

УДК 546.224–31:547.436.3:547.262–304.2

Р. Є. Хома^{1,2*}, Т. С. Беньковська^{1,2}, В. О. Гельмбольдт³,
Д. Г. Клімов⁴, М. Г. Горліченко⁵

¹Фізико-хімічний інститут захисту навколишнього середовища і людини
МОН України та НАН України, вул. Преображенська 3, Одеса, 65082, Україна

²Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна

³Одеський національний медичний університет, пер. Валіховський, 2, Одеса,
65082, Україна

⁴Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
пр. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, 49005, Україна

⁵Військова академія, Фонтанська дорога, 10, Одеса, 65009, Україна

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

СКЛАД ТА ВІДНОСНА СТІЙКІСТЬ ПРОДУКТІВ ВЗАЄМОДІЇ ОКСИДУ СІРКИ (IV) З ВОДНИМИ РОЗЧИНАМИ ТАУРАТУ КАЛІЮ ТА МОНОЕТАНОЛАМОНІЮ. ХЕМОСОРБЕНТ ПРОЛОНГОВАНОЇ ДІЇ

Здійснено рН-, редокс та кондуктометричне дослідження хемосорбції оксиду сірки (IV) водними 0,1 моль/л розчинами таурату калію (**TauK**) і моноетаноламонію (**TauMEA**) в області температур 293 ÷ 313 К. Виявлено склад утворених при цьому сполук. Розраховано йон-молекулярний склад системи $\text{SO}_2 - \text{TauK} - \text{H}_2\text{O}$, концентраційні та термодинамічні константи утворення сульфітних та гідросульфітних асоціатів. Запропоновано склади просочуючих розчинів на основі MEA та TauK для отримання хемосорбентів пролонгованої дії респіраторного призначення.

Ключові слова: оксид сірки (IV), таурат калію, моноетаноламін, іон-молекулярні рівноваги, імпрегновані волокнисті хемосорбенти.

Аміни, зокрема аміноспирти (**Am**), найбільш широко протестовані в якості хемосорбентів кислих газів, наприклад оксиду сірки (IV) [1–4]. Раніше [4–12] нами було розроблено типоряд імпрегнованих волокнистих хемосорбентів (**IBXC**) респіраторного призначення на основі моноетаноламіну (**MEA**); виявлено позитивний ефект введення гідрофілізуючих добавок-промоутерів до складу IBXC на їхні захисні властивості щодо SO_2 [4, 7, 10, 11].

В останній час велика увага дослідників приділена амінокислотам (як альтернативам аміноспиртів) для уловлення SO_2 , оскільки вони продемонстрували високу реакційну здатність щодо вказаного токсиканту, є екологічно чистими та демонструють інші сприятливі властивості, такі як низькі летючість та токсичність, а також високу здатність до біорозкладання [13–16]. Особливе місце серед амінокислот займає таурин (**Tau**, $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3\text{H}$) – єдина сульфокислота природного походження [17], яка є багатотоннажним продуктом [18].

Проведення даного дослідження стимулювала обмеженість літературних даних про характер взаємодії оксиду сірки (IV) з водними розчинами солей **Tau**, склад та відносну стійкість відповідних продуктів взаємодії. Мета даної роботи полягала у вивченні хімічних аспектів процесів хемосорбції SO_2 водними розчинами тау-

рату калію (**TauK**) та таурату моноетаноламонію (**TauMEA**) в області 298–313 К, а також в розробці хемосорбенту пролонгованої дії респіраторного призначення на основі отриманих даних.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

У дослідженнях використовували **Tau** (CAS No 107–35–7), моноетаноламін (**MEA**; «for synthesis»), гідроксид калію (ч.д.а.). Модельні 0,1 М водні розчини **TauK** та **TauMEA** готували шляхом взаємодії **Tau** із відповідними основами в еквімолярних кількостях. Методика приготування водних розчинів та проведення хронопотенціо- та хронокондуктометричного газометричного титрування SO_2 модельних розчинів детально описана в роботах [19, 20].

Для досліджень як волокнистий носій (ВН) використовували неткане голкопробивне полотно для фільтрації на основі віскозного волокна (СФМ-ОЦ; ТУ У 33.1–01530125–015:2007) товщиною 4 мм і поверхневою густиною 300 г/м². У порівняльних умовах досліджувалися: зразки ВН, що містять **MEA** або/і **TauK**. Методика приготування просочуючих розчинів та отримання ІВХС на їх основі, а також дослідження захисних властивостей отриманих ІВХС щодо SO_2 в динамічних умовах аналогічна [21].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1–4 подані дані хроно-рН-, хроноредокс- та хронокондуктометричного титрування водних 0,1 моль/л розчинів **TauK** та **TauMEA** газоподібним SO_2 при 298–313 К. Стрибкам на інтегральних рН-метричних кривих титрування (рис. 1) відповідають максимуми на диференційних кривих титрування (рис. 2; табл. 1), подібно [19, 20]. Перші ефекти (стрибки та максимуми, відповідно) на вказаних кривих спостерігаються при співвідношеннях $Q_{\text{SO}_2}:Q_{\text{TauK}} = (0,40 \div 0,44):1,00$ та $Q_{\text{SO}_2}:Q_{\text{TauMEA}} = (0,34 \div 0,49):1,00$, подібно N,N-діалкілмоноетаноламінам та морфоліну [22], але на відміну від **MEA**, N-метилмоно- (**MMEA**), ді- (**DEA**), N-метилді- (**MDEA**) та триетаноламіну (**TEA**; $Q_{\text{SO}_2}:Q_{\text{Am}} = 0,50:1,00$) [20, 23]. Це зумовлено утворенням сульфідів та їх Н-зв'язаних асоціатів із іншими іонами, подібно [24]. Положення других ефектів на рН-метричних кривих відповідають співвідношенням $Q_{\text{SO}_2}:Q_{\text{TauK}} = (0,77 \div 0,90):1,00$ та $Q_{\text{SO}_2}:Q_{\text{TauMEA}} = (0,66 \div 0,90):1,00$, на відміну від [20] ($Q_{\text{SO}_2}:Q_{\text{Am}} = 0,90:1,00$).

Для **TauK** та **TauMEA** (при 298–313 К та 298–308К, відповідно) величини перших максимумів на диференційних рН-метричних кривих титрування з підвищенням температури зменшуються (табл. 1), що згідно [20] зумовлено гідролітичною стійкістю утворених сполук. Величини других максимумів для **TauK** в області 298–308К практично не залежать від температури.

Положення максимумів на диференційних рН-метричних кривих титрування збігаються, подібно **MEA**, **DEA**, **MDEA** і **TEA** [20], як з положенням стрибків на інтегральних та максимумів на диференційних кривих редокс-метричного титрування (рис. 3, табл. 2), так і з положенням зламів на кондуктометричних кривих (рис. 4, табл. 3). Від'ємні значення $\Delta\kappa$ вказують на утворення в досліджуваних розчинах слабкодисоційованих частинок або/і менш рухливих іонів [25, 26], що підтверджується даними математичних розрахунків, наведених нижче.

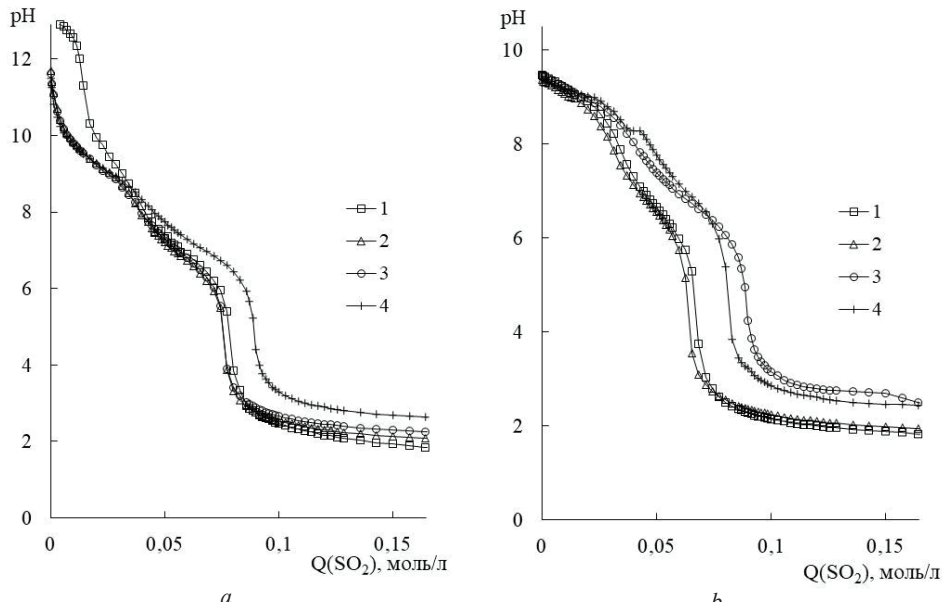


Рис. 1. Інтегральні рН-метричні криві титрування водних 0,1 М розчинів ТауК (а) та ТауМЕА (б) газоподібним SO_2 . Т (К): 298–1; 303–2; 308–3; 313–4.

Fig. 1. TauK (a) and TauMEA (b) aqueous 0.1 M solutions titration integral pH-metric curves by gaseous SO_2 . T (K): 298–1; 303–2; 308–3; 313–4.

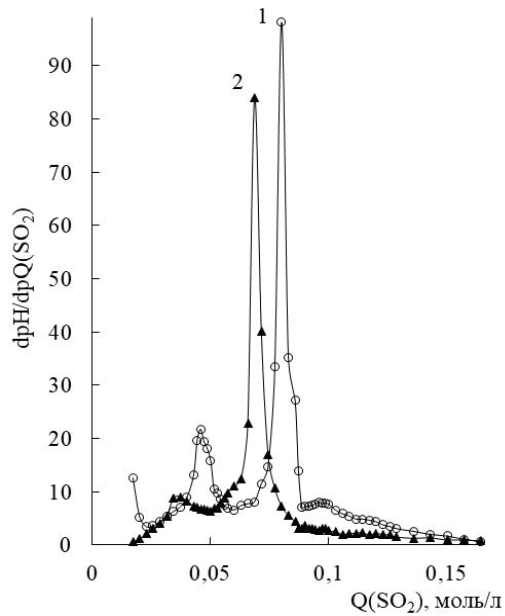


Рис. 2. Диференційні рН-метричні криві титрування водних 0,1 М розчинів ТауК (1) та ТауМЕА (2) газоподібним SO_2 при 298 К.

Fig. 2. TauK (1) and TauMEA (2) aqueous 0.1 M solutions titration differential pH-metric curves by gaseous SO_2 at 298 K.

Таблиця 1

Характеристики рН-метричних кривих титрування
0,1 М розчинів TauK та TauMEA газоподібним оксидом сульфуру (IV)

Table 1

TauK and TauMEA 0.1 M solutions pH-metric titration curves parametres
by gaseous sulfur dioxide

Т, К	1-й максимум			2-й максимум		
	SO ₂ :TauK (TauMEA)	pH	dpH/dpQ _{SO₂}	SO ₂ :TauK (TauMEA)	pH	dpH/dpQ _{SO₂}
TauK						
298	0,40:1,00	8,15	10,87	0,80:1,00	3,85	98,1
303	0,44:1,00	7,58	12,29	0,77:1,00	3,88	99,1
308	0,40:1,00	7,98	8,54	0,77:1,00	3,90	100
313	0,44:1,00	8,06	7,02	0,90:1,00	4,40	119
TauMEA						
298	0,37:1,00	7,58	9,06	0,69:1,00	3,75	83,9
303	0,34:1,00	7,55	8,20	0,66:1,00	3,55	82,9
308	0,43:1,00	7,84	7,00	0,90:1,00	4,25	100
313	0,49:1,00	7,88	8,48	0,83:1,00	3,85	101

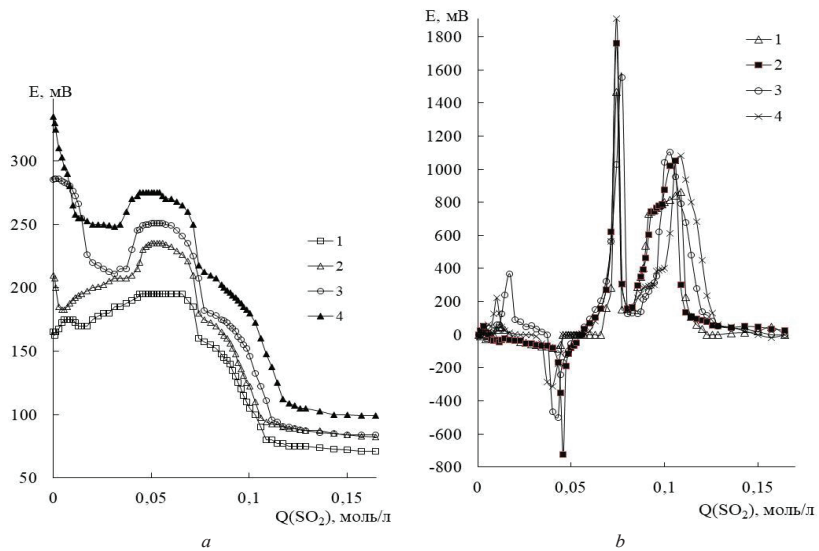


Рис. 3. Інтегральні (а) та диференційні (б) редоксметричні криві титрування водного 0,1М розчину TauK. Т (К): 298–1; 303–2; 308–3; 313–4.

Fig. 3. TauK aqueous 0.1 M solutions titration integral (a) and differential (b) redox curves by gaseous SO₂. Т (К): 298–1; 303–2; 308–3; 313–4.

Таблиця 2

Характеристики редокс-метричних кривих титрування
0,1 М розчинів TauK та TauMEA газоподібним оксидом сульфуру (IV)

Table 2

TauK and TauMEA 0.1 M solutions redox titration curves parameters
by gaseous sulfur dioxide

T, K	1-й мінімум			2-й мінімум		
	SO ₂ :TauK (TauMEA)	E, мВ	dE/dpQ _{SO₂} , мВ	SO ₂ :TauK (TauMEA)	E, мВ	dE/dpQ _{SO₂} , мВ
TauK						
298	0,43:1,00	193	-83,4	0,80:1,00	152	160
303	0,46:1,00	230	-725	0,80:1,00	173	158
308	0,43:1,00	245	-500	0,80:1,00	180	127
313	0,40:1,00	270	-311	0,80:1,00	210	158

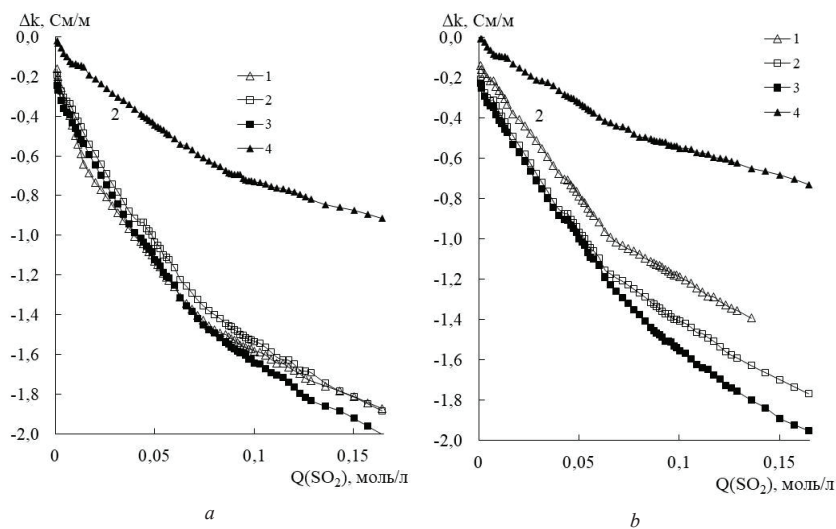


Рис. 4. Кондуктометричні криві титрування водних 0,1 М розчинів TauK (a) та TauMEA (b) газоподібним SO₂. Т (К): 298–1; 303–2; 308–3; 313–4.

Fig. 4. TauK (a) and TauMEA (b) aqueous 0.1 M solutions titration conductometric curves by gaseous SO₂. T (K): 298–1; 303–2; 308–3; 313–4.

Таблиця 3

Характеристики зламів на кондуктометричних кривих титрування
0,1 М розчинів TauK та TauMEA газоподібним оксидом сульфуру (IV)

Table 3

TauK and TauMEA 0.1 M solutions conductometric titration curves parameters
by gaseous sulfur dioxide

T, K	SO ₂ :TauK (TauMEA)	Δk, См·м ⁻¹	SO ₂ :TauK (TauMEA)	Δk, См·м ⁻¹	SO ₂ :TauK (TauMEA)	Δk, См·м ⁻¹
TauK						
298	0,43:1,00	-1,03	0,74:1,00	-1,43	1,09:1,00	-1,63
303	0,48:1,00	-0,98	0,74:1,00	-1,36	1,06:1,00	-1,57
308	0,43:1,00	-1,02	0,77:1,00	-1,48	1,11:1,00	-1,71
313	0,43:1,00	-0,39	0,74:1,00	-0,61	1,17:1,00	-0,78
TauMEA						
298	0,34:1,00	-0,59	0,63:1,00	-0,96	0,94:1,00	-1,16
303	0,34:1,00	-0,77	0,60:1,00	-1,10	1,00:1,00	-1,41
308	0,40:1,00	-0,88	0,66:1,00	-1,23	1,02:1,00	-1,73
313	0,37:1,00	-0,24	0,63:1,00	-0,42	-	-

Фізико-хімічна модель. У водних розчинах TauK (подібно солям амінометансульфонової кислоти (AMSA) та її N-алкілованих похідних (YAMSA) [24]) значення рН > 7,0, що зумовлено гідролізом аміноетансульфонат-іонів (реакція 1) з утворенням цвіттеріонів [27]:

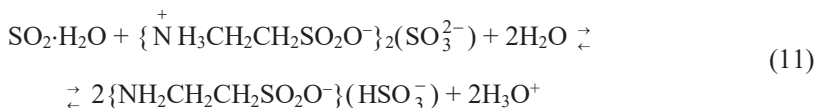
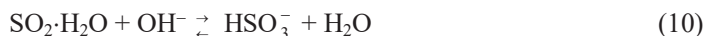
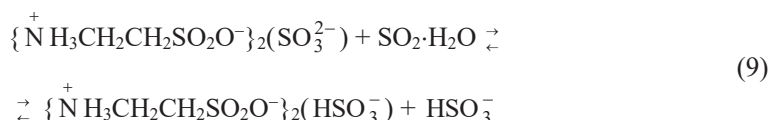
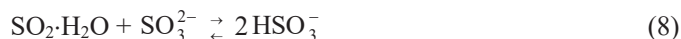
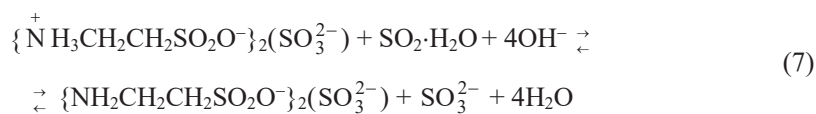
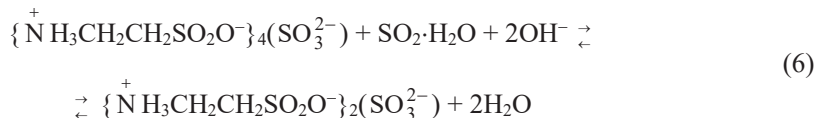
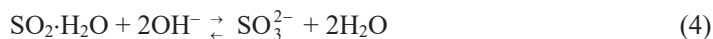


Розчинення SO₂ у водних розчинах (реакція 2) супроводжують утворенням відповідного моногідрату (реакція 3) [20]:

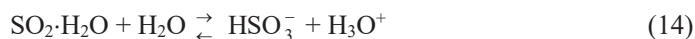
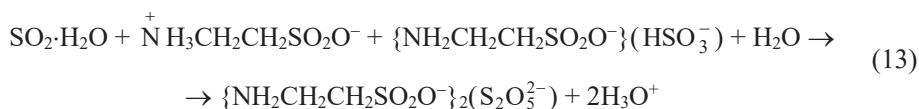


Останній при взаємодії з компонентами хемосорбційної системи утворює сульфідні сполуки (рівняння 4–7; рН ≤ 10,30), які перетворюються в гідросульфідні (рівняння 8, 9; перший скачок титрування на рН-метричній кривій). Останні два процеси завершуються в слаболужному середовищі (рН 7,45 ÷ 7,70), на відміну від водних 0,05 ÷ 0,20 моль/л розчинів MEA (рН 6,65 ÷ 6,80) [28]. В точці середини першого скачка титрування (рН 7,58 ÷ 8,15) починається реакція (10), подібно [28];

при цьому паралельно перебігають реакції (4), (6) – (9). В кислому середовищі має місце реакція (11).

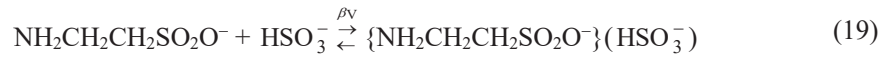
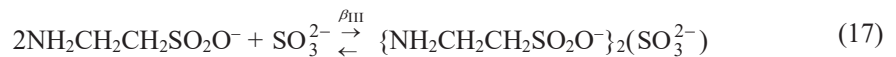


Подальше додавання SO₂ призводить до переходу гідросульфітних сполук в піросульфітні (рівняння 12, 13), а процеси (1), (6) та (7) припиняються, подібно [28]. При цьому розпочинається реакція (14), так як pH < 7,0.



В точці середини другого скачка титрування (pH 3,85 ÷ 4,40) процес (11) зупиняється. Наступне пониження pH зумовлено лише процесами (12) – (14). В точці кінця другого скачка титрування Q_{SO₂}:Q_{таур} = (0,90 ÷ 0,97):1,00 завершується процес (13). Подальше зв'язування SO₂ зумовлено його гідратацією (3) та реакціями (12), (14).

Процеси утворення вище згаданих сульфїтних (I – III) та гїдросульфїтних (IV, V) асоціатів за рахунок електростатичних взаємодїй та Н-зв'язування, аналогічно [24], можна також описати рївняннями (15) – (19), вїдповїдно.



Враховуючи закон діючих мас (рївняння 4, 12, 14–18), матерїальний баланс по SO_2 (20) та Tau (21) і умову електронейтральності (22) маємо систему математичних рївнянь.

$$Q_{\text{SO}_2} = [\text{SO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}] + [\text{HSO}_3^-] + 2[\text{S}_2\text{O}_5^{2-}] + [\text{SO}_3^{2-}] + C_{\text{I}} + C_{\text{II}} + C_{\text{III}} + C_{\text{IV}} + C_{\text{V}} \quad (20)$$

$$Q_{\text{Tau}} = [\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_2\text{O}^-] + [\overset{+}{\text{N}} \text{H}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_2\text{O}^-] + 4C_{\text{I}} + 2C_{\text{II}} + 2C_{\text{III}} + 2C_{\text{IV}} + C_{\text{V}} \quad (21)$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+] + [\text{K}^+] = [\text{OH}^-] + [\text{HSO}_3^-] + 2[\text{S}_2\text{O}_5^{2-}] + 2[\text{SO}_3^{2-}] + 2C_{\text{I}} + 2C_{\text{II}} + 4C_{\text{III}} + C_{\text{IV}} + 2C_{\text{V}} \quad (22)$$

$$\text{де } C_{\text{I}} = [\{ \overset{+}{\text{N}} \text{H}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_2\text{O}^- \}_4 (\text{SO}_3^{2-})]; C_{\text{II}} = [\{ \overset{+}{\text{N}} \text{H}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_2\text{O}^- \}_2 (\text{SO}_3^{2-})];$$

$$C_{\text{III}} = [\{ \text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_2\text{O}^- \}_2 (\text{SO}_3^{2-})]; C_{\text{IV}} = [\{ \overset{+}{\text{N}} \text{H}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_2\text{O}^- \}_2 (\text{HSO}_3^-)];$$

$$C_{\text{V}} = [\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_2\text{O}^-] (\text{HSO}_3^-).$$

Рїшення вказаної системи рївнянь із використанням даних рН-метричного газометричного титрування (рис. 1) дозволило розрахувати компонентний (їонний та молекулярний) склад системи $\text{SO}_2 - \text{TauK} - \text{H}_2\text{O}$ при 298–313 К (наприклад, рис. 5).

Згїдно отриманим даним, Tau у вказаному розчинї при $Q_{\text{SO}_2} : Q_{\text{TauK}} \leq 0,28$ ($\text{pH} \geq 9,25$) їснує переважно у виглядї анїонів $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_2\text{O}^-$ (рис. 5, крива 6).

При збїльшеннї кїлькостї поглинутого SO_2 до $Q_{\text{SO}_2} : Q_{\text{TauK}} < 0,50$ ($\text{pH} \geq 7,50$) зменшується концентрація вказаних анїонів за рахунок може їх гїдролїтичного перетворення в цвїттер-їони (крива 6; реакція 1) та послїдовим зв'язуванням у гїдротаурат-сульфїтнї I та II, таурат-сульфїтний III та гїдротаурат-гїдросульфїтний IV асоціати (реакція 5–11). Поряд з цим ступїнь зв'язування газоподїбного токсиканту у виглядї вказаних асоціатів (крива 5; найвища при $Q_{\text{SO}_2} : Q_{\text{TauK}} \approx 0,20$) змїнюється анти-

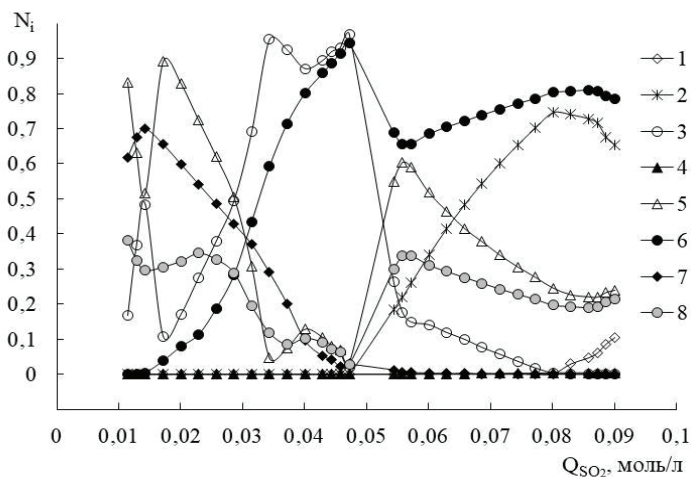


Рис. 5. Діаграми часткового розподілу різних форм взаємодії у системі SO₂ – NH₂CH₂CH₂SO₃K – H₂O залежно від Q_{SO₂} при 298 К. N_i – мольна частка.

Fig. 5. Ratio of various forms of components *N* in the SO₂ – NH₂CH₂CH₂SO₃K – H₂O system as a function of Q_{SO₂} at 298 K.

батно кількості Q_{SO₂} в області 0,20 ≤ Q_{SO₂}:Q_{TauK} ≤ 0,50, подібно ТЕА [23]. В області існування сполуки II (0,17 ≤ Q_{SO₂}:Q_{TauK} ≤ 0,35) відносний вміст сульфат-іонів (крива 3) збільшується із зростанням вказаного співвідношення; в найбільш сприятливих умовах асоціату III (0,17 ≤ Q_{SO₂}:Q_{TauK} ≤ 0,35) мольна частка іонів SO₃²⁻ коливається в межах 87,2 ÷ 97,0%.

Подальше поглинання SO₂ (pH < 7,00) супроводжується зменшенням вмісту NH₃CH₂CH₂SO₂O⁻ за рахунок їх зв'язування в таурат-гідросульфатний асоціат V та пониженням ступеню зв'язування SO₂ (від 66,1 до 22,0%) у вигляді вказаного асоціату. За цих умов відбувається відносно накопичення гідросульфат-іонів (крива 2) до 74,6% при Q_{SO₂} = 0,08 моль/л в результаті реакцій (8) та (10), що відповідає другому мінімуму на диференційній редоксметричній кривій титрування (табл. 3). Відносний вміст SO₂·H₂O (крива 1) S₂O₅²⁻ к (крива 4) не перевищує 0,9%, тому існуванням таурат-піросульфатного асоціату зневажали.

Іон-молекулярний склад системи SO₂ – TauMEA – H₂O складніший, ніж SO₂ – TauK – H₂O, що зумовлено додатковими взаємодіями [20, 28]:



Положення точки кінця другого скачка титрування на рН-метричних кривих відповідає меншому значенню стехіометричного співвідношення $Q_{SO_2}:Q_{\tau_{au}ME_A}$, ніж $Q_{SO_2}:Q_{\tau_{au}K}$ за однієї ж температури (рис. 1). Це свідчить про те, що процес «спрацьовування» хемосорбенту у першому випадку, незважаючи на додаткові взаємодії (23) – (26), настає раніше, ніж у другому. Крім того, друга система характеризується вищими значеннями рН при однаковому вмісті поглинутого SO_2 , що додатково вказує на більшу ефективність його зв'язування [23]. Тому проводити розрахунок іон-молекулярного складу системи $SO_2 - \tau_{au}ME_A - H_2O$ нами вважалось недоцільним.

Іонна сила розчинів $SO_2 - \tau_{au}K - H_2O$ визначається виразом (27):

$$\begin{aligned} \mu = \frac{1}{2} \cdot ([K^+] \cdot (+1)^2 + [NH_2CH_2CH_2SO_2O^-] \cdot (-1)^2 + [NH_3^+CH_2CH_2SO_2O^-] \cdot |2|^2 + \\ + [OH^-] \cdot (-1)^2 + [H_3O^+] \cdot (+1)^2 + C_I \cdot (-2)^2 + C_{II} \cdot (-2)^2 + C_{III} \cdot (-4)^2 + C_{IV} \cdot (-1)^2 + \\ + C_V \cdot (-2)^2). \end{aligned} \quad (27)$$

Внаслідок зазначеної вище багатокомпонентності іон-молекулярного складу розчинів $\tau_{au}K$, концентраційні залежності іонної сили (наприклад, рис. 6) мають складний характер.

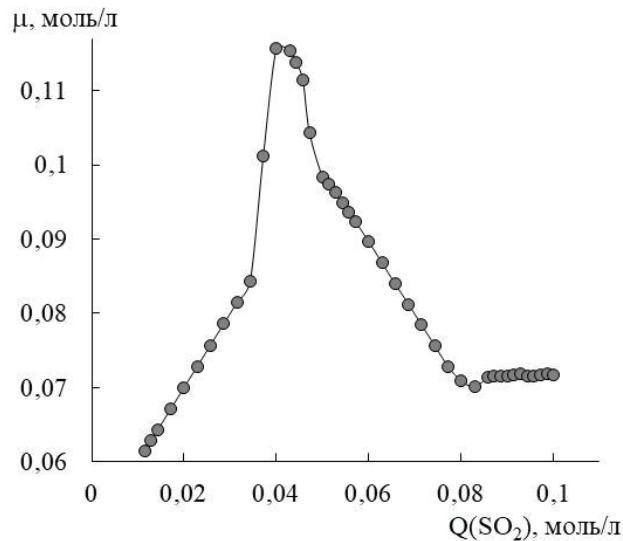


Рис. 7. Концентраційна залежність іонної сили системи $SO_2 - NH_2CH_2CH_2SO_3K - H_2O$ при 293 К. $C_{\tau_{au}K} = 1,0$ М.

Fig. 7. Ionic strength concentration dependence of the $SO_2 - NH_2CH_2CH_2SO_3K - H_2O$ system at 293 K. $C_{\tau_{au}K} = 1.0$ M.

Іонна сила розчинів SO₂ – TauK – H₂O при 298 К (рис. 7) змінюється симбатно з кількістю поглинутого SO₂ при співвідношенні Q_{SO₂}:Q_{TauK} = (0,11 ÷ 0,40):1,00, при якому спостерігається (згідно розрахунковим даним) утворення асоціатів I–III. Максимум на кривій $\mu = f(Q_{SO_2})$ та точка виходу на горизонтальну асимптоту відповідають положенню першого та другого максимумів (відповідно) на рН-метричній кривій титрування (рис. 2, крива 1; табл. 1). В концентраційному діапазоні Q_{SO₂}:Q_{TauK} = (0,40 ÷ 0,80):1,00 іонна сила пов'язана із загальним вмістом SO₂ антибатною залежністю. При цьому відбувається утворення сполук III–V; точка зламу на кривій $\mu = f(Q_{SO_2})$ при Q_{SO₂}:Q_{TauK} = 0,50:1,00 відповідає початку утворення таурат-гідросульфїтного асоціату V.

Розраховані концентраційні константи утворення $\beta_1 - \beta_v$ іонних асоціатів. В умовах експерименту від'ємні десяткові логарифми вказаних констант утворення ($p\beta_i$) < -1,0. Залежності $p\beta_i$ від іонної сили розчинів мають лінійний характер та описуються рівнянням (28), параметри якого наведені в табл. 4.

$$p\beta_i = A_i + B_i \cdot \mu \quad (28)$$

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів у рівнянні (28)

Table 4

Parameters values in the equation (28)

Асоціат	Q _{SO₂} · 10 ² , моль/л	A _i	B _i , л/моль	R ²
298 К				
I	1,14 ÷ 1,43	-128,0	1777	0,9858
II	1,72 ÷ 3,43	-22,73	252,8	0,9801
III	3,72 ÷ 4,72	5,395	-76,20	0,9447
IV	5,00	-6,040	-	-
V	5,15 ÷ 5,58	15,66	62,89	0,9957
303 К				
I	1,14 ÷ 1,43	-21,76	250,2	0,9838
III	1,72 ÷ 3,43	-11,76	102,0	0,9927
	3,72 ÷ 4,72	1,294	-38,42	0,9908
IV	5,00	-5,350	-	-
V	6,58 ÷ 8,58	-5,553	-22,92	0,9956
308 К				
I	1,14 ÷ 1,43	-22,36	265,2	0,9893
III	3,72 ÷ 4,72	3,157	-55,47	0,9956
IV	5,00	-5,930	-	-

Продовження таблиці 4

V	6,58 ÷ 8,58	-11,31	64,75	0,9559
313 К				
I	1,14 ÷ 2,00	-18,65	211,0	0,9977
III	2,29 ÷ 4,00	-5,450	20,88	0,9330
IV	5,00	-6,800	-	-
V	5,15 ÷ 6,01	5,413	-90,06	0,9220
	8,58 ÷ 10,0	-26,92	367,5	0,9607

Згідно [24] для рівняння (28) величина A_i відповідає умовній термодинамічній константі утворення β_i^T . Чіткої температурної залежності концентраційних констант $\beta_I - \beta_V$, а також коефіцієнтів рівняння (28) не спостерігається. Це, очевидно, вказує на різний тип зв'язування в асоціатах однакового складу за різних температур.

Хемосорбенти пролонгованої дії

Ефективність зразків ІВХС, отриманих шляхом просочування ВН водними розчинами МЕА або/і ТауК (ІВХС–МЕА або ІВХС–ТауК і ІВХС–МЕА–ТауК, відповідно), оцінювали за часом захисної дії ($\tau_{з.д.}$, хв.) та ступенем «спрацьовування» хемосорбенту (η ,%). Відомості про склад для просочування ВН та результати порівняльних випробувань зразків ІВХС наведені в табл. 5.

З підвищенням вмісту МЕА або ТауК в складі просочуючих розчинів зростає $\tau_{з.д.}$ відповідних зразків ІВХС–МЕА або ІВХС–ТауК (табл. 5), що описується рівняннями виду:

$$\tau_{з.д.} = 107,2 \cdot C_{МЕА} - 40,94 \cdot C_{МЕА}^2; R^2 = 0,9941 \quad (29)$$

$$\tau_{з.д.} = 340,8 \cdot C_{ТауК} + 345,8 \cdot C_{ТауК}^2; R^2 = 0,9872 \quad (30)$$

Ступінь «спрацьовування» ІВХС–МЕА антибатно змінюється із вмістом хемосорбенту в його складі:

$$\eta = 47,93 - 19,36 \cdot C_{МЕА}; R^2 = 0,9736, \quad (31)$$

в результаті винесення парів МЕА та продуктів взаємодії з потоком газоповітряної суміші (ГПС), що узгоджується із даними [29]. Підвищення вмісту ТауК в складі ІВХС сприяє ступеню їхнього «спрацьовування»:

$$\eta = 41,81 + 43,00 \cdot C_{ТауК}; R^2 = 0,8391. \quad (32)$$

Внесення до складу ІВХС на основі 0,25 моль/л МЕА (ІВХС-0,25МЕА) ТауК призводить до синергічного збільшення кількості сорбованого SO_2 . При цьому підвищується ступінь «спрацьовування» ТауК за реакцією (19), а МЕА «спрацьовує» більш глибоко, ніж у випадку ІВХС-0,25МЕА, аж до утворенні гідросульфідів за реакцією (25).

Таблиця 5

Склади просочуючих розчинів та характеристики ІВХС на їх основі

Table 5

Compositions of impregnating solutions and characteristics of IFCS based on them

№ з/п	Компоненти у розчині для просочування	Вміст компонентів		$\tau_{\text{з.л.}}$, хв.	η , %
		у просочуючому розчині, моль/л	у складі ІВХС, ммоль/г		
1	МЕА	0,25	0,134	25	43,64*
2	МЕА	0,50	0,269	44	38,40*
3	МЕА	0,625	0,336	49	34,21*
4	МЕА	0,83	0,448	62	32,47*
5	МЕА	1,00	0,537	66	28,80*
6	TauK	0,125	0,158	55	49,46**
7	TauK	0,25	0,316	115	51,93**
8	TauK	0,50	0,632	218	53,91**
9	TauK	0,625	0,790	390	77,16**
10	TauK	1,00	1,264	680	84,08**
11	МЕА	0,25	0,134	184	60,66**
	TauK	0,125	0,158		
12	МЕА	0,25	0,134	215	53,16**
	TauK	0,25	0,316		
13	МЕА	0,25	0,134	340	56,05**
	TauK	0,50	0,632		
14	МЕА	0,25	0,134	705	99,62**
	TauK	0,625	0,790		
15	МЕА	0,50	0,269	52	10,36**
	TauK	0,125	0,158		
16	МЕА	0,50	0,269	155	25,69**
	TauK	0,25	0,316		
17	МЕА	0,50	0,269	465	57,73
	TauK	0,50	0,632		
18	МЕА	0,50	0,269	20	2,21**
	TauK	1,00	1,264		

* η – ступінь «спрацьовування» МЕА за реакцією (24)

** η – ступінь «спрацьовування» TauK за реакцією (19)

*** η – ступінь «спрацьовування» TauK за реакцією (19) та МЕА за реакцією (25)

Тобто, у даному випадку зразки ІВХС-0,25МЕА-ТauК є хемосорбентами оксиду сірки (IV) пролонгованої дії, а сам ТauК служить промоутором-модифікатором щодо ІВХС-0,25МЕА, запобігаючи винесенню МЕА із поверхні ІВХС потоком ГПС за рахунок утворення іонних асоціатів (подібно [24]) та сприяючи більш глибокому «спрацюванню» $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$, аналогічно [21]. Для ІВХС-0,50МЕА зафіксовано лише одне молярне співвідношення МЕА:ТauК = 1,0:1,0 у просочуючому розчині, при якому спостерігається синергічна дія хемосорбентів щодо уловлювання SO_2 .

Таким чином, здійснена оцінка йон-молекулярних взаємодій в системах $\text{SO}_2 - \text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3\text{K} - \text{H}_2\text{O}$ та $\text{SO}_2 - \text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3\text{H} - \text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2 - \text{H}_2\text{O}$ при 298–313 К. Розраховано компонентний склад першої системи, розраховано константи утворення іонних асоціатів. Спостерігається синергічне посилення захисних властивостей щодо SO_2 та ступеню «спрацюванню» ІВХС-0,25МЕА за рахунок внесення в його склад добавки-промоутера ТauК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ren S., Hou Y., Wu W., Liu Q., Xiao Y., Chen X. Properties of Ionic Liquids Absorbing SO_2 and the Mechanism of the Absorption. // J. Phys. Chem. B.– 2010. – Vol. 114, N6. – P. 2175–2179. <https://doi.org/10.1021/jp9108859>
2. Jin M., Hou Y., Wu W., Ren S., Tian S., Xiao L., Lei Z. Solubilities and Thermodynamic Properties of SO_2 in Ionic Liquids. // J. Phys. Chem. B.– 2011. – Vol. 115, N20. – P. 6585–6591. <https://doi.org/10.1021/jp1124074>
3. Khoma R.E., Ennan A.A.-A., Bienkovska T.S., Dlubovskii R.M., Vodzinskii S.V., Mykhailova T.V. The impregnated fibrous chemisorbents for colorimetric detection of the sulfur dioxide. // Укр. хім. журн.– 2022. – Т. 87, № 1. – С. 35–48. <https://doi.org/10.33609/2708-129X.88.01.2022.35-48>
4. Еннан А.А.-А., Хома Р.С., Длубовський Р.М., Захаренко Ю.С., Беньковська Т.С., Книш І.М. Моно- та біфункціональні імпрегновані волокнисті хемосорбенти респіраторного призначення. // Вісник ОНУ. Хімія.– 2022. – Т. 27, № 1. – С. 5–30. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1\(81\).248297](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2022.1(81).248297)
5. Патент України на корисну модель UA73387, МПК B01D39/16. Склад для просочування фільтруючого матеріалу. / Еннан А.А.-А., Хома Р.С., Шевцова Н.І., Короєва Л.В., Гельмбольдт В.О.– № u201201951; заявл. 21.02.2012; опубл. 25.09.2012. Бюл. № 18.
6. Патент України на корисну модель UA94660, МПК B01D39/00. Склад для просочування фільтруючого матеріалу. / Еннан А.А.-А., Хома Р.С., Длубовський Р.М., Абрамова Н.Н., Наумчак В.А.– № u201405985; заявл. 02.06.2014; опубл. 25.11.2014. Бюл. № 22.
7. Патент України на корисну модель UA94661, МПК B01D39/00. Склад для просочування фільтруючого матеріалу. / Еннан А.А.-А., Хома Р.С., Длубовський Р.М., Абрамова Н.Н., Наумчак В.А.– № u201405986; заявл. 02.06.2014; опубл. 25.11.2014. Бюл. № 22.
8. Патент України на корисну модель UA 113022, МПК C09K 21/10, B01D39/00, D06M 11/00 Склад для просочування фільтруючого матеріалу. / Еннан А.А.-А., Хома Р.С., Длубовський Р.М., Абрамова Н.М.– № u201606322; заявл. 10.06.2016; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1.
9. Патент України на корисну модель UA119094, МПК C09K 21/10, B01D39/00, D06M 11/00 Склад для просочування фільтруючого матеріалу. / Еннан А.А., Хома Р.С., Длубовський Р.М., Абрамова Н.М.– № u201703108; заявл. 03.04.17, опубл. 11.09.17. Бюл. № 21.
10. Патент України на корисну модель UA133559, МПК B01D39/00. Склад для просочування фільтруючого матеріалу. / Еннан А.А., Хома Р.С., Захаренко Ю.С., Абрамова Н.М.– № u201811395; заявл. 19.11.2018; опубл. 10.04.2019. Бюл. № 7.
11. Патент України на корисну модель UA144039, МПК B01D39/00. Склад для просочування фільтруючого матеріалу. / Еннан А.А.-А., Хома Р.С., Длубовський Р.М., Абрамова Н.М.– № u202002248; заявл. 06.04.2020; опубл. 25.08.2020. Бюл. № 16.
12. Патент України на корисну модель UA 149123, МПК B01D39/00, A61D9/00. Спосіб отримання хемосорбційного матеріалу. / Еннан А.А.-А., Хома Р.С., Захаренко Ю.С., Абрамова Н.М., Беньковська Т.С.– № u202102500; заявл. 12.05.2021; опубл. 20.10.2021. Бюл. № 42.

13. Deng R., Jia L., Song Q., Su S., Tian Z. Reversible absorption of SO₂ by amino acid aqueous solutions. // J. Hazard. Mater.– 2012. – Vol. 229–230. – P. 398–403. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.020>
14. Deng R., Jia L. Reversible removal of SO₂ at low temperature by l- α -alanine supported on γ -Al₂O₃ // Fuel.– 2012. – Vol. 93. – P. 385–390. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.024>
15. Kim K., Park H.S., Lim H., Kang J.H., Park J., Song H. Sulfur dioxide absorption characteristics of aqueous amino acid solutions. // J. Ind. Eng. Chem.– 2022. – Vol. 105. – P. 491–501. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.10.011>
16. Kim K., Lim H., Park H.S., Kang J.H., Park J., Song H. Reversible sulfur dioxide capture by amino acids containing a single amino group at low sulfur dioxide concentrations. // Env. Sci. Pollut. Res.– 2023. – Vol. 30. – P. 52013–52025. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25982-x>
17. Tully P.S. Sulfonic acids // Kirk-Othmer Encyclopedia Chem. Technol. Wiley, 2000.– 22 p. <https://doi.org/10.1002/0471238961.1921120620211212.a01>
18. China Taurine. URL: www.chinataurine.net/
19. Хома Р.Е., Шестака А.А., Сохраненко Г.П., Гавриленко М.И., Гельмбольдт В.О. Комплексообразование оксида серы (IV) с гексаметилентетрамином и гексаметилендиамином в воде. // Журн. прикл. химии.– 2011. – Т. 84, № 1. – С. 18–24. <https://doi.org/10.1134/S1070427211010034>
20. Хома Р.Е., Шестака А.А., Гельмбольдт В.О. О взаимодействии оксида серы (IV) с водными растворами этаноламинов. // Журн. прикл. химии.– 2012. – Т. 85, № 11. – С. 1656–1665. <https://doi.org/10.1134/S1070427212110067>
21. Эннан А.А., Хома Р.Е., Длубовский Р.М., Захаренко Ю.С., Абрамова Н.Н., Михайлова Т.В., Барбалат Д.О. Влияние модифицирующих добавок на хемосорбцию оксида серы(IV) волокнистым материалом, импрегнированным полиэтиленполиамином. // Вісник ОНУ. Хімія.– 2020. – Т. 25, № 4. – С. 56–73. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2020.4\(76\).216927](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2020.4(76).216927)
22. Хома Р.Е. Состав и относительная устойчивость продуктов взаимодействия оксида серы (IV) с водными растворами морфолина и N-алкилированных производных моноэтаноламина. // Питання хімії та хімічн. технолог.– 2015.– № 5. – С. 42–46.
23. Хома Р.Е., Длубовский Р.М., Гельмбольдт В.О. Хемосорбция диоксида серы водными растворами этаноламинов в статических условиях. // Журн. общей химии.– 2016. – Т. 86, № 8. – С. 1271–1279. <https://doi.org/10.1134/S1070363216080065>
24. Khoma R.E., Ennan A.A., Dlubovskii R.M., Ishkov Yu.V., Bienkovska T.S., Rakhitskaya E.M. Equilibrium Processes in AlkNHCH₂SO₃H–NH₂CH₂CH₂OH–H₂O Solutions // Russ. J. Gen. Chem.– 2021. – Vol. 91, N4. – P. 583–592. <https://doi.org/10.1134/s1070363221040010>
25. Худякова Т.А., Крешков А.П. Кондуктометрический метод анализа. М.: Высшая школа, 1975.– 207 с.
26. Танганов Б.Б. Взаимодействия в растворах электролитов: моделирование сольватационных процессов, равновесий в растворах полиэлектролитов и математическое прогнозирование свойств химических систем. М.: Академия естествознания, 2009. – С. 141.
27. Хома Р.Е., Эннан А.А.-А., Длубовський Р.М., Беньковська Т.І. Буферні системи на основі таурину. // Вісник ОНУ. Хімія.– 2021. – Т. 26, № 1. – С. 48–64. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2021.1\(77\).226146](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2021.1(77).226146)
28. Хома Р.Е., Шестака А.А., Гельмбольдт В.О. Взаимодействие оксида серы (VI) с водными растворами моноэтаноламина. // Вісник ОНУ. Хімія.– 2010. – Т. 15, № 12. – С. 34–44.
29. Эннан А.А.-А., Хома Р.Е. Импрегнированные волокнистые хемосорбенты кислых газов респираторного назначения. // Вісник ОНУ. Хімія.– 2017. – Т. 22, № 4. – С. 53–68. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2017.4\(64\).115924](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2017.4(64).115924)

Стаття надійшла до редакції 03.09.2023

R. E. Khoma^{1,2*}, T. S. Bienkovska^{1,2}, V. O. Gelmboldt³

D. G. Klimov⁴, M. G. Horlichenko⁵

¹Physico-Chemical Institute of Environment and Human Protection of MES of Ukraine and NAS of Ukraine, 3 Preobrazhenska St, Odesa, 65082, Ukraine

²Odesa I. I. Mechnikov National University, 2 Dvorianska St, Odesa, 65082, Ukraine

³Odesa National Medical University, 2 Valikhovskiy Lane, Odesa, 65082, Ukraine

⁴Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Av, Dnipro, 49005, Ukraine

⁵Odesa Military Academy, 10 Fontanska Rd, Odesa, 65009, Ukraine

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

COMPOSITION AND THE RELATIVE STABILITY OF SULFUR DIOXIDE INTERACTION PRODUCTS WITH POTASSIUM AND MONOETHANOLAMMONIUM TAURATES AQUEOUS SOLUTIONS. PROLONGED-ACTION CHEMOSORBENT

Much research attention has been paid to amino acids as an alternative to amino alcohols for capture of sulfur dioxide. Taurine (Tau) occupies a special place among amino acids. This study was stimulated by the limited literature data on the nature of the interaction of SO₂ with Tau salts aqueous solutions, the composition and relative stability of the corresponding reaction products.

Chrono-pH-, chrono-redox- and chrono-conductometric studies of SO₂ chemisorption with potassium taurate (TauK) and monoethanolammonium (TauMEA) aqueous 0.1 M solutions were carried out in the temperature range 293–313 K to study these processes.

The maxima on the differential pH-metric titration curves positions coincide with the positions of the jumps on the integral and maxima on the redox-metric titration differential curves, as well as with breaks on the conductometric curves position. Δκ negative values indicate the formation of weakly dissociated particles or less mobile ions in the solutions under study that is confirmed by the data of mathematical calculations.

Using a mathematical model that takes into account the law of mass action, material balance and electrical neutrality principle, SO₂ – TauK – H₂O solutions ion-molecular composition and ionic strength were calculated. With an increase in the chemisorption SO₂ amount, the taurate anions concentration decreases due to the hydrolytic transformation into zwitter ions NH₃CH₂CH₂SO₂O⁻ and the sequential transformation of hydrotaurate-sulfite (4:1 and 2:1; I and II), taurate-sulfite (2:1; III), hydrotaurate- hydrosulfite (1:1; V) associates. The concentration and thermodynamic constants for the formation ionic associates I–V were calculated.

TauK input into impregnated fibrous chemisorbents (IFCS) composition obtained by impregnating viscose fibers with monoethanolamine aqueous 0.25 M solutions (IFCS-0.25MEA) leads to a synergistic increase in quantity of adsorbed SO₂. IFCS-0.25MEA-TauK are long-acting sulfur dioxide chemisorbents, and TauK itself serves as a promoter-modifier towards IFCS-0.25MEA preventing the MEA removal from IFCS surface by the GPS flow due to the ionic associates formation and promoting deeper HOCH₂CH₂NH₂ «response».

Keywords: sulfur dioxide, potassium taurate, monoethanolamine, ion-molecular equilibrium, impregnated fibrous chemisorbents.

REFERENCES

1. Ren S., Hou Y., Wu W., Liu Q., Xiao Y., Chen X. *Properties of Ionic Liquids Absorbing SO₂ and the Mechanism of the Absorption*. J. Phys. Chem. B, 2010, vol. 114, no 6, pp. 2175–2179. <https://doi.org/10.1021/jp9108859>
2. Jin M., Hou Y., Wu W., Ren S., Tian S., Xiao L., Lei Z. *Solubilities and Thermodynamic Properties of SO₂ in Ionic Liquids*. J. Phys. Chem. B, 2011, vol. 115, no 20, pp. 6585–6591. <https://doi.org/10.1021/jp1124074>
3. Khoma R.E., Ennan A.A.-A., Bienkovska T.S., Dlubovskii R.M., Vodzinskii S.V., Mykhailova T.V. *The impregnated fibrous chemisorbents for colorimetric detection of the sulfur dioxide*. Ukr. Chem. J., 2022, vol. 87, no 1, pp. 35-48. <https://doi.org/10.33609/2708-129X.88.01.2022.35-48>
4. Ennan A. A.-A., Khoma R.E., Dlubovskii R.M., Zakharenko Yu.S., Benkovska T.S., Knysh I.M. *Mono- and bifunctional impregnated fiber chemisorbents for respiratory purpose*. Visn. Odes. nac. univ., Him., 2022, vol. 27, no 1, pp. 6-36. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2021.4\(80\).248297](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2021.4(80).248297) (in Ukrainian)
5. Ennan A.A.-A., Khoma R.E., Shevtsova N.I., Koroieva L.V., Gelmboldt V.O. *Composition for Impregnation of Filter Material*. Patent UA, no 73387, publ. 25.09.2012. (in Ukrainian)
6. Ennan A.A.-A., Dlubovskiy R.M., Khoma R.E., Abramova N.N., Naumchak V.A. *Composition for Impregnating Filter Materials*. Patent UA, no 94660, publ. 25.11.2014 (in Ukrainian)
7. Ennan A.A.-A., Dlubovskiy R.M., Khoma R.E., Abramova N.N., Naumchak V.A. *Composition for Impregnating of Filter Materials*. Patent UA, no 94661, publ. 25.11.2014. (in Ukrainian)
8. Ennan A.A.-A., Khoma R.E., Dlubovskiy R.M., Abramova N.N. *Composition for Impregnating Filter Materials*. Patent UA, no 113022, publ. 10.01.2017 (in Ukrainian)
9. Ennan A.A.-A., Khoma R.E., Dlubovskiy R.M., Abramova N.N. *Composition for Impregnating Filter Materials*. Patent UA, no 119094, publ. 11.09.2017. (in Ukrainian)
10. Ennan A.A.-A., Khoma R.E., Zakharenko Yu.S., Abramova N.N. *Composition for Impregnation of Filter Material*. Patent UA, no133559, publ. 10.04.2019. (in Ukrainian)
11. Ennan A.A.-A., Dlubovskiy R.M., Khoma R.E., Abramova N.N., Naumchak V.A. *Composition for Impregnating of Filter Materials*. Patent UA, no 144039, publ. 25.08.2020. (in Ukrainian)
12. Ennan A.A.-A., Khoma R.E., Zakharenko Yu.S., Bienkovskaya T.S., Abramova N.N. *Chemisorption material obtaining method*. Patent UA, no 149123, publ. 12.05.2021. (in Ukrainian)
13. Deng R., Jia L., Song Q., Su S., Tian Z. *Reversible absorption of SO₂ by amino acid aqueous solutions*. J. Hazard. Mater., 2012, vol. 229-230, pp. 398-403. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.020>
14. Deng R., Jia L. *Reversible removal of SO₂ at low temperature by l- α -alanine supported on γ -Al₂O₃*, Fuel, 2012, vol. 93, pp. 385-390. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.024>
15. Kim K., Park H.S., Lim H., Kang J.H., Park J., Song H. *Sulfur dioxide absorption characteristics of aqueous amino acid solutions*. J. Ind. Eng. Chem., 2022, vol. 105, pp. 491-501. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.10.011>
16. Kim K., Lim H., Park H.S., Kang J.H., Park J., Song H. *Reversible sulfur dioxide capture by amino acids containing a single amino group at low sulfur dioxide concentrations*. Env. Sci. Pollut. Res., 2023, vol. 30, pp. 52013–52025. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25982-x>
17. Tully P.S. *Sulfonic acids*. Kirk-Othmer Encyclopedia Chem. Technol. Wiley, 2000, 22 p. <https://doi.org/10.1002/0471238961.1921120620211212.a01>. China Taurine. URL: www.chinataurine.net
18. Khoma R.E., Shestaka A.A., Gavrilenko M.I., Sokhranenko G.P., Gelmboldt V.O. *Complexing of sulfur(IV) oxide with hexamethylenetetramine and hexamethylenediamine in aqueous solutions*. Russ. J. Appl. Chem., 2011, vol. 84, no 1, pp 17-24. <https://doi.org/10.1134/S1070427211010034>
19. Khoma R.E., Shestaka A.A., Gelmboldt V.O. *On interaction of sulfur(IV) oxide with aqueous solutions of ethanolamines*. Russ. J. Appl. Chem., 2012, vol. 85, no 11, pp. 1667-1675. <https://doi.org/10.1134/S1070427212110067>
20. Ennan A.A., Khoma R.E., Dlubovskii R.M., Zakharenko Yu.S., Abramova N.N., Mikhailova T.V., Barbalat D.O. *Effect of modifying additives on chemisorption of sulfur (IV) oxide by fibrous material impregnated with polyethylenepolyamine*. Visn. Odes. nac. univ., Him., 2020, vol. 25, no 4, pp. 56-73. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2020.4\(76\).216927](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2020.4(76).216927) (in Russian)
21. Khoma R.E. *The composition and the relative stability of products of sulfur dioxide interaction with morpholine and N-alkylated monoethanolamines derivatives aqueous solutions*. Issues of Chemistry and Chemical Technology, 2015, no 5, pp. 42-46. (in Russian)

22. Khoma R.E., Dlubovskii R.M., Gelmboldt V.O. *Chemisorption of sulfur dioxide by aqueous solutions of ethanolamines under static conditions*. Russ. J. Gen. Chem., 2016, vol. 86, no 8, pp. 1811-1818. <https://doi.org/10.1134/S1070363216080065>
23. Khoma R.E., Ennan A.A., Dlubovskii R.M., Ishkov Yu.V., Bienkovska T.S., Rakhitskaya E.M. *Equilibrium Processes in $AlkNHCH_2SO_3H-NH_2CH_2CH_2OH-H_2O$ Solutions*. Russ. J. Gen. Chem., 2021, vol. 91, no 4, pp. 583-592. <https://doi.org/10.1134/s1070363221040010>
24. Khudyakova T.A., Kreshkov A.P. *Conductometric Method of Analysis*. Moscow, Vysshaya Shkola, 1975, 207 p. (in Russian)
25. Tanganov B.B. *Interactions in Electrolyte Solutions: Modeling Solvation Processes, Equilibria in Polyelectrolyte Solutions, and Mathematical Prediction of the Properties of Chemical Systems*. Moscow, Akademiya Estestvoznaniya, 2009, p. 141. (in Russian)
26. Ben'kovs'ka T.S., Khoma R.E., Ennan A.A., Chebotaryov O.M., Osadchiy L.T. *Buffer solutions based on taurine*. Visn. Odes. nac. univ., Him., 2021, vol. 26, no 1, pp. 48-64. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2021.1\(77\).226146](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2021.1(77).226146) (in Ukrainian)
27. Khoma R.E., Shestaka A.A., Gelmboldt V.O. *Sulphur dioxide interaction with monoethanolamine aqueous solutions*. Visn. Odes. nac. univ., Him., 2010, vol. 15, no 12, pp. 34-44. (in Russian)
28. Ennan A.A., Khoma R.E. *Impregnated fibrous chemisorbents of acid gases for respiratory purpose*. Visn. Odes. nac. univ., Him., 2017, vol. 22, no 4, pp. 53-68. [https://doi.org/10.18524/2304-0947.2017.4\(64\).115924](https://doi.org/10.18524/2304-0947.2017.4(64).115924) (in Ukrainian)