

УДК 547.1-304.2:546.224

Р.Є. Хома^{a, б}, *В.О. Гельмбольдт*^в, *А.А. Еннан*^а, *В.М. Баумер*^г, *Р.М. Длубовський*^а,
С.В. Водзінський^{а, б}

СИНТЕЗ І СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУЛЬФІТУ ТРИС(ГІДРОКСИМЕТИЛ)МЕТИЛАМОНІУМУ

^а Фізико-хімічний інститут захисту навколишнього середовища та людини МОН і НАН України,
м. Одеса, Україна

^б Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса, Україна

^в Одеський національний медичний університет, м. Одеса, Україна

^г НТК «Інститут монокристалів» НАН України, м. Харків, Україна

При взаємодії в системі «оксид сірки(IV)–трис(гідроксиметил)метиламін (Tris)–вода–аргон» утворюється сульфід трис(гідроксиметил)метиламоніуму $[(\text{HOCH}_2)_3\text{CNH}_3]_2\text{SO}_3$ (I). Одержаний амонієвий сульфід I охарактеризовано методами елементного аналізу, рентгенофазового аналізу, ІЧ-спектроскопії та мас-спектрометрії. Сполука I кристалізується у триклинній просторовій групі $P-1$ з такими параметрами комірки: $a=10,6227(17)$ Å, $b=10,6714(12)$ Å, $c=14,7461(19)$ Å, $\alpha=110,392(11)^\circ$, $\beta=110,194(13)^\circ$, $\gamma=91,034(12)^\circ$, $V=1452,24$ Å³, $Z=4$. В ІЧ-спектрі солі I валентні коливання $\nu(\text{SO})$ аніону (ν_1 та ν_3 , відповідно) надані смугами в діапазоні $1039-910$ см⁻¹. Дві смуги середньої інтенсивності при 503 та 429 см⁻¹ та дві слабкої інтенсивності при 519 та 467 см⁻¹ віднесено до деформаційних коливань $\delta(\text{NCC})$, $\delta(\text{CCO})$ та $\delta_a(\text{SO}_3^{2-})$. Симетричне деформаційне коливання $\delta_s(\text{SO}_3^{2-})$ аніону SO_3^{2-} проявляється у вигляді смуги середньої інтенсивності при 619 см⁻¹. З власних коливань катіону в ІЧ-діапазоні I відзначено наявність широких смуг $\nu(\text{OH})$ з максимумом біля 3400 см⁻¹. В діапазоні $3290-2365$ см⁻¹ спостерігаються широкі структуровані смуги валентних коливань NH_3^+ -груп, що беруть участь у Н-зв'язуванні. Коливання $\delta_{\text{as,s}}(\text{NH}_3^+)$ проявляються у вигляді двох порівняно інтенсивних полос при 1634 та 1550 см⁻¹. Tris має у своїй структурі значне число Н-донорних та Н-акцепторних центрів, що сприяє процесу сульфоокислення $\text{S(IV)} \rightarrow \text{S(VI)}$ у процесі витримування продукту I на повітрі, на відміну від інших етаноламінів.

Ключові слова: оксид сірки (IV), трис(гідроксиметил)метиламін, амонієвий сульфід, сульфоокиснення, спектральні характеристики.

DOI: 10.32434/0321-4095-2020-131-4-172-176

Вступ

Інтерес до різних аспектів хімії продуктів взаємодії оксиду сірки(IV) з водними розчинами органічних основ пов'язаний з необхідністю вирішення проблеми уловлювання SO_2 з технологічних газів і подальшої утилізації продуктів сорбції [1–3]. Як показано у роботі [3], склад продуктів взаємодії оксиду сірки(IV) з водними розчинами N-вмісних органічних основ (Am) регулюється основністю лігандів: утворення амонієвих солей сірковмісних оксианіонів фіксується у разі $\text{pK}_a \text{ Am} \geq 4,63$. Відомі приклади отримання амонієвих сульфідів як продуктів вза-

ємодії у системах « $\text{SO}_2\text{-Am-H}_2\text{O}$ » нечислені. Так, виділені та охарактеризовані у індивідуальному стані сульфідні протонованих форм аміногуанідину [4], N-(2-гідроксиетил)етилендіаміну [5], N-метилмоноетаноламіну [6]), а також гідросульфідні N,N,N',N'-тетраметилгуанідинію [1] та етаноламонію [6,7]).

Ізомерні гідросульфідні амонієві сульфати складу $[(n\text{-Alk})_4\text{N}](\text{H-SO}_3)$ раніше [8] були виділені з реакційних систем « $\text{SO}_2\text{-Am-H}_2\text{O-C}_2\text{H}_5\text{OH}$ » ($\text{Am} = [(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{N}]\text{OH}$, $[(n\text{-C}_4\text{H}_9)_4\text{N}]\text{OH}$, $[(n\text{-C}_5\text{H}_{11})_4\text{N}]\text{OH}$); з $[(n\text{-C}_3\text{H}_7)_4\text{N}]\text{OH}$ у подібних умовах синтезу утворюється піросульфід складу

$[(n-C_3H_7)_4N]_2(S_2O_3)$. З системи « $SO_2-EDA-H_2O-PEG$ » (EDA – етилендіамін; PEG – поліетиленгліколь) вперше був виділений моноамонієвий сульфід складу $[H_2NCH_2CH_2NH_3]_2(SO_3)$ [2], утворення якого раніше було зафіксовано у системі « $SO_2-EDA-H_2O$ » методами рН-, редокс- та кондуктометрії [9]. Обмеженість відомих прикладів структурно охарактеризованих амонієвих солей сірко(IV)вмісних оксианіонів – гідросульфиту тетраметилгуанідинію [1], моногідрату сульфиту аміногуанідинію [4] та моногідрату сульфиту N-(2-гідроксиетил)етилендіамонію [5] пов'язана, на нашу думку, з легкістю переходу сульфідних форм у сульфатні в результаті «некаталітичного» автоокислення [3,10,11].

У даній роботі описані метод синтезу, результати вивчення будови та спектральних характеристик нового амонієвого сульфиту – сульфиту трис(гідроксиметил)метиламонію $[(HOCH_2)_3CNH_3]_2SO_3$ ($(TrisH)_2SO_3$), що був виділений як продукт взаємодії оксиду сірки(IV) з водним розчином трис(гідроксиметил)метиламіну (Tris) у атмосфері аргону.

Експериментальна частина

Сульфит трис(гідроксиметил)метиламонію (I)

В термостатовану комірку, заповнену аргонном, поміщали знегазований розчин Tris (0,05 моль) у 30 мл води та у режимі барботування пропускали крізь нього SO_2 зі швидкістю 50 мл·хв⁻¹ протягом 45 хв ($T=293$ К). Одержаний розчин витримували протягом доби при кімнатній температурі у герметично закритій комірці, продували аргонном та вакуумували до повного видалення води. Виділений кристалічний продукт I білого кольору (7,96 г, вихід 98,16%) не піддавали додатковому очищенню. Мас-спектр EI I: $[M_{Tris}-CH_2OH]^+$ (m/z 90, I, 100%); m/z 72, I, 28%; m/z 64, I, 49%; m/z 48, I, 15%; m/z 32, I, 48%; $[CH_2=NH_2]^+$ (m/z 30, I, 45%). Знайдено, %: С 29,83; Н 7,54; N 8,58; S 9,81. $C_8H_{24}N_2O_9S$. Розраховано, %: С 29,62; Н 7,46; N 8,64; S 9,89. М 324,36.

Сульфат трис(гідроксиетил)метиламоніюму (II)

При перекристалізації з водного розчину I, а також при зберіганні на повітрі (протягом тижня) сполуки I отриманий кристалічний продукт II білого кольору. Мас-спектр EI II: $[M_{Tris}-CH_2OH]^+$ (m/z 90, I, 100%); m/z 72, I, 24%; m/z 60, I, 53%; m/z 44, I, 18%; m/z 42, I, 43%; $[CH_2=NH_2]^+$ (m/z 30, I, 40%). Знайдено, %: С 28,91; Н 7,25; N 8,45; S 9,38. $C_8H_{24}N_2O_{10}S$. Розраховано, %: С 28,23; Н 7,11; N 8,23; S 9,42. М 340,35.

Аналіз вмісту вуглецю, водню та азоту

проводили з використанням елементного CHN-аналізатора, сірки – за Шенігером [12]. ІЧ-спектри поглинання реєстрували на спектрофотометрі Spectrum BX II FT-IR System (Perkin-Elmer) (діапазон 4000–350 см⁻¹, зразки готували у вигляді таблеток з KBr); мас-спектри EI – на приладі MX-1321 (пряме введення зразка у джерело, енергія іонізуючих електронів 70 eV). Рентгеноструктурне дослідження сполук виконано на дифрактометрі «Xcalibur-3» (Oxford Diffraction Ltd.), (MoK_α-випромінювання, графітовий монохроматор, CCD-детектор Sapphire-3). Рентгенофазовий аналіз виконаний на порошковому дифрактометрі «Siemens D500» (геометрія Бреґа-Брентано, випромінювання CuK_α, Ni-фільтр)

Результати та обговорення

У мас-спектрах солей I и II фіксується інтенсивний пік іону $[M_{Tris}-CH_2OH]^+$ – характерного продукту фрагментації етаноламінів [13]. Характеристики продуктів фрагментації Tris у мас-спектрах його амонієвих солей I та II, а також табульованому мас-спектрі Tris (<https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C77861&Mask=200>) знаходяться у добрій відповідності [10].

По даним рентгенофазового аналізу сполука I відноситься до триклінної сингонії пр. гр. P-1, a=10,6227(17) Å, b=10,6714(12) Å, c=14,7461(19) Å, α=110,392(11)°, β=110,194(13)°, γ=91,034(12)°, V=1452,24 Å³, Z=4). Згідно з даними рентгеноструктурного аналізу, сполука II являє собою амонієвий сульфат, структурно охарактеризований раніше [11].

Результати аналізу ІЧ-спектру I наведені в таблиці, віднесення коливань проведено з використанням даних [10,14].

Згідно з даними [14] вільний пірамідальний іон SO_3^{2-} відноситься до точкової групи C_{3v} та має чотири основних коливальних частот: ν₁(A₁) – 967 см⁻¹, ν₂(A₁) – 620 см⁻¹, ν₃(E) – 933 см⁻¹, ν₄(E) – 469 см⁻¹, причому внаслідок низької локальної симетрії іону SO_3^{2-} у кристалі, усі його основні коливання повинні бути активними у ІЧ- та КР-спектрах, а виродження коливань повинно повністю зніматись. У ІЧ-спектрі солі I валентні коливання ν(SO) іону (ν₁ та ν₃, відповідно) надані смугами в інтервалі 1039–910 см⁻¹. Дві смуги середньої інтенсивності при 503 та 429 см⁻¹ та дві слабкої інтенсивності при 519 та 467 см⁻¹, вочевидь, обумовлені коливаннями δ(NCC), δ(CCO) та δ_d(SO_3^{2-}). Симетричне деформаційне коливання δ_s(SO_3^{2-}) (ν₂) іону SO_3^{2-} про-

Хвильові числа (см⁻¹) максимумів смуг поглинання в ІЧ-спектрах Tris та І'

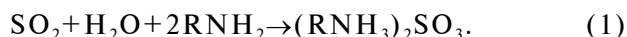
Tris [10]	Віднесення*	І
3370 с. 3330 пл. 3300 с. 3200 сер.ш.	$\nu(\text{OH}), \nu_{\text{as,s}}(\text{NH}_2),$ $\nu(\text{NH}_3^+)$	3228 с. 3085–2927 д.с.ш.
2670 сер.ш.	$\nu(\text{NH}_3^+)$	2708 с. 2602 сер. 2576 сер. 2500 пл. 2384 пл.
1600 с.	$\delta_{\text{as,s}}(\text{NH}_2), \delta_{\text{as,s}}(\text{NH}_3^+)$	1634 с. 1550 с.
1500 пл. 1400 сл.	$\delta(\text{CNH})$	1459 сер. 1428 сер. 1413 сл.
1340 сер. 1310 сер. 1295 сер. 1260 сл.	$\delta(\text{COH}), \tau(\text{CH}_2),$ $\rho(\text{NH}_3^+), \nu(\text{CC})$	1293 с.
1215 сер.	$\omega(\text{NH}_2), \omega(\text{NH}_3^+)$	1216 сл. 1197 сл.
1175 сер.	$\omega(\text{CH}_2)$	1145 пл.
1090 сер. 1075 сер. 1040 с.	$\nu(\text{CO}), \nu(\text{CN})$	1119 с. 1057 с. 1030 д.с.
1020 сер.	$\nu(\text{CC})$	
	$\nu_{\text{as,s}}(\text{SO}_3^{2-})$	1030 д.с. 979 сл. 945 д.с. 910 сл.
960 сер. 915 сл. 890 сер. 805 сер.	$\rho(\text{NH}_2), \rho(\text{NH}_3^+),$ $\rho(\text{CH}_2)$	945 д.с. 910 сл. 856 сер.
785 сер.	$\delta(\text{COH}), \delta(\text{CCC}),$ $\tau(\text{CO})$	790 пл. 762 пл. 734 сер. 649 сл.
630 сер.	$\delta_s(\text{SO}_3^{2-})$	619 сер.
520 сл. 470 сл. 445 сл.	$\delta(\text{NCC}), \delta(\text{CCO}),$ $\delta_d(\text{SO}_3^{2-})$	519 сл. 503 сер. 467 сл. 429 сер.

Примітка: * – деформаційні: δ – ножичні, δ_d – позаплосинні; ω – вільні; τ – крутильні; ρ – маятникові; γ – лібраційні.

являється у вигляді смуги середньої інтенсивності при 619 см⁻¹.

З власних коливань катіона в ІЧ-діапазоні І відмітимо наявність широких смуг $\nu(\text{OH})$ з максимумом біля 3400 см⁻¹. В інтервалі 3290–2365 см⁻¹ спостерігаються широкі структуровані смуги валентних коливань NH_3 -груп, які беруть участь у Н-зв'язуванні. Коливання $\delta_{\text{as,s}}(\text{NH}_3^+)$ проявляються у вигляді двох порівняно інтенсивних полос при 1634 та 1550 см⁻¹.

Таким чином, в процесі хемосорбції оксиду сірки(IV) водним розчином Tris без доступу кисню повітря утворюється амонієвий сульфит:



Tris має у своїй структурі значне число Н-донорних та Н-акцепторних центрів, що сприяє процесу сульфоокислення $\text{S(IV)} \rightarrow \text{S(VI)}$ [10]:



причому реалізація вказаного редокс-перетворення, подібно [10,11], здійснюється в процесі витримання продукту реакції (1) на повітрі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Reversible uptake of COS, CS₂, and SO₂: ionic liquids with o-alkylxanthate, o-alkylthiocarbonyl, and o-alkylsulfite anions* / Heldebrant D.J., Yonker C.R., Jessop P.G., Phan L. // *Chem. Eur. J.* – 2009. – Vol.15. – No. 31. – P.7619-7627.
2. *Absorption of dilute sulfur dioxide in ethanediamine with ethylene glycol or polyethylene glycol 400 plus water system* / Niu Y., Li C., Shen J., Wei X. // *J.Cleaner Prod.* – 2018. – Vol.171. – P.506-511.
3. *Onium sulfates and hydrogen sulfates: products of reactions of sulfur(IV) oxide with aqueous solutions of alkylamines and aniline* / Khoma R.E., Gel'mboldt V.O., Ennan A.A., Baumer V.N., Rakipov I.M., Dlubovskii R.M. // *Russ. J. Inorg. Chem.* – 2018. – Vol.63. – No. 5. – P.655-660.
4. *Synthesis and structure of aminoguanidinium sulfite monohydrate* / Khoma R.E., Gelmboldt V.O., Baumer V.N., Shishkin O.V., Koroeva L.V. // *Russ. J. Inorg. Chem.* – 2013. – Vol.58. – No. 7. – P.843-847.
5. *Synthesis and structure of N-(hydroxyethyl)-ethylenediammonium sulfite monohydrate* / Khoma R.E., Gelmboldt V.O., Shishkin O.V., Baumer V.N., Puzan A.N., Ennan A.A., Rakipov I.M. // *Russ. J. Inorg. Chem.* – 2014. – Vol.59. – No. 6. – P.541-544.
6. *Спектральные характеристики продуктов взаимодействия оксида серы (IV) с водными растворами этанолами*

нов / Хома Р.Е., Гельмбольдт В.О., Короева Л.В., Эннан А.А., Мазепа А.В., Брусиловский Ю.Э. // Вопросы химии и хим. технол. – 2012. – № 1. – С. 133-136.

7. *Спектральные* характеристики продуктов взаимодействия оксида серы (IV) с водными растворами N-алкилированных производных моноэтаноламина / Хома Р.Е., Эннан А.А., Мазепа А.В., Гельмбольдт В.О. // Вопросы химии и хим. технол. – 2013. – № 1. – С. 136-138.

8. *Maylor R., Gill J.B., Goodall D.C.* Tetra-n-alkylammonium bisulphites: a new example of the existence of the bisulphite ion in solid compounds // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* – 1972. – No. 18. – P.2001-2003.

9. *Khoma R.E.* Complex formation of sulfur(IV) oxide with ethylenediamine and its derivatives in water // *Russ. J. Gen. Chem.* – 2015. – Vol.85. – No. 4. – P.802-809.

10. *Synthesis*, crystal structure, vibrational spectra, and thermochemical transformations of tris(hydroxymethyl)aminomethane / Khoma R.E., Ennan A.A., Gel'mbol'dt V.O., Shishkin O.V., Baumer V.N., Ennan A.A. // *Russ. J. Inorg. Chem.* – 2014. – Vol.59. – No. 1. – P.1-6.

11. *Absorption* and desorption of SO₂ in aqueous solutions of diamine-based molten salts / Lim S.R., Hwang J., Kim C.S., Park H.S., Cheong M., Kim H.S., Lee H. // *J. Hazard. Mater.* – 2015. – Vol.289. – P.63-71.

12. *Климова В.А.* Основные методы анализа органических соединений. – М.: Химия, 1975. – 104 с.

13. *Вульфсон Н.С., Заикин В.Г., Микая А.И.* Масс-спектрометрия органических соединений. – М.: Химия, 1986. – 285 с.

14. *Накамото К.* ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. – М.: Мир, 1991. – 536 с.

Надійшла до редакції 15.04.2020

SYNTHESIS AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF TRIS(HYDROXYMETHYL)METHYLAMMONIUM SULFITE

*R.E. Khoma^{a, b, *}, V.O. Gelmboldt^c, A.A. Ennan^a, V.M. Baumer^d, R.M. Dlubovskii^a, S.V. Vodzinskiy^{a, b}*

^a Physical-Chemical Institute for Environment and Human Protection of MES of Ukraine and NAS of Ukraine, Odessa, Ukraine

^b Odessa I.I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine

^c Odessa National Medical University, Odessa, Ukraine

^d Institute for Single Crystals of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

* e-mail: rek@onu.edu.ua

It was established that the interaction in the system «sulfur (IV) oxide–tris(hydroxymethyl)methylamine (Tris)–water–argon» yielded tris(hydroxymethyl)methylammonium sulfite [(HOCH₂)₃CNH₃]₂SO₃ (I). The obtained ammonium sulfite I has been characterized by the methods of elemental analysis, X-ray phase analysis, IR spectroscopy and mass spectrometry. Compound I crystallizes in the three-line space group P-1 with the following cell frame parameters: a=10.6227(17) Å, b=10.6714(12) Å, c=14.7461(19) Å, α=110.392(11)°, β=110.194(13)°, γ=91.034(12)°, V=1452.24 Å³, and Z=4. IR spectrum of the salt I reveals ν(SO) anion stretching vibrations (ν₁ and ν₃, respectively) that are represented by the bands in the region of 1039–910 cm⁻¹. Two bands of medium intensity at 503 cm⁻¹ and 429 cm⁻¹ and two weak bands at 519 cm⁻¹ and 467 cm⁻¹ are ascribed to the deformation vibrations δ(NCC), δ(CCO) and ma δ_s(SO₃²⁻). The symmetric deformation oscillation of the δ_s(SO₃²⁻) anion is expressed as a medium intensity band at 619 cm⁻¹. The presence of broad bands ν(OH) with a maximum of about 3400 cm⁻¹ is observed from the cation eigenmodes in the IR region of compound I. There are wide structured bands of stretching vibrations of ⁺NH₃-groups participating in H-bonding in the region of 3290–2365 cm⁻¹. The fluctuations of δ_{as,s}(⁺NH₃) appear as two relatively intense bands at 1634 cm⁻¹ and 1550 cm⁻¹. Tris has a significant number of H-donor and H-acceptor centers in its structure which contributes to the process of sulfoxidation S(IV)→S(VI) in the process of product I air-curing, unlike other ethanol amines.

Keywords: sulfur oxide (IV); tris(hydroxymethyl)-methylamine; ammonium sulfite; sulfoxidation; spectral characteristics.

REFERENCES

1. Heldebrant D.J., Yonker C.R., Jessop P.G., Phan L. Reversible uptake of COS, CS₂, and SO₂: ionic liquids with o-alkylxanthate, o-alkylthiocarbonyl, and o-alkylsulfite anions. *Chemistry – A European Journal*, 2009, vol. 15, pp. 7619-7627.
2. Niu Y., Li C., Shen J., Wei X. Absorption of dilute sulfur dioxide in ethanediamine with ethylene glycol or polyethylene glycol 400 plus water system. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 171, pp. 506-511.

3. Khoma R.E., Gel'mbol'dt V.O., Ennan A.A., Baumer V.N., Rakipov I.M., Dlubovskii R.M. Onium sulfates and hydrogen sulfates: products of reactions of sulfur(IV) oxide with aqueous solutions of alkylamines and aniline. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2018, vol. 63, no 5, pp. 655-660.
4. Khoma R.E., Gelmboldt V.O., Baumer V.N., Shishkin O.V., Koroeva L.V. Synthesis and structure of aminoguanidinium sulfite monohydrate. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2013, vol. 58, pp. 843-847.
5. Khoma R.E., Gelmboldt V.O., Shishkin O.V., Baumer V.N., Puzan A.N., Ennan A.A., Rakipov I.M. Synthesis and structure of N-(hydroxyethyl)ethylenediammonium sulfite monohydrate. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2014, vol. 59, pp. 541-544.
6. Khoma R.E., Gelmboldt V.O., Koroeva L.V., Ennan A.A., Mazepa A.V., Brusilovskiy Yu.E. Spektral'nye kharakteristiki produktov vzaimodeistviya oksida sery(IV) s vodnymi rastvorami etanolaminov [Spectral characteristics of the products of interaction between sulfur (IV) oxide and aqueous solutions of ethanolamines]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2012, no. 1, pp. 133-136. (in Russian).
7. Khoma R.E., Ennan A.A., Mazepa A.V., Gelmboldt V.O. Spektral'nye kharakteristiki produktov vzaimodeistviya oksida sery(IV) s vodnymi rastvorami N-alkilirovannykh proizvodnykh monoetanolamina [Spectral characteristics of the products of interaction between sulfur dioxide and aqueous solutions of N-alkylated monoethanolamines derivatives]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2013, no. 1, pp. 136-138. (in Russian).
8. Maylor R., Gill J.B., Goodall D.C. Tetra-n-alkylammonium bisulphites: a new example of the existence of the bisulphite ion in solid compounds. *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, 1972, pp. 2001-2003.
9. Khoma R.E. Complex formation of sulfur(IV) oxide with ethylenediamine and its derivatives in water. *Russian Journal of General Chemistry*, 2015, vol. 85, pp. 802-809.
10. Khoma R.E., Ennan A.A., Gel'mbol'dt V.O., Shishkin O.V., Baumer V.N., Ennan A.A. Synthesis, crystal structure, vibrational spectra, and thermochemical transformations of tris(hydroxymethyl)aminomethane. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2014, vol. 59, pp. 1-6.
11. Lim S.R., Hwang J., Kim C.S., Park H.S., Cheong M., Kim H.S., Lee H. Absorption and desorption of SO₂ in aqueous solutions of diamine-based molten salts. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, vol. 289, pp. 63-71.
12. Klimova V.A., *Osnovnye metody analiza organicheskikh soedinenii* [Basic methods of organic analysis]. Khimiya, Moscow, 1975. 104 p. (in Russian).
13. Vul'fson N.S., Zaikin V.G., Mikaya A.I., *Mass-spektrometriya organicheskikh soedinenii* [Mass spectrometry of organic compounds]. Khimiya, Moscow, 1986. 285 p. (in Russian).
14. Nakamoto K., *Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds*. Wiley-Interscience, New York, 1986. 484 p.