ₂ O Na ₅ P ₃ O ₁₀ желатин	20–23 г/дм ³ 14–16 г/дм ³ 200–300 г/дм ³ 1–3 г/дм ³	7,5–8,5	1,5–3	55–65	[57, 58]
8	ZnSO ₄ SnCl ₂ ·2H ₂ O Na ₅ P ₃ O ₁₀ желатин	8,1 г/дм ³ 34 г/дм ³ 220–230 г/дм ³ 1–2 г/дм ³		2–4		[59]
9	сульфат цинка сульфат меди триполифосфат натрия гидрофосфат натрия	40–46 г/дм ³ 11–13 г/дм ³ 224–230 г/дм ³ 18–20 г/дм ³	7,4–8,0	0,8–1,2	30–40	[60, 61]
10	сумма Zn ⁺² и Cu ⁺² триполифосфат калия пирофосфат калия	0,30–0,45 моль/дм ³ 0,9–1,1 моль/дм ³ 0,15–0,45 моль/дм ³		2–7		[65]

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИФОСФАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ЦИНКОМ И СПЛАВАМИ ЦИНКА

Известны полифосфатные электролиты цинкования, покрытия сплавами цинк–олово, цинк–медь (табл. 3) [7, 55–66], большинство из которых содержит триполифосфат-ион в качестве лиганда для связывания катионов цинка(+2), олова(+2), меди(+2) в комплексы.

В электролитах 1–4, 7–10 (табл. 3) на 1 моль Zn⁺² или суммы Zn⁺², Sn⁺², Cu⁺² приходится 2,8–4,0 моль триполифосфат-ионов, pH электролитов 7–8,5, что предполагает нахождение в них катионов металлов в основном в форме [MP₃O₁₀]³⁻ и, может быть, дополнительно [M(P₃O₁₀)₂]⁸⁻. По химическому составу электролиты 5, 10 (табл. 3) являются билигандными: кроме триполифосфат-ионов они включают этилендиаминтетраацетат- и дифосфат-ионы соответственно. Электролит 6, по существу, цинканный: основные частицы в нем – это гидроксокомплекс [Zn(OH)₄]²⁻ и, возможно, гидроксополифосфатные комплексы цинка(+2).

Рабочая температура электролитов (табл. 3) чаще повышенная (~ 50 °C), катодная плотность тока обычно 0,5–4 А/дм², рассеивающая способность высокая, выход

металла по току 35 % (2), 70–75 % (5), 60–70 % (7). На катоде образуются светлые, мелкозернистые (1, 3, 5), полублестящие (3), блестящие (6) осадки цинка или плотные (10), беспористые (7), хорошо сцепленные с основой (9) осадки сплавов цинка с мелкокристаллической структурой (7–9), которые содержат 20–40 % цинка [55–65].

При использовании триполифосфатных электролитов следует принимать во внимание гидролиз аниона P₃O₁₀⁵⁻, скорость которого зависит от pH и растет с увеличением температуры электролита [67, 68].

ПРИГОТОВЛЕНИЕ ТРИПОЛИФОСФАТНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ЦИНКОМ И СПЛАВАМИ ЦИНКА

Триполифосфатные электролиты цинкования готовят, используя растворимые в воде соли цинка: ZnSO₄·7H₂O (CAS 7446-20-0, ГОСТ 4174-77, M = 287,54 г/моль); ZnCl₂ (CAS 7646-85-7, ГОСТ 4529-78, M = 136,29 г/моль); Zn(NO₃)₂·6H₂O (CAS 10196-18-6, ГОСТ 5106-77, M = 297,48 г/моль), Zn(H₂PO₄)₂·2H₂O (CAS 13598-37-3, ТУ 6-09-01-424-77, M = 295,38 г/моль), Zn(H₂NSO₃)₂·4H₂O (CAS 13770-90-6, ТУ 6-09-02-167-76, M = 329,61 г/моль), Zn(BF₄)₂·6H₂O (CAS 27860-83-9, ТУ 6-09-2551-77, M = 347,08 г/моль), Zn(CH₃SO₃)₂·4H₂O

(CAS 33684-80-9, $M = 327,63$ г/моль), $Zn(CF_3SO_3)_2$ (CAS 54010-75-1, $M = 363,53$ г/моль), $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ (CAS 5970-45-6, ГОСТ 5823-78, $M = 219,50$ г/моль), $Zn(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$ (CAS 5970-62-7, ТУ 6-09-08-1238-77, $M = 191,44$ г/моль), а также триполифосфаты натрия $Na_5P_3O_{10}$ ($M = 367,86$ г/моль), $Na_5P_3O_{10} \cdot 6H_2O$ ($M = 475,96$ г/моль) и калия $K_5P_3O_{10}$ ($M = 448,41$ г/моль), подробно охарактеризованные в этой статье выше.

Обычно водные триполифосфатные электролиты для получения покрытий цинком и его сплавами готовят прибавлением частями при перемешивании растворов солей металлов (цинка, меди, олова, никеля, кобальта, железа, марганца) к водному раствору триполифосфата натрия или калия, затем вводят необходимые добавки, после чего устанавливают заданное значение pH прибавлением растворов кислот или щелочей и доводят водой до заданного объема [56–58, 60].

Пример 1.

В 90 см³ воды при перемешивании растворяют 22 г дигидрата ацетата цинка ГОСТ 5823-78 марки «чда». В 850 см³ воды при комнатной температуре при перемешивании растворяют 115 г триполифосфата натрия (содержание основного вещества 96 %) ГОСТ 31638-2012, 25 г гидрофосфата аммония ГОСТ 3772-74 марки «чда» и 1,0 г ванилина ГОСТ 16599-71. Первый раствор частями вливают во второй раствор и перемешивают до растворения осадка.

Состав электролита цинкования: ацетат цинка – 0,10 моль/дм³, триполифосфат натрия – 0,30 моль/дм³, гидрофосфат аммония – 0,19 моль/дм³, ванилин – 0,0065 моль/дм³.

Пример 2.

В 500 см³ воды при комнатной температуре при перемешивании растворяют 250 г триполифосфата калия (93 %) ГОСТ 31638-2012, 17 см³ этилендиамина (97 %) ТУ 2636-160-44493179-2013 марки «чда» и 1,5 г декстрина ГОСТ 6034-74. В 200 см³ воды растворяют 40 г гептагидрата сульфата цинка ГОСТ 4174-77 марки «чда». Второй раствор при перемешивании вливают в первый раствор, перемешивают до растворения осадка, при необходимости фильтруют и доводят водой до объема 1,00 дм³.

Состав электролита цинкования: сульфат цинка – 0,14 моль/дм³, триполифосфат калия – 0,52 моль/дм³, этилендиамин – 0,25 моль/дм³, декстрин – 1,5 г/дм³.

Пример 3.

В 400 см³ воды растворяют 212 г триполифосфата калия (95 %) ГОСТ 31638-2012 и 15 г аминокислоты ГОСТ 5860-75 марки «чда». В 300 см³ воды при перемешивании растворяют 7,8 г сульфата гидразиния ГОСТ 5841-74 марки «чда», 29 г гептагидрата сульфата цинка ГОСТ 4174-77 марки «чда» и 7,5 г сульфата олова(+2) ТУ 6-09-1502-75 марки «чда». Второй раствор при перемешивании частями вливают в первый раствор, прибавляют 30 %-ный раствор гидроксида калия до достижения pH 8,0 и доводят водой до объема 1,00 дм³.

Состав электролита для покрытия сплавом цинк–олово: сульфат цинка – 0,10 моль/дм³, сульфат олова(+2) – 0,035 моль/дм³, триполифосфат калия – 0,45 моль/дм³, аминокислотная кислота – 0,20 моль/дм³, гидразин – 0,060 моль/дм³.

Пример 4.

В 100 см³ воды при комнатной температуре растворяют 29 г гептагидрата сульфата цинка ГОСТ 4174-77 марки «чда» и 6,3 г пентагидрата сульфата меди ГОСТ 4165-78 марки «чда». В 700 см³

воды при комнатной температуре растворяют 154 г гексагидрата триполифосфата натрия (содержание основного вещества 93 %) ГОСТ 31638-2012 и 18 г додекагидрата гидрофосфата натрия ГОСТ 4172-76 марки «чда». Первый раствор частями при перемешивании вливают во второй раствор, перемешивают до растворения осадка, затем при перемешивании прибавляют раствор гидроксида натрия до pH 7,7 и доводят водой до объема 1,00 дм³.

Состав электролита латунирования: сульфат цинка – 0,10 моль/дм³, сульфат меди – 0,025 моль/дм³, триполифосфат натрия – 0,30 моль/дм³, гидрофосфат натрия – 0,050 моль/дм³.

Пример 5.

10,5 г моногидрата 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфоновой кислоты, очищенного перекристаллизацией реактива ТУ 6-09-6372-87 марки «ч» из 80 %-ной уксусной кислоты [69], растворяют в 100 см³ воды, прибавляют 30 %-ный раствор гидроксида калия до pH примерно 8, разбавляют водой до объема примерно 500 см³, вносят 236 г триполифосфата калия (95 %) ГОСТ 31638-2012 и перемешивают до растворения вещества. В 200 см³ растворяют 20,3 г гептагидрата сульфата цинка ГОСТ 4174-77 марки «чда» и 37,5 г тетрагидрата ацетата никеля ТУ 6-09-3848-75 марки «хч». Этот раствор при перемешивании частями вливают в первый раствор, прибавляют 30 %-ный раствор гидроксида калия до достижения pH 8,0 и доводят водой до объема 1,00 дм³.

Состав электролита для покрытия сплавом цинк–никель: сульфат цинка – 0,070 моль/дм³, ацетат никеля – 0,15 моль/дм³, триполифосфат калия – 0,50 моль/дм³, 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфонат калия – 0,050 моль/дм³.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая доступность, невысокую стоимость, удовлетворительную чистоту, низкую токсичность, высокую растворимость в воде исходных веществ (прежде всего триполифосфатов натрия и калия), хорошее качество покрытий, триполифосфатные электролиты для получения покрытий цинком и сплавами цинка заслуживают более пристального внимания исследователей. Представляется важным дополнительно изучить технологические возможности электроосаждения цинка и его сплавов с медью, оловом, никелем, кобальтом, железом, марганцем, сурьмой из полилигандных электролитов, содержащих, кроме основного лиганда – триполифосфата, дополнительный лиганд: полиамин (например этилендиамин, диэтилентриамин, триэтилентетрамин), аминоспирт (например моноэтаноламин, диэтиленгликоль, триэтиленгликоль), гидроксикарбоновую кислоту (например молочную, яблочную, винную, лимонную, D-глюконовую, салициловую), аминокарбоновую кислоту (например аминокислотную, аминокислотную, аминокислотную), фосфоновую кислоту (например 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфоновую, аминотриметиленфосфоновую, этилендиаминтетраметилфосфоновую), а также поверхностно-активные и иные необходимые добавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проскуркин Е.В., Попович В.А., Мороз А.Т. Цинкование. Справочник. Москва : Металлургия, 1988. 528 с.
2. Geduld H. Zinc plating. Teddington, Middlesex, England : Finishing publications, 1988. 360 p.
3. Окулов В.В. Цинкование. Техника и технология. Москва : Глобус, 2008. 252 с.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2026

4. Winand R. Electrodeposition of zinc and zinc alloys // *Modern electroplating*. Edited by Schlesinger M., Paunovich M. 5th edition. Chapter 10. Hoboken : John Wiley & Sons, 2010. 736 p.
5. Пурин Б.А., Цера В.А., Озола Э.А., Витина И.А. Комплексные электролиты в гальванотехнике. Рига : Лиесма, 1978. 267 с.
6. Ильин В.А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание. Ленинград : Машиностроение, 1983. 87 с.
7. Chandran M. Electrodeposition of zinc from different solutions – A review // *Transactions of the society for advancement of electrochemical science and technology (SAEST)*. 2006. V. 41. № 2. P. 35–47.
8. Афонин Е.Г. Д-Глюконатные электролиты цинкования // Труды XXII Российской межведомственной научно-технической конференции «Новые информационные технологии в системах связи и управления». Калуга : Изд-во «Носфера», 2023. С. 351–361.
9. Афонин Е.Г. Перхлоратные электролиты цинкования // Труды XXIII Российской межведомственной научно-технической конференции «Новые информационные технологии в системах связи и управления». Калуга : Изд-во «Носфера», 2024. С. 350–354. *Электронный журнал: наука, техника, образование*. 2024. № CB2(49). С. 41–46. <https://elibrary.ru/CDJHBI>.
10. Ван Везер Дж.Р. Фосфор и его соединения. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1962. 687 с.
11. Продан Е.А., Продан Л.И., Ермоленко Н.Ф. Триполифосфаты и их применение. Минск : Наука и техника, 1969. 536 с.
12. Жданов Ю.Ф. Химия и технология полифосфатов. Москва: Химия, 1979. 240 с.
13. Momeni A., Filiaggi M.J. Synthesis and characterization of different chain length sodium polyphosphates // *Journal of non-crystalline solids*. 2013. V. 382. P. 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2013.10.003>.
14. ГОСТ СССР 20291-80. Натрия полифосфат технический. Технические условия. Москва : Гос. комитет СССР по стандартам, 1981.
15. ГОСТ 13493-86. Межгосударственный стандарт. Натрия триполифосфат. Технические условия. Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1999.
16. ГОСТ 31638-2012. Межгосударственный стандарт. Добавки пищевые. Натрия и калия трифосфаты Е451. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2012.
17. ГОСТ 31686-2012. Межгосударственный стандарт. Добавки пищевые. Натрия полифосфат Е452(i). Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2014.
18. ГОСТ 33773-2016. Межгосударственный стандарт. Добавки пищевые. Калия полифосфат Е452(ii). Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2016.
19. Gallistr O., Gallera A., Cavalli L. Preparation of sodium tripolyphosphate. U. S. Patent № 4146575. Publ. 1979.
20. Lutz C.W. Preparation of granular sodium tripolyphosphate hexahydrate with low friability. U. S. Patent № 4315898. Publ. 1982.
21. Кесоян Г.А., Доброскокина Н.Д., Никитин А.Б., Лере-Планд П.А. Способ получения триполифосфата калия. Патент РФ № 2036134. Оpubл. 1995.
22. Шапкин М.А., Попов В.Л., Зинюк Р.Ю., Буксеев В.В., Мильбергер Т.Г., Орлов Е.П., Зубков В.Я., Павлов К.А. Способ получения гексагидрата триполифосфата натрия. Патент РФ № 2148011. Оpubл. 2000.
23. Шапкин М.А., Горбачев Е.В., Кузнецов А.А., Терешенков В.Н., Мильбергер Т.Г., Карпов А.В., Барышников В.Н. Состав комплексобразователя на основе гидратируемого триполифосфата натрия и способ его получения. Патент РФ № 2263632. Оpubл. 2005.
24. A kind of preparation method of potassium tripolyphosphate. China Patent № 100358801. Publ. 2008.
25. Власов П.П., Власова Г.И., Арлиевский М.П. Способ получения триполифосфата натрия. Патент РФ № 2375300. Оpubл. 2009.
26. Дмитриевский Б.А., Шапкин М.А., Горбачев Е.В., Мильбергер Т.Г., Треушченко Н.Н., Ярош Е.Б. Способ получения триполифосфата натрия пищевой квалификации. Патент РФ № 2378192. Оpubл. 2010.
27. Corbridge D.E.C. The crystal structure of sodium triphosphate, Na₅P₃O₁₀, phase I // *Acta crystallographica*. 1960. V. 13. № 3. P. 263–269. <https://doi.org/10.1107/S0365110X60000583>.
28. Davies D.R., Corbridge D.E.C. The crystal structure of sodium triphosphate, Na₅P₃O₁₀, phase II // *Acta crystallographica*. 1958. V. 11. № 5. P. 315–319. <https://doi.org/10.1107/S0365110X58000876>.
29. Dyroff D.R. The crystal structure of sodium triphosphate hexahydrate. PhD Thesis. California institute of technology, Pasadena, California, USA, 1965. <https://doi.org/10.7907/FT3A-YQ66>.
30. Wiench D.M., Jansen M., Hoppe R. Kristallstruktur von Na₅P₃O₁₀·6H₂O // *Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie*. 1982. V. 488. № 1. P. 80–86. <https://doi.org/10.1102/zaac.19824880110>.
31. Moutataouia M., Lamire M., Saadi M., El Ammari L. Dipotassium trisodium triphosphate, K₂Na₃P₃O₁₀ // *Acta crystallographica*. E. 2012. V. 68. № 5. P. i31. <https://doi.org/10.1107/S1600536812014894>.
32. Averbuch-Pouchot M.T., Durif A. Structure of tetraammonium monosodium triphosphate tetrahydrate // *Acta crystallographica*. C. 1985. V. 41. № 11. P. 1553–1555. <https://doi.org/10.1107/S10108270185008526>.
33. Kindler N., Jansen M. Kristallstruktur von Na₄HP₃O₁₀·H₂O // *Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie*. 1997. V. 623. № 1–6. P. 55–58. <https://doi.org/10.1002/zaac.19976230109>.
34. Ляхов А.С., Палкина К.К., Селевич А.Ф. Кристаллическая структура моногидрата трифосфата аммония (NH₄)₅P₃O₁₀·H₂O // *Журнал неорганической химии*. 1994. Т. 39. № 9. С. 1438–1442.
35. Andress K.R., Nachtrab R. Über die komplexbildung von natriumtriphosphat mit zweiwertigen metallionen. I. Die bestimmung Me(II)-triphosphatkomplexen // *Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie*. 1961. V. 311. № 1–2. P. 1–12. <https://doi.org/10.1002/zaac.19613110102>.
36. Andress K.R., Nachtrab R. Über die komplexbildung von natriumtriphosphat mit zweiwertigen metallionen. III. Die komplexbildungsreaktionen zwischen natriumtriphosphat und zweiwertigen metallionen // *Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie*. 1961. V. 311. № 1–2. P. 22–31. <https://doi.org/10.1002/zaac.19613110104>.
37. Johansson A., Wänninen E. The complexometric analysis of pyro- and triphosphates – I : Stability constants of the proton and metal complexes of the acids // *Talanta*. 1963. V. 10. № 7. P. 769–777. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(63\)80107-1](https://doi.org/10.1016/0039-9140(63)80107-1).
38. Ellison H., Martell A.E. Chelating tendencies of tripolyphosphate ions // *Journal of inorganic and nuclear chemistry*. 1964. V. 26. № 9. P. 1555–1560. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(64\)80044-0](https://doi.org/10.1016/0022-1902(64)80044-0).
39. Anderegg G. Entropiebedingte komplexbildung thermodynamische daten der komplexbildung mit dem tripolyphosphat-ion // *Helvetica chimica acta*. 1965. V. 48. № 7. P. 1712–1717. <https://doi.org/10.1002/hlca.19650480730>.
40. Taqui Khan M.M., Rabindra Reddy P. Metal chelates of tripolyphosphate // *Journal of inorganic and nuclear chemistry*. 1971. V. 33. № 5. P. 1427–1433. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(71\)80438-4](https://doi.org/10.1016/0022-1902(71)80438-4).
41. Taqui Khan M.M., Rabindra Reddy P. Thermodynamic quantities associated with the interaction of tripolyphosphoric acid with metal ions // *Journal of inorganic and nuclear chemistry*. 1973. V. 35. № 1. P. 179–186. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(73\)80623-2](https://doi.org/10.1016/0022-1902(73)80623-2).
42. Grzmil B.U., Kic B. Pyro- and tripolyphosphates and citrates as the complexing agents for micronutrients in liquid fertilizers // *Industrial and engineering chemistry research*. 2002. V. 41. № 2. P. 139–144. <https://doi.org/10.1021/ie010223d>.

43. Cigala R.M., Crea F., De Stefano C., Lando G., Manfredi G., Sammartano S. Quantitative study on the interaction of Sn^{2+} and Zn^{2+} with some phosphate ligands, in aqueous solution at different ionic strengths // *Journal of molecular liquids*. 2012. V. 165. P. 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2011.11.002>.
44. Maki H., Tsujito M., Sakurai M., Yamada T., Nariai H., Mizuhata M. Stabilities of the divalent metal ion complexes of a short-chain polyphosphate anion and its imino derivative // *Journal of solution chemistry*. 2013. V. 42. № 11. P. 2104–2118. <https://doi.org/10.1007/s10953-013-0099-2>.
45. Averbuch-Pouchot M.T., Durif A. Données cristallographiques sur le tripolyphosphate de zinc heptadécahydraté $\text{Zn}_5(\text{P}_3\text{O}_{10})_2 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ // *Journal of applied crystallography*. 1975. V. 8. № 5. P. 564. <https://doi.org/10.1107/S0021889875011284>.
46. Averbuch-Pouchot M.T., Durif A., Guitel J.C. Structure cristalline du tripolyphosphate de zinc heptadécahydraté: $\text{Zn}_5(\text{P}_3\text{O}_{10})_2 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ // *Acta crystallographica*. B. 1975. V. 31. № 10. P. 2482–2486. <https://doi.org/10.1107/S0567740875007832>.
47. Averbuch-Pouchot M.T., Guitel J.C. Structure cristalline du tripolyphosphate acide de zinc hexahydraté: $\text{Zn}_2\text{H}_2\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ // *Acta crystallographica*. B. 1976. V. 32. № 6. P. 1670–1673. <https://doi.org/10.1107/S0567740876006223>.
48. Averbuch-Pouchot M.T., Guitel J.C. Structure cristalline du tripolyphosphate mixte zinc-sodium nonahydraté $\text{Zn}_2\text{NaP}_3\text{O}_{10} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ // *Acta crystallographica*. B. 1977. V. 33. № 5. P. 1427–1431. <https://doi.org/10.1107/S0567740877006220>.
49. Красников В.В., Констант З.А., Продан Е.А., Галкова Т.Н. Синтез и рентгенографические данные двойного триполифосфата $\text{NH}_4\text{Zn}_2\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ // *Известия АН ЛатвССР. Серия химическая*. 1980. № 2. С. 239.
50. Констант З.А., Диндуне А.П. Фосфаты двухвалентных металлов. Рига: Зинатне, 1987. 371 с.
51. Ляхов А.С., Люцко В.А., Продан Л.И., Палкина К.К. Кристаллическая структура октагидрата трифосфата лития-цинка $\text{LiZn}_2\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ // *Неорганические материалы*. 1991. Т. 27. № 5. С. 1014–1018. <https://elibrary.ru/ZISFPN>.
52. Ляхов А.С., Люцко В.А., Галкова Т.Н., Палкина К.К. Кристаллическая структура $\text{NH}_4\text{Zn}_2\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ // *Журнал неорганической химии*. 1991. Т. 36. № 12. С. 3053–3059. <https://elibrary.ru/ZICTNR>.
53. Ляхов А.С. Кристаллическая структура некоторых орто- и трифосфатов металлов: дисс. ... канд. хим. наук. Минск, 1995. 125 с.
54. Rakotomahanina E., Averbuch-Pouchot M.-T., Durif A. Données cristallographiques sur les triphosphates du type $\text{M}^n\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ pour $\text{M}^n = \text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn}, \text{Zn}$ et Cd // *Bulletin de la société française minéralogie et de cristallographie*. 1972. V. 95. № 4. P. 516–520.
55. Гинцберг С.А., Иванов А.Ф., Погребенский Л.А. Способ электроосаждения цветных металлов, например меди, цинка, бронзы. Авт. свид. № 159082. Оpubл. 1963.
56. Галинкер В.С., Сапрыкин А.И. Электроосаждение цинка из триполифосфатного электролита // *Украинский химический журнал*. 1968. Т. 34. № 5. С. 461–465.
57. Галинкер В.С., Федоренко Г.А., Кудра О.К. Электроосаждение оловянно-цинкового сплава из триполифосфатного электролита // *Известия Вузов. Химия и химическая технология*. 1969. Т. 12. № 7. С. 928–932.
58. Кудра О.К., Галинкер В.С., Федоренко Г.А. Способ электроосаждения сплава олово-цинк. Авт. свид. СССР № 244060. Оpubл. 1969.
59. Галинкер В.С., Федоренко Г.А., Кудра О.К. О влиянии хлористого аммония на электроосаждение сплава олово-цинк из триполифосфатного электролита // *Известия Вузов. Химия и химическая технология*. 1969. Т. 12. № 10. С. 1454–1456.
60. Галинкер В.С., Савенко П.В., Мацола М.В., Кудра О.К. Способ электролитического осаждения сплава медь-цинк. Авт. свид. СССР № 282879. Оpubл. 1970.
61. Галинкер В.С., Мацола М.В., Савенко П.В., Кудра О.К. Исследование условий электроосаждения медноцинкового сплава из триполифосфатного электролита // *Защита металлов*. 1971. Т. 7. № 2. С. 210–212.
62. Галинкер В.С., Мацола М.В., Савенко П.В., Кудра О.К. Исследование катодной поляризации при электроосаждении медно-цинковых сплавов из триполифосфатных электролитов // *Защита металлов*. 1972. Т. 8. № 3. С. 350–352.
63. Мацола М.В., Галинкер В.С., Кудра О.К. Влияние некоторых добавок на катодный процесс при электроосаждении сплава медь-цинк из триполифосфатных электролитов // *Известия Вузов. Химия и химическая технология*. 1972. Т. 15. № 2. С. 264–269.
64. Кудрявцев Н.Т. Электролитические покрытия металлами. Москва: Химия, 1979. 352 с.
65. Харламов В.И., Глазунова Т.И., Смирнов К.Н., Бригаднов А.В., Вакка А.Б., Полещук Е.И., Ваграмян Т.А. Некоторые закономерности электроосаждения металлов и сплавов из полифосфатных электролитов // *Физико-химические основы химической технологии. Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева*. 1988. Вып. 150. С. 84–88.
66. Ameen T.J., Orloff G.L. Non-cyanide brass plating bath and a method of making metallic foil having a brass layer using the non-cyanide brass plating bath. U. S. Patent № 5762778. Patented 1998.
67. Shen C.Y., Dyroff D.R. Hydrolytic degradation of sodium tripolyphosphate in concentrated solutions and in presence of foreign ions // *Industrial and engineering chemistry product research and development*. 1966. V. 5. № 2. P. 97–100. <https://doi.org/10.1021/i360018a001>.
68. Emsley J., Niaz S. Rate of hydrolysis of $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ and $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ at 100 °C and the effect of urea // *Polyhedron*. 1983. V. 2. № 5. P. 375–377. [https://doi.org/10.1016/S0277-5387\(00\)83932-7](https://doi.org/10.1016/S0277-5387(00)83932-7).
69. Афонин Е.Г., Александров Г.Г. Рентгенографическая идентификация 1-гидроксизтан-1,1-дифосфоновой кислоты // *Журнал общей химии*. 2003. Т. 73. № 3. С. 367–369. <https://elibrary.ru/OYTTHUZ>.

Информация об авторе

Е. Г. Афонин – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств.

REFERENCES

1. Proskurkin, E.V., Popovich, V.A., Moroz, A.T. (1988). Zinc plating. Reference book. Moscow: Metallurgy publ. 528 p. (In Russ.).
2. Geduld, H. (1988). Zinc plating. Teddington, Middlesex, England: Finishing publications. 360 p.
3. Okulov, V.V. (2008). Zinc plating. Technics and technology. Moscow: Globe publ. 252 p. (In Russ.).
4. Winand, R. (2010). Electrodeposition of zinc and zinc alloys // *Modern electroplating*. Edited by Schlesinger M., Paunovich M. 5th edition. Chapter 10. Hoboken: John Wiley & Sons. 736 p.
5. Purin, B.A., Tsera, V.A., Ozola, E.A., Vitinya, I.A. (1978). Complex electrolytes in galvanotechnics. Riga: Liesma. 265 p. (In Russ.).
6. Ilin, V.A. (1983). Zinc, cadmium, tin, and lead plating. Leningrad: Mechanical engineering publ. 87 p. (In Russ.).
7. Chandran, M. (2006). Electrodeposition of zinc from different solutions - A review // *Transactions of the society for advancement of electrochemical science and technology (SAEST)*, 41(2), 35–47.
8. Afonin, E.G. (2023). D-Gluconate electrolytes for zinc plating // *Proceedings of the 22th Russian interdepartmental scientific and technical conference «New information technologies in communication and control systems»*. Kaluga, Noosfera publ. 351–361. (In Russ.).
9. Afonin, E.G. (2024). Perchlorate electrolytes for zinc plating // *Proceedings of the 23th Russian interdepartmental scientific and technical conference «New information technologies in communication and control systems»*. Kaluga, Noosfera publ. 351–361. (In Russ.).

- ga, Noosfera publ. 350-354. (In Russ.). Electronic journal: Science, technology and education. 2024. № CB2(49), 41-46. (In Russ.). <https://elibrary.ru/CDJHBI>.
10. Van Wazer, J.R. (1958). Phosphorus and its compounds. Vol. I: Chemistry. New York: Interscience publishers, 2046 p.
 11. Prodan, E.A., Prodan, L.I., Ermolenko, N.F. (1969). Triphosphates and its application. Minsk: Science and technics. 536 p. (In Russ.).
 12. Zhdanov, Yu.F. (1979). Chemistry and technology of polyphosphates. Moscow: Chemistry publ. 240 p. (In Russ.).
 13. Momeni, A., Filiaggi, M.J. (2013). Synthesis and characterization of different chain length sodium polyphosphates // Journal of non-crystalline solids, 382, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.003>.
 14. GOST 20291-80. USSR. Sodium polyphosphate technical grade. Specifications. Moscow: USSR state committee on standards, 1981. (In Russ.).
 15. GOST 13493-86. Interstate standard. Sodium triphosphate. Specifications. Moscow: IPK Publishing standards, 1999. (In Russ.).
 16. GOST 31638-2012. Interstate standard. Food additives. Sodium and potassium triphosphates E451. Specifications. Moscow: Standardinform publ., 2012. (In Russ.).
 17. GOST 31686-2012. Interstate standard. Food additives. Sodium polyphosphate E452(i). General Specifications. Moscow: Standardinform publ., 2014. (In Russ.).
 18. GOST 33773-2016. Interstate standard. Food additives. Potassium polyphosphate E452(ii). Specifications. Moscow: Standardinform publ., 2016. (In Russ.).
 19. Gallistru, O., Gallera, A., Cavalli, L. Preparation of sodium triphosphate. U. S. Patent № 4146575. Publ. 1979.
 20. Lutz, C.W. Preparation of granular sodium triphosphate hexahydrate with low friability. U. S. Patent № 4315898. Publ. 1982.
 21. Kesoyan, G.A., Dobroskokina, N.D., Nikitin, A.B., Lere-Pland, P.A. Method of producing potassium triphosphate. R. F. Patent № 2036134. Publ. 1995. (In Russ.).
 22. Shapkin, M.A., Popov, V.L., Zinyuk, R.Yu., Bukseev, V.V., Milberger, T.G., Orlov, E.P., Zubkov, B.Ya., Pavlov, K.A. Method of producing sodium triphosphate hexahydrate. R. F. Patent № 2148011. Publ. 2000. (In Russ.).
 23. Shapkin, M.A., Gorbachev, E.V., Kuznetsov, A.A., Tereshenkov, V.N., Milberger, T.G., Karpov, A.V., Baryshnikov, V.N. Composition of complex-forming agent on base of hydratable sodium triphosphate and method of production of such composition. R. F. Patent № 2263632. Publ. 2005. (In Russ.).
 24. A kind of preparation method of potassium triphosphate. China Patent № 100358801. Publ. 2008.
 25. Vlasov, P.P., Vlasova, G.I., Arlievskij, M.P. Method of producing sodium triphosphate. R. F. Patent № 2375300. Publ. 2009. (In Russ.).
 26. Dmitrevskij, B.A., Shapkin, M.A., Gorbachev, E.V., Milberger, T.G., Treushchenko, N.N., Jarosh, E.B. Method of producing food grade sodium triphosphate. R. F. Patent № 2378192. Publ. 2010. (In Russ.).
 27. Corbridge, D.E.C. (1960). The crystal structure of sodium triphosphate, $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$, phase I // Acta crystallographica, 13(3), 263-269. <https://doi.org/10.1107/S0365110X60000583>.
 28. Davies, D.R., Corbridge, D.E.C. (1958). The crystal structure of sodium triphosphate, $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$, phase II // Acta crystallographica, 11(5), 315-319. <https://doi.org/10.1107/S0365110X58000876>.
 29. Dyroff, D.R. (1965). The crystal structure of sodium triphosphate hexahydrate. PhD Thesis. California institute of technology, Pasadena, California, USA. <https://doi.org/10.7907/FT3A-YQ66>.
 30. Wiench, D.M., Jansen, M., Hoppe, R. (1982). Kristallstruktur von $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie, 488(1), 80-86. <https://doi.org/10.1102/zaac.19824880110>.
 31. Moutataouia, M., Lamire, M., Saadi, M., El Ammari, L. (2012). Dipotassium trisodium triphosphate, $\text{K}_2\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_{10}$ // Acta crystallographica. E, 68(5), i31. <https://doi.org/10.1107/S1600536812014894>.
 32. Averbuch-Pouchot, M.T., Durif, A. (1985). Structure of tetraammonium monosodium triphosphate tetrahydrate // Acta crystallographica. C, 41(11), 1553-1555. <https://doi.org/10.1107/S10108270185008526>.
 33. Kindler, N., Jansen, M. (1997). Kristallstruktur von $\text{Na}_4\text{HP}_3\text{O}_{10} \cdot \text{H}_2\text{O}$ // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie, 623(1-6), 55-58. <https://doi.org/10.1002/zaac.19976230109>.
 34. Lyakhov, A.S., Palkina, K.K., Selevich, A.F. (1994). Crystal structure of ammonium triphosphate monohydrate (NH_4) $\text{P}_3\text{O}_{10} \cdot \text{H}_2\text{O}$ // Journal of inorganic chemistry, 39(9), 1438-1442. (In Russ.).
 35. Andress, K.R., Nachtrab, R. (1961). Über die komplexbildung von natriumtriphosphat mit zweiwertigen metallionen. I. Die bestimmung Me(II)-triphosphatkomplexen // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie, 311(1-2), 1-12. <https://doi.org/10.1002/zaac.19613110102>.
 36. Andress, K.R., Nachtrab, R. (1961). Über die komplexbildung von natriumtriphosphat mit zweiwertigen metallionen. III. Die komplexbildungsreaktionen zwischen natriumtriphosphat und zweiwertigen metallionen // Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie. 311 (1-2), 22-31. <https://doi.org/10.1002/zaac.19613110104>.
 37. Johansson, A., Wänninen, E. (1963). The complexometric analysis of pyro- and triphosphates - I: Stability constants of the proton and metal complexes of the acids // Talanta, 10(7), 769-777. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(63\)80107-1](https://doi.org/10.1016/0039-9140(63)80107-1).
 38. Ellison, H., Martell, A.E. (1964). Chelating tendencies of triphosphate ions // Journal of inorganic and nuclear chemistry, 26(9), 1555-1560. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(64\)80044-0](https://doi.org/10.1016/0022-1902(64)80044-0).
 39. Anderegg, G. (1965). Entropiebedingte komplexbildung thermodynamische daten der komplexbildung mit dem triphosphat-ion // Helvetica chimica acta, 48(7), 1712-1717. <https://doi.org/10.1002/hlca.19650480730>.
 40. Taqui Khan, M.M., Rabindra Reddy, P. (1971). Metal chelates of triphosphate // Journal of inorganic and nuclear chemistry, 33(5), 1427-1433. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(71\)80438-4](https://doi.org/10.1016/0022-1902(71)80438-4).
 41. Taqui Khan, M.M., Rabindra Reddy, P. (1973). Thermodynamic quantities associated with the interaction of triphosphoric acid with metal ions // Journal of inorganic and nuclear chemistry, 35(1), 179-186. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(73\)80623-2](https://doi.org/10.1016/0022-1902(73)80623-2).
 42. Grzmil, B.U., Kic, B. (2002). Pyro- and triphosphates and citrates as the complexing agents for micronutrients in liquid fertilizers // Industrial and engineering chemistry research, 41(2), 139-144. <https://doi.org/10.1021/ie010223d>.
 43. Cigala, R.M., Crea, F., De Stefano, C., Lando, G., Manfredi, G., Sammartano, S. (2012). Quantitative study on the interaction of Sn^{2+} and Zn^{2+} with some phosphate ligands, in aqueous solution at different ionic strengths // Journal of molecular liquids, 165, 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2011.11.002>.
 44. Maki, H., Tsujito, M., Sakurai, M., Yamada, T., Narai, H., Mizuhata, M. (2013). Stabilities of the divalent metal ion complexes of a short-chain polyphosphate anion and its imino derivative // Journal of solution chemistry, 42(11), 2104-2118. <https://doi.org/10.1007/s10953-013-0099-2>.
 45. Averbuch-Pouchot, M.T., Durif, A. (1975). Données cristallographiques sur le triphosphate de zinc heptadécahydraté $\text{Zn}_5(\text{P}_3\text{O}_{10})_2 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ // Journal of applied crystallography, 8(5), 564. <https://doi.org/10.1107/S0021889875011284>.
 46. Averbuch-Pouchot, M.T., Durif, A., Guitel, J.C. (1975). Structure cristalline du triphosphate de zinc

heptadécahydrate: $Zn_5(P_3O_{10})_2 \cdot 17H_2O$ // Acta crystallographica. B, 31(10), 2482-2486. <https://doi.org/10.1107/S0567740875007832>.

47. Averbuch-Pouchot, M.T., Guitel, J.C. (1976). Structure cristalline du tripolyphosphate acide de zinc hexahydraté: $Zn_2HP_3O_{10} \cdot 6H_2O$ // Acta crystallographica. B, 32(6), 1670-1673. <https://doi.org/10.1107/S0567740876006213>.

48. Averbuch-Pouchot, M.T., Guitel, J.C. (1977). Structure cristalline du tripolyphosphate mixte zinc-sodium nonahydraté $Zn_2NaP_3O_{10} \cdot 9H_2O$ // Acta crystallographica. B, 33(5), 1427-1431. <https://doi.org/10.1107/S0567740877006220>.

49. Krasnikov, V.V., Konstant, Z.A., Prodan, E.A., Galkova, T.N. (1980). Synthesis and x-ray research data of double tripolyphosphate $NH_4Zn_2P_3O_{10} \cdot 7H_2O$ // Bulletin of the Latvia SSR academy of sciences. Chemistry, (2), 239. (In Russ.).

50. Konstant, Z.A., Dindune, A.P. (1987). Phosphates of divalent metals. Riga: Zinatne publ. 371 p. (In Russ.).

51. Lyakhov, A.S., Lyutsko, V.A., Prodan, L.I., Palkina, K.K. (1991). Crystal structure of lithium zinc triphosphate octahydrate $LiZn_2P_3O_{10} \cdot 8H_2O$ // Inorganic materials, 27(5), 845-849. <https://elibrary.ru/ZISFPN>.

52. Lyakhov, A.S., Lyutsko, V.A., Galkova, T.N., Palkina, K.K. (1991). Crystal structure of $NH_4Zn_2P_3O_{10} \cdot 7H_2O$ // Journal of inorganic chemistry, 36(12), 3053-3059. (In Russ.). <https://elibrary.ru/ZICTNR>.

53. Lyakhov, A.S. Crystal structure of some metals ortho- and triphosphates. Candidate of chemical sciences thesis. Minsk, 1995. 125 p. (In Russ.).

54. Rakotomahanina, E., Averbuch-Pouchot, M.-T., Durif, A. (1972). Données cristallographiques sur les triphosphates du type $M^{II}Na_3P_3O_{10} \cdot 12H_2O$ pour $M^{II} = Ni, Co, Mn, Zn$ et Cd // Bulletin de la société française minéralogie et de cristallographie, 95(4), 516-520.

55. Gintsberg S.A., Ivanov A.F., Pogrebenskiy L.A. Method for electrodeposition of non-ferrous metals such as copper, bronze. USSR author's certificate № 159082. Published 1963. (In Russ.).

56. Galinker, V.S., Saprykin, A.I. (1968). Electrodeposition of zinc from a tripolyphosphate electrolyte // Ukrainian chemistry journal, 34(5), 461-465. (In Russ.).

57. Galinker, V.S., Fedorenko, G.A., Kudra, O.K. (1969). Electrodeposition of tin-zinc alloy from tripolyphosphate electrolyte // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya, 12(7), 928-932. (In Russ.).

58. Kudra, O.K., Galinker, V.S., Fedorenko, G.A. Method of electrodeposition tin-zinc alloy. USSR author's certificate № 244060. Published 1969. (In Russ.).

59. Galinker, V.S., Fedorenko, G.A., Kudra, O.K. (1969). Influence of ammonium chloride on electrodeposition of tin-zinc alloy from a tripolyphosphate electrolyte // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya, 12(10), 1454-1456. (In Russ.).

60. Galinker, V.S., Savenko, P.V., Matsola, M.V., Kudra, O.K. Method of electrodeposition copper-zinc alloy. USSR author's certificate № 282879. Published 1970. (In Russ.).

61. Galinker, V.S., Matsola, M.V., Savenko, P.V., Kudra, O.K. (1971). Investigation of the conditions for the electrodeposition of copper-zinc alloy from a tripolyphosphate electrolyte // Protection of metals, 7(2), 210-212. (In Russ.).

62. Galinker, V.S., Matsola, M.V., Savenko, P.V., Kudra, O.K. (1972). Cathode polarization study on electrodeposition of copper-zinc alloy from tripolyphosphate electrolytes // Protection of metals, 8(3), 350-352.

63. Matsola, M.V., Galinker, V.S., Kudra, O.K. (1972). Influence of some additives on cathode process of copper-zinc electrodeposition from tripolyphosphate electrolytes // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya, 15(2), 264-269. (In Russ.).

64. Kudryavtsev, N.T. (1979). Electrochemical metal coatings. Moscow: Chemistry publ. 352 p. (In Russ.).

65. Kharlamov, V.I., Glazunova, T.I., Smirnov, K.N., Brigadnov, A.V., Vakka, A.B., Poleschuk, E.I., Vagramyan, T.A. (1988). Some patterns of metals and alloys electrodeposition from polyphosphate electrolytes // Physico-chemical foundations of chemical technology. Proceedings of Mendeleev Moscow chemical technology institute, 150, 84-88. (In Russ.).

66. Ameen, T.J., Orloff, G.L. Non-cyanide brass plating bath and a method of making metallic foil having a brass layer using the non-cyanide brass plating bath. U. S. Patent № 5762778. Patented 1998.

67. Shen, C.Y., Dyroff, D.R. (1966). Hydrolytic degradation of sodium tripolyphosphate in concentrated solutions and in presence of foreign ions // Industrial and engineering chemistry product research and development, 5(2), 97-100. <https://doi.org/10.1021/i360018a001>.

68. Emsley, J., Niazi, S. (1983). Rate of hydrolysis of $Na_4P_2O_7$ and $Na_5P_3O_{10}$ at 100 °C and the effect of urea // Polyhedron, 2(5), 375-377. [https://doi.org/10.1016/S0277-5387\(00\)83932-7](https://doi.org/10.1016/S0277-5387(00)83932-7).

69. Afonin, E.G., Aleksandrov, G.G. (2003). X-Ray identification of 1-hydroxyethane-1,1-diphosphonic acid // Russian journal of general chemistry, 73(3), 340-343. <https://doi.org/10.1023/A:1024989332249>.

Information about the author

E.G. Afonin - candidate of chemical sciences, senior researcher, Kaluga research institute of telemechanical devices.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.