

Аналіз розсолів на вміст основної речовини та домішок солей магнію і кальцію методом сонолюмінесценції

О.І. Юрченко, Т.В. Черножук, О.М. Бакланов

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, 61022, Харків, Україна
yurchenko@karazin.ua

Анотація

Досліджено використання методу сонолюмінесценції для аналізу розсолів на вміст основної речовини – натрію хлориду і домішок солей магнію та кальцію. При визначенні вмісту натрію хлориду в розсолах найменше відносне стандартне відхилення результатів аналізу ($S_r = 0,010–0,013$) було отримано при використанні надвисокочастотного ультразвуку частотою 22,0–23,0 МГц, інтенсивністю 20,0 Вт/см². При визначенні вмісту солей магнію та кальцію оптимальним було використання для ініціювання сонолюмінесценції одночасної дії ультразвуку надвисокої частоти 20,0–22,0 МГц, інтенсивністю 20,0 Вт/см² та ультразвуку низької частоти 19,0–22,0 кГц, інтенсивністю 1,30–1,50 Вт/см², що дало змогу підвищити чутливість визначення магнію та кальцію в розсолах із 3,0–5,0 г/л при ініціюванні сонолюмінесценції ультразвуком низької частоти до 0,01 г/л при ініціюванні сонолюмінесценції одночасною дією ультразвуком надвисокої та ультразвуком низької частот.

Розроблено методики визначення вмісту основної речовини та домішок солей магнію і кальцію в розсолах. Правильність методик перевірено аналізом одних і тих же проб альтернативними методами.

Ключові слова: розсоли; ультразвук; метод сонолюмінесценції; основна речовина; домішки солей магнію та кальцію; методика аналізу.

Отримано: 15.12.2023

Відредаговано: 25.12.2023

Схвалено до друку: 28.12.2023

Вступ

Розсоли є сировиною для отримання таких важливих продуктів у вакуум-випарних апаратах, як кухонна сіль сорту “Екстра”, хлорид натрію фармакопейної чистоти та спеціальні види натрію хлориду для акустичних і оптичних монокристалів [1–3]. У зв’язку з аперіодичним характером зміни складу розсолу в свердловині для забезпечення нормальних теплофізичних характеристик роботи вакуум-випарних апаратів необхідна постійна інформація про вміст у розсолі основної речовини, а також домішок солей магнію та кальцію. При цьому відносне стандартне відхилення (S_r) результатів аналізу вмісту основної речовини – натрію хлориду в розсолах не повинно бути більше ніж 0,030, а вмісту солей магнію та кальцію – 0,050. Крім того, чутливість визначення вмісту солей MgCl₂ та CaCl₂ повинна бути не менше 0,01 г/л [1–6].

Метод сонолюмінесценції є єдиним методом хімічного аналізу, придатним для експресного визначення вмісту NaCl у розсолах прямо в свердловині [7–12].

При використанні для ініціювання сонолюмінесценції низькочастотного ультразвуку (18,0–100,0 кГц) забезпечуються результати з S_r 0,063–0,074, а ультразвуку високої частоти (1,0–3,0 МГц) – 0,032–0,043 [12].

Для контролю за вмістом домішок розсолів – солей MgCl₂ та CaCl₂ найбільш ефективним методом вважається полум’яна атомно-абсорбційна спектроскопія [1]. Однак використання полум’яної атомно-абсорбційної спектроскопії для визначення вмісту MgCl₂ та CaCl₂ прямо в свердловині на сьогодні є технічно неможливим. Достатньо технічно апробованим методом визначення вмісту MgCl₂ та CaCl₂ в розсолах прямо у свердловині вважається метод сонолюмінесценції [1, 12]. Однак, внаслідок низької чутливості цього методу при визначенні вмісту MgCl₂ та CaCl₂ в розсолах (3,0–5,0 г/л) при ініціалізації сонолюмінесценції ультразвуком низької частоти, він не може бути використаний у соляній промисловості [1].

У роботі [9] було використано метод сонолюмінесценції для визначення вмісту NaCl у розсолах. У роботі [10] для ініціювання соно-

люмінесценції використано ультразвук (УЗ) високої частоти (1,0–5,0 МГц), S_r результатів визначення вмісту NaCl у розсолах був $\geq 0,050$.

Метод сонолюмінесценції було також використано для визначення в розсолах вмісту домішок $MgCl_2$ та $CaCl_2$ [12]. Для ініціювання сонолюмінесценції було використано одночасну дію УЗ високої частоти (2,0–5,0 МГц) та низької частоти (18,0–90,0 кГц). Встановлено, що використання для ініціювання сонолюмінесценції одночасної дії УЗ двох різних частот призводить до збільшення кількості та сумарного об'єму кавітаційних пухирців, що в свою чергу сприяє підвищенню інтенсивності соноспалахів і, як результат, – підвищенню чутливості аналізу методом сонолюмінесценції. Чутливість аналізу методу сонолюмінесценції збільшується при збільшенні різниці в частотах двочастотного УЗ, що використовуються для ініціювання сонолюмінесценції.

Роботу присвячено вивченню ініціювання сонолюмінесценції в розсолах УЗ надвисокої частоти, а також одночасної дії УЗ надвисокої та низької частот із наступним їх використанням у методі сонолюмінесценції для аналізу розсолів на вміст NaCl та солей $MgCl_2$ і $CaCl_2$.

Апаратура та методика експерименту

Використовували сонолюмінесцентний спектрометр на базі атомно-абсорбційного спектрометра AAS-30 (Німеччина). Відбір проб і вимірювання вмісту NaCl, а також домішок (солей $MgCl_2$ та $CaCl_2$) проводили в сонолюмінесцентній камері, описаній у роботі [6].

Методика експерименту: 1000 мл відібраного розсолу під дією тиску в системі “камера-свердловина” (2,00–2,20 атм.) подавали в сонолюмінесцентну камеру 1,20 л. Далі протягом 5,0 хв розчин насичували аргоном. Потім охолоджували розсіл до необхідної температури, вводили CsCl

до 30,0 г/л, згідно з рекомендацією роботи [10]. Діяли на систему УЗ обраних параметрів. Налаштовували сонолюмінесцентний спектрометр на аналітичні лінії Na, Ca та Mg [10]. Визначали вміст NaCl та солей $MgCl_2$ і $CaCl_2$ у розсолі. Для уникнення припинення кавітації і, як результат, зникнення сонолюмінесценції внаслідок дегазації розчину, подавання аргону не припиняли [7, 8]. Весь процес аналізу проходив в автоматизованому режимі.

Результати та їх обговорення

Для ініціювання сонолюмінесценції використовували частоти надвисокочастотного УЗ 10,0–25,0 МГц, які значно впливали на величину інтенсивності сонолюмінесценції NaCl у всіх досліджених розсолах (табл. 1).

Спочатку інтенсивність сонолюмінесценції NaCl у діапазоні частот ініціюючого ультразвуку 10,0–15,0 МГц зменшувалася, потім при частотах УЗ (18,0–22,0 МГц) збільшувалася, і у діапазоні УЗ 23,0–25,0 МГц знову підвищувалася. Інтенсивність сонолюмінесценції NaCl розсолів різних родовищ була трохи іншою, ніж у випадку досліджуваного штучно приготовленого розсолу (табл. 1). Імовірно, це пов'язано як із різною концентрацією NaCl ($380,0 \pm 40,0$ г/л), так і з наявністю в природних розсолах розчинних органічних сполук, що здатні впливати на величину інтенсивності сонолюмінесценції NaCl [2–4].

Інтенсивність сонолюмінесценції NaCl збільшувалася при підвищенні інтенсивності УЗ до 20,0 Вт/см². Така величина максимальної інтенсивності УЗ (20,0 Вт/см²) обумовлена сучасними технічними можливостями п'єзоелектричних УЗ випромінювачів [9] (табл. 2).

Таким чином, оптимальними параметрами УЗ є частота 22,0–23,0 МГц та інтенсивність УЗ 20,0 Вт/см² (табл. 1, 2).

Таблиця 1

Вплив частоти УЗ на інтенсивність сонолюмінесценції NaCl

Вид розсолу	Інтенсивність сонолюмінесценції NaCl (від. од.) при частоті УЗ					
	10,0 МГц	15,0 МГц	20,0 МГц	22,0 МГц	23,0 МГц	24 МГц
Розсіл Слов'янського родовища	9,52	0,48	2,33	4,23	4,22	0,54
Розсіл Дрогобицького родовища	11,04	0,57	2,45	4,75	4,75	0,73
Розсіл, приготовлений штучно, 400,0 г/л	9,55	0,49	2,36	4,21	4,22	0,62
Розсіл, приготовлений штучно, 600,0 г/л	14,26	0,71	3,48	6,37	6,35	0,84

У цій таблиці та у наступних наведено середні результати 6 дослідів. Інтенсивність УЗ – 20,0 Вт/см². Температура розчину під час дослідів становила $20,0 \pm 0,5$ °C.

Вплив інтенсивності УЗ на інтенсивність сонолюмінесценції NaCl

Вид розсолу	Інтенсивність сонолюмінесценції NaCl (від. од.) при інтенсивності УЗ			
	17,0 Вт/см ²	18,0 Вт/см ²	19,0 Вт/см ²	20,0 Вт/см ²
Розсіл Слов'янського родовища	2,55	3,07	4,06	4,23
Розсіл Дрогобицького родовища	2,73	3,21	4,23	4,75
Розсіл, приготовлений штучно, 400,0 г/л	2,52	3,04	4,06	4,21
Розсіл, приготовлений штучно, 600,0 г/л	5,50	4,62	6,08	6,37

Температура розчину під час дослідів становила 20,0±0,5 °С. Частота УЗ – 22 МГц.

Розроблено методику визначення вмісту NaCl у розсолах. Правильність методики підтверджено аналізом одних і тих же проб альтернативними методами. Як альтернативні методи використовували гравіметрію та метод сонолюмінесценції з УЗ низької частоти, а також з УЗ високої частоти (табл. 3). Крім того, як додатковий метод контролю правильності результатів аналізу використано метод “введено-знайдено” (табл. 3). З результатів табл. 3 видно, що метод сонолюмінесценції з УЗ надвисокої частоти забезпечує отримання результатів аналізу розсолів із меншою величиною S_r , ніж методи сонолюмінесценції з УЗ низької та високої частот. Найменшу величину S_r результатів аналізу має гравіметричний метод, але він значно поступається сонолюмінесцентному методу в ек-

спресності та у можливості щодо автоматизації та проведення аналізу безпосередньо в свердловині.

При використанні для ініціювання сонолюмінесценції одночасної дії УЗ надвисокої, а також УЗ низької частот чутливість визначення вмісту солей MgCl₂ та CaCl₂ у розсолах знизилася у 5,0 разів у порівнянні з використанням для ініціювання сонолюмінесценції УЗ високої та УЗ низької частот. При цьому чутливість визначення вмісту солей MgCl₂ та CaCl₂ у розсолах становила 0,10 г/л (табл. 4) [1]. При цьому оптимальними параметрами УЗ були: частота надвисокочастотного УЗ 20,0–22,0 МГц при інтенсивності 20,0 Вт/см², а також частота низькочастотного УЗ 19,0–22,0 кГц з інтенсивністю 1,3–1,50 Вт/см² (табл. 4–7).

Таблиця 3

Результати визначення вмісту натрію хлориду в розсолах (n = 6; P = 0,95)

Проба	Введено, г/л	Знайдено, г/л							
		Сонолюмінесцентним методом						Гравіметричним методом [1]	
		УЗ 22,0 кГц		УЗ 12,0 МГц		УЗ 22,0 МГц		\bar{C}	S_r
		\bar{C}	S_r	\bar{C}	S_r	\bar{C}	S_r		
Розсіл Слов'янського родовища	-	330	0,034	335	0,019	335	0,010	323	0,008
	50,0	374	0,034	374	0,018	380	0,011	369	0,007
Розсіл Дрогобицького родовища	-	363	0,053	369	0,030	371	0,013	365	0,011
	50,0	406	0,054	415	0,034	418	0,013	409	0,010
Розсіл, приготовлений штучно, 400,0 г/л	-	395	0,028	393	0,019	399	0,010	395	0,011
	50,0	437	0,031	444	0,018	449	0,011	443	0,010
Розсіл, приготовлений штучно, 600,0 г/л	-	591	0,043	593	0,043	595	0,013	589	0,011
	100,0	679	0,045	684	0,050	686	0,013	640	0,011

Таблиця 4

Вплив частоти надвисокочастотного УЗ та величини концентрації на інтенсивність сонолюмінесценції водних розчинів солей $MgCl_2$ та $CaCl_2$

Компонент, що визначається, та концентрація розчину (г/л)		Інтенсивність сонолюмінесценції (від. од.) при частоті УЗ				
		18,0 МГц	19,0 МГц	20,0 МГц	22,0 МГц	23,0 МГц
$CaCl_2$	0,10	-	0,04	0,24	0,21	0,09
	0,20	-	0,08	0,48	0,47	0,15
	0,40	-	0,15	0,95	0,92	0,28
	1,00	0,21	0,33	2,00	2,00	0,70
	2,00	0,40	0,65	3,92	3,90	1,30
$MgCl_2$	0,10	-	-	0,17	0,16	-
	0,20	-	0,07	0,34	0,32	0,11
	0,40	-	0,14	0,67	0,65	0,22
	1,00	0,15	0,34	1,49	1,48	0,42
	2,00	0,29	0,65	2,92	2,90	0,71

У цій таблиці та у наступних були такі умови: наведено середні результати 6 дослідів; температура розчину під час дослідів становила $20,0 \pm 0,5$ °C; для дослідів було використано розсіл, приготовлений штучно з концентрацією 400,0 г/л. Частота УЗ низької частоти – 22,0 кГц. Інтенсивність УЗ низької частоти – 1,50 Вт/см². Інтенсивність УЗ надвисокої частоти – 20,0 Вт/см².

Таблиця 5

Вплив частоти низькочастотного УЗ на інтенсивність сонолюмінесценції водних розчинів солей $MgCl_2$ та $CaCl_2$

Компонент, що визначається	Інтенсивність сонолюмінесценції (від. од.) при частоті УЗ				
	18,0 кГц	19,0 кГц	20,0 кГц	22,0 кГц	23,0 кГц
$CaCl_2$	0,73	0,92	0,92	0,91	0,25
$MgCl_2$	0,41	0,63	0,65	0,64	0,21

Частота надвисокочастотного УЗ – 20,0 МГц. Інтенсивність низькочастотного УЗ – 1,50 Вт/см². Інтенсивність надвисокочастотного УЗ – 20,0 Вт/см². Концентрація $MgCl_2$ та $CaCl_2$ – 0,40 г/л.

Таблиця 6

Вплив інтенсивності низькочастотного УЗ на інтенсивність сонолюмінесценції водних розчинів солей $MgCl_2$ та $CaCl_2$

Компонент, що визначається	Інтенсивність сонолюмінесценції (від. од.) при інтенсивності УЗ				
	1,20 Вт/см ²	1,30 Вт/см ²	1,40 Вт/см ²	1,50 Вт/см ²	1,60 Вт/см ²
$CaCl_2$	0,14	0,91	0,90	0,91	0,20
$MgCl_2$	0,11	0,61	0,63	0,64	0,15

Частота надвисокочастотного УЗ – 20,0 МГц. Частота низькочастотного УЗ – 22,0 кГц. Інтенсивність надвисокочастотного УЗ – 20,0 Вт/см². Концентрація $MgCl_2$ та $CaCl_2$ – 0,40 г/л.

Вплив інтенсивності надвисокочастотного УЗ на інтенсивність сонолюмінесценції водних розчинів солей $MgCl_2$ та $CaCl_2$

Компонент, що визначається	Інтенсивність сонолюмінесценції (від. од.) при інтенсивності УЗ				
	16 Вт/см ²	17 Вт/см ²	18 Вт/см ²	19 Вт/см ²	20 Вт/см ²
$CaCl_2$	0,72	0,75	0,81	0,85	0,91
$MgCl_2$	0,37	0,41	0,49	0,53	0,64

Частота надвисокочастотного УЗ – 20,0 МГц. Частота низькочастотного УЗ – 22,0 кГц. Інтенсивність низькочастотного УЗ – 1,50 Вт/см². Концентрація $MgCl_2$ та $CaCl_2$ – 0,40 г/л.

Таблиця 8

Результати визначення вмісту солей $MgCl_2$ та $CaCl_2$ у розсолах

Компонент, що визначається	Введено, г/л	Знайдено, г/л							
		Сонолюмінесцентним методом						Атомно-абсорбційним методом [1]	
		УЗ 22,0 кГц		УЗ 22,0 кГц + 4,0 МГц		УЗ 22,0 кГц + 22,0 МГц		\bar{C}	S_r
		\bar{C}	S_r	\bar{C}	S_r	\bar{C}	S_r		
Розсіл, приготовлений штучно, 400 г/л NaCl, по 0,40 г/л $CaCl_2$ і $MgCl_2$									
$CaCl_2$	-	-	-	-	-	0,38	0,022	0,40	0,013
	1,00	-	-	1,33	0,059	1,37	0,020	1,40	0,014
$MgCl_2$	-	-	-	-	-	0,40	0,023	0,39	0,015
	1,00	-	-	1,20	0,060	1,39	0,022	1,39	0,015
Розсіл Слов'янського родовища									
$CaCl_2$	-	-	-	0,54	0,060	0,57	0,025	0,57	0,013
	5,00	3,99	0,090	5,32	0,062	5,45	0,023	5,46	0,015
$MgCl_2$	-	-	-	0,93	0,080	0,98	0,025	1,04	0,013
	5,00	4,06	0,102	6,41	0,079	6,02	0,022	5,97	0,015
Розсіл Дрогобицького родовища									
$CaCl_2$	-	-	-	-	-	0,21	0,027	0,22	0,016
	5,00	3,91	0,093	5,11	0,081	5,20	0,025	5,19	0,016
$MgCl_2$	-	-	-	-	-	0,30	0,023	0,31	0,017
	5,00	4,20	0,099	5,14	0,078	5,27	0,022	5,31	0,016

Розроблено методику визначення вмісту солей $MgCl_2$ та $CaCl_2$ в розсолах. Правильність методики підтверджено аналізом одних і тих же проб альтернативними методами.

Як альтернативні методи використовували полум'яну атомно-абсорбційну спектрометрію та метод сонолюмінесценції з УЗ низької частоти, а також з УЗ високої частоти (табл. 8). Крім того, як додатковий метод контролю правильності результатів аналізу використано метод “введено-знайдено” (табл. 8).

Із результатів табл. 8 видно, що метод сонолюмінесценції з ініціацією сонолюмінесценції одночасною дією УЗ надвисокої частоти на УЗ низької частоти забезпечує отримання результатів аналізу розсолів із меншою величиною S_r , ніж методи сонолюмінесценції з УЗ низької та високої частот. Найменшу величину S_r результатів аналізу має метод полум'яної атомно-абсорбційної спектрометрії, але він значно поступається сонолюмінесцентному методу в можливості щодо автоматизації та проведення аналізу безпосередньо в свердловині.

Висновки

Таким чином, нами досліджено використання УЗ надвисокої частоти (10,0–25,0 МГц) для визначення вмісту натрію хлориду в розсолах, а також досліджено одночасну дію УЗ надвисокої (10,0–25,0 МГц) та низької частот (18,0–23,0 кГц). При визначенні вмісту солей магнію та кальцію оптимальним було використання для ініціації сонолюмінесценції одночасної дії ультразвуку надвисокої частоти 20,0–22,0 МГц, інтенсивністю 20,0 Вт/см² та ультразвуку низької частоти 19,0–22,0 кГц, інтенсивністю 1,30–1,50 Вт/см², що дало

зможу підвищити чутливість визначення магнію та кальцію в розсолах із 3,0–5,0 г/л при ініціалізації сонолюмінесценції ультразвуком низької частоти до 0,01 г/л при ініціалізації сонолюмінесценції одночасною дією УЗ надвисокої та УЗ низької частот.

Розроблено методики визначення вмісту основної речовини та домішок солей магнію і кальцію в розсолах. Правильність методик перевірено аналізом одних і тих же проб альтернативними методами, а також методом “введено-знайдено”.

Analysis of brines for the content of the main substance and impurities of magnesium and calcium salts by the sonoluminescence method

O. Yurchenko, T. Chernozhuk, O. Baklanov

V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody sq., 4, 61022, Kharkiv, Ukraine
yurchenko@karazin.ua

Abstract

The use of the sonoluminescence method for the analysis of brines for the content of the main substance – sodium chloride and admixtures of magnesium and calcium salts – was studied. The use of sonoluminescence initiated by the ultra-high frequency ultrasound (10.0–25.0 MHz) to determine the content of the main substance – sodium chloride – in brines, as well as sonoluminescence initiated by the simultaneous action of ultra-high- (10.0–25.0 MHz) and low- (20–100 kHz) frequency ultrasound to determine the content of magnesium and calcium salts was experimentally investigated. When determining the content of sodium chloride in brines, the smallest relative standard deviation of the analysis results ($S_r = 0.010–0.013$) was when using the ultra-high-frequency ultrasound with a frequency of 22.0–23.0 MHz and intensity of 20.0 W/cm². When determining the content of magnesium and calcium salts, for the initiation of sonoluminescence, it was optimal to use the simultaneous action of ultra-high frequency ultrasound (20.0–22.0 MHz) and intensity (20.0 W/cm²), and low-frequency ultrasound (19.0–22.0 kHz) and intensity 1.30–1.50 W/cm², which made it possible to increase the sensitivity of determining magnesium and calcium in brines from 3.0–5.0 g/l when initializing sonoluminescence by the low-frequency ultrasound to 0.01 g/l when initializing sonoluminescence by the simultaneous action of ultra-high- and low-frequency ultrasound.

Methods for determining the content of the main substance and impurities of magnesium and calcium salts in brines have been developed. The correctness of the methods was checked by analysing the same samples using alternative methods. When determining the content of the main substance, the following methods were used as alternative ones: gravimetry and the sonoluminescence method of low-frequency ultrasound, as well as with high-frequency ultrasound. When determining the content of magnesium and calcium salts, flame atomic absorption spectrometry and the sonoluminescence method of low-frequency ultrasound, as well as with the simultaneous action of high- and low-frequency ultrasound, were used as alternative methods.

Keywords: brines; ultrasound; sonoluminescence method; main substance; impurities of magnesium and calcium salts; analysis method.

Список літератури

1. Юрченко О.І., Черножук Т.В., Пантелеймонов А.В., Бакланова Л.В., Бакланов О.М. Аналітична хімія кухонної солі, розсолів та високмінералізованих вод. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2023. 285 с.
2. Ravizky A., Nadav N. Salt production by the evaporation of SWRO brine in Eilat: a success story. *Desalination*, 2007, vol. 205, issues 1–3, pp. 374–379. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.559>
3. Akinaga T., Generalis S.C., Paton C., Igobo O.N., Davies P.A. Brine utilisation for cooling and salt production in wind-driven seawatergreenhouses: Design and modelling. *Desalination*, 2018, vol. 426, pp. 135–154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.025>
4. Vyas G., Labhasetwar P.K., Yadav A., Paital A.R. A compendium of evaporation techniques for salt production from seawater and sub-soil brine. *Chemical Papers*, 2022, vol. 76, pp. 6659–6674. doi: <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02363-1>
5. Bayram I. Removal of Major Impurities (Ca-Mg) of Brine with Chemical Treatment Process in the Salt Sector. *International Scientific and Vocational Studies Journal*, 2018, vol. 2, issue 2, pp. 57–66.
6. Yurchenko O.I., Chernozhuk T.V., Baklanova L.V., Rebrov A.L., Ponomarenko T.V., Rebrova T.P., Cherginets V.L. Analysis of Highly Concentrated Aqueous Solutions of Alkali Metal Chlorides Using Sonoluminescence Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 2022, vol. 76(2), pp. 184–188. doi: [10.1177/00037028211052091](https://doi.org/10.1177/00037028211052091)
7. Yan Liu, G.-Y. Li. Developing a new spectroscopy analytical method – sonoluminescence. *Spectroscopy and spectral analysis*, 2002, vol. 22(6), pp. 1030–1032.
8. Suslick K.S., Flannigan D.J. Inside a Collapsing Bubble: Sonoluminescence and the Conditions During Cavitation. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2008, vol. 59, pp. 659–683. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.59.032607.093739>
9. Yurchenko O., Baklanov A., Chernozhuk T. Chemical applications of ultrasound. On the use of ultrasound in the analyses and technology of brains and sodium chloride solutions. Lambert academic publishing, 2021. 185 p.
10. Yurchenko O.I., Kalinenko O.S., Baklanov A.N. et al. Sonoluminescence Spectroscopy as a Promising New Analytical Method. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2016, vol. 83, issue 1, pp. 105–110. doi: [10.1007/s10812-016-0250-0](https://doi.org/10.1007/s10812-016-0250-0)
11. Yan Liu, Chinece J. Use Sonoluminescence in Medical Detection. *Spectroscopy Lab.*, 2001, vol. 18(1), pp. 75–78.
12. Юрченко О.І., Бакланова Л.В., Черножук Т.В., Бакланов О.М. Сонолюмінесценція в хімічному аналізі: монографія. Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2016. 112 с.

References

1. Yurchenko O.I., Chernozhuk T.V., Panteleimonov A.V., Baklanova L.V., Baklanov O.M. Analytychna khimiia kukhonnoi soli, rozsoliv ta vysokominalizovanykh vod [Analytical chemistry of table salt, brines and highly mineralized waters]. Kharkiv, 2023. 285 p. (in Ukrainian).
2. Ravizky A., Nadav N. Salt production by the evaporation of SWRO brine in Eilat: a success story. *Desalination*, 2007, vol. 205, issues 1–3, pp. 374–379. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.559>
3. Akinaga T., Generalis S.C., Paton C., Igobo O.N., Davies P.A. Brine utilisation for cooling and salt production in wind-driven seawatergreenhouses: Design and modelling. *Desalination*, 2018, vol. 426, pp. 135–154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.025>
4. Vyas G., Labhasetwar P.K., Yadav A., Paital A.R. A compendium of evaporation techniques for salt production from seawater and sub-soil brine. *Chemical Papers*, 2022, vol. 76, pp. 6659–6674. doi: <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02363-1>
5. Bayram I. Removal of Major Impurities (Ca-Mg) of Brine with Chemical Treatment Process in the Salt Sector. *International Scientific and Vocational Studies Journal*, 2018, vol. 2, issue 2, pp. 57–66.
6. Yurchenko O.I., Chernozhuk T.V., Baklanova L.V., Rebrov A.L., Ponomarenko T.V., Rebrova T.P., Cherginets V.L. Analysis of Highly Concentrated Aqueous Solutions of Alkali Metal Chlorides Using Sonoluminescence Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 2022, vol. 76(2), pp. 184–188. doi: [10.1177/00037028211052091](https://doi.org/10.1177/00037028211052091)
7. Yan Liu, G.-Y. Li. Developing a new spectroscopy analytical method – sonoluminescence. *Spectroscopy and spectral analysis*, 2002, vol. 22(6), pp. 1030–1032.
8. Suslick K.S., Flannigan D.J. Inside a Collapsing Bubble: Sonoluminescence and the Conditions During Cavitation. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2008, vol. 59, pp. 659–683. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.59.032607.093739>
9. Yurchenko O., Baklanov A., Chernozhuk T. Chemical applications of ultrasound. On the use of ultrasound in the analyses and technology of brains and sodium chloride solutions. Lambert academic publishing, 2021. 185 p.
10. Yurchenko O.I., Kalinenko O.S., Baklanov A.N. et al. Sonoluminescence Spectroscopy as a Promising New Analytical Method. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2016, vol. 83, issue 1, pp. 105–110. doi: [10.1007/s10812-016-0250-0](https://doi.org/10.1007/s10812-016-0250-0)
11. Yan Liu, Chinece J. Use Sonoluminescence in Medical Detection. *Spectroscopy Lab.*, 2001, vol. 18(1), pp. 75–78.
12. Yurchenko O.I., Baklanova L.V., Chernozhuk T.V., Baklanov O.M. Sonoluminescensiia v khimichnomu analizi: monohrafiia [Sonoluminescence in chemical analysis: monograph]. Kharkiv, 2016. 112 p. (in Ukrainian).