



UDC 543.421:546.76:664.41

ATOMIC-ABSORPTION DETERMINATION OF CHROMIUM IN TABLE SALT USING MATRIX EXTRACTION SEPARATION AND ULTRASOUND ACTION

Oleg I. Yurchenko, Tetiana V. Chernozhuk, Oleksii A. Kravchenko, Alexandr N. Baklanov*

V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., 61022 Kharkiv, Ukraine

Received 2 August 2023; accepted 15 March 2023; available online 25 April 2024

Abstract

The use of ultrasound in the determination of chromium in table salt using the extraction of the macrocomponent was investigated. The method of extractive separation of the base allows determination of the chromium content in table salt without destroying organic substances. Optimal conditions for dissolving the base in hydrogen peroxide (90 %) were experimentally established: temperature – from -20 to -25 °C, ultrasound frequency 18–44 kHz, intensity 0.5 – 0.8 W/cm², action time 20–25 s, respectively. At the same time, the maximum possible solubility of sodium chloride in hydrogen peroxide is achieved – up to 42 g/100 ml. It was established that the simultaneous use of high-frequency ultrasound (1.0–2.0 MHz, 0.25 – 0.50 W/cm²) and low-frequency ultrasound (18–100 kHz, 0.15 – 0.25 W/cm²) increases the solubility of sodium chloride in hydrogen peroxide from 42 to 47 g/100 ml, increase the degree of extraction of the injected part of chromium from 94–95 to 98–99 %. Methods for determining chromium content in common salt using low-frequency ultrasound, as well as simultaneous action of high- and low-frequency ultrasound with improved metrological characteristics of the results of analysis of common salt, have been developed.

Keywords: table salt; chromium; ultrasound; sample preparation; atomic-absorption spectroscopy; metrological characteristics.

АТОМНО-АБСОРБЦІЙНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХРОМУ У КУХОННІЙ СОЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКСТРАЦІЙНОГО ВІДДІЛЕННЯ МАТРИЦІ І ДІЇ УЛЬТРАЗВУКУ

Олег І. Юрченко, Тетяна В. Черножук, Олексій А. Кравченко, Олександр М. Бакланов*

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, пл. Свободи, 4, Харків, 61022, Україна

Анотація

Досліджено використання ультразвуку при визначенні Хрому в кухонній солі з використанням екстракції макрокомпоненту. Метод екстракційного відділення основи дозволяє проводити визначення вмісту Хрому у кухонній солі без руйнування органічних речовин. Експериментально встановлені оптимальні умови розчинення основи в гідроген пероксиді (90 %): температура – від -20 до -25 °C, частота ультразвуку 18–44 кГц, інтенсивність 0.5 – 0.8 Вт/см², час дії – 20–25 с відповідно. В цих умовах досягається максимально можлива розчинність хлориду натрію в гідроген пероксиді – до 42 г/100 мл. Встановлено, що використання одночасної дії ультразвуку високої частоти (1.0–2.0 МГц, 0.25 – 0.50 Вт/см²) і ультразвуку низької частоти (18–100 кГц, 0.15 – 0.25 Вт/см²) дозволяє підвищити розчинність хлориду натрію у пероксиді водню з 42 до 47 г/100 мл, підвищити ступінь вилучення введеної частини Хрому з 94–95 до 98–99 %. Розроблені методики визначення вмісту Хрому в кухонній солі з використанням ультразвуку низької частоти, а також одночасної дії ультразвуку високої та низької частот з поліпшеними метрологічними характеристиками результатів аналізу кухонної солі.

Ключові слова: кухонна сіль; хром; ультразвук; пробопідготовка; атомно-абсорбційна спектроскопія; метрологічні характеристики.

*Corresponding author: e-mail: baklanov_oleksandr@meta.ua

© 2024 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v32i1.285484

Вступ

Пряме визначення хрому у кухонній солі з використанням таких розповсюджених методів аналізу як атомно-абсорбційна спектроскопія, спектрофотометрія та полярографія не представляється можливим через низькі вмісти і значні матричні впливи, що викликає необхідність у використанні попереднього концентрування [1–7]. У зв'язку з цим використовують методи попереднього концентрування, такі як екстракція, сорбція та інші [8–16]. На попереднє концентрування Хрому із розчинів кухонної солі впливають органічні речовини, здебільшого гумінові й фульвокислоти, що зв'язують його у міцні комплексні й металоорганічні сполуки. Їхня присутність призводить до заниження результатів аналізу й вимагає проведення в процесі пробопідготовки стадії руйнування органічних сполук [1; 2; 17–22]. Для руйнування органічних сполук Хрому найбільше поширення отримали методи, засновані на хімічному окиснюванні органічних сполук хрому, а також на використанні дії ультразвуку (УЗ) та мікрохвильового опромінення [1; 2; 19; 23–25].

Однак стадія руйнування органічних сполук Хрому значно ускладнює процес аналізу. Метод екстракційного відділення основи дозволяє проводити визначення вмісту Хрому у кухонній солі без руйнування органічних речовин [1; 19]. У аналізі лише деяких речовин для концентрування Хрому можна застосовувати метод екстракційного відділення основи. До таких речовин відноситься і кухонна сіль. Відомо, що хлорид натрію, який є головною речовиною кухонної солі (> 94 %), розчиняється в гідроген пероксиді за низьких температур (в інтервалі від –5 до –10 °C) [1]. Також слід зазначити, що жодна домішка, яка міститься у хлориді натрію і кухонній солі, у тому числі сполуки хрому, в гідроген пероксиді за даних умов нерозчинна [1].

Мета роботи – розробити методику атомно-абсорбційного визначення хрому у кухонній солі з використанням екстракційного відділення основи.

Експериментальна частина

У роботі використано ультразвуковий (УЗ) диспергатор УЗДН 1М (Україна) з набором магнітострикційних випромінювачів, що дає можливість отримувати ультразвук частотою

18–110 кГц інтенсивністю 0.2–1.0 Вт/см². Також використовували ультразвуковий генератор типу 24-УЗГИ-К-1.2, до якого підключали п'єзоелектричні випромінювачі, що дозволяють створювати в розчинах, що вивчаються, ультразвукові коливання частотою 0.50, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 та 3.0 МГц. Застосовували стандартні п'єзоелектричні випромінювачі типу ЦТС–19, виготовлені з цирконату титану–свинцю із захисним покриттям з фторопласту [19]. Дані п'єзокерамічні випромінювачі були вибрані через механічну міцність і стабільність випромінювання на високих частотах УЗ (до 3.0 МГц) при інтенсивності до 12 Вт/см² [19].

Вміст хрому визначали з використанням атомно-абсорбційного спектрометра ААС-3 (Німеччина). Лампа з порожнистим катодом Narva (Німеччина). Полум'я ацетилен – повітря, відновне, 4 л/хв. Стандартні зразки водних розчинів хрому виробництва Фізико-хімічного інституту ім. А.В. Богатського (м. Одеса). Застосовували хлорид натрію х.ч. для спектрального аналізу, гідроген пероксид 90 %-вий кваліфікації х.ч., дистильовану воду та інші хімічні реактиви кваліфікації не нижче ч.д.а. До того ж вивчали використання для інтенсифікації екстракції хлориду натрію з кухонної солі дію низькочастотного УЗ, а також одночасну дію УЗ високої та низької частот.

Пробопідготовка з використанням низькочастотного ультразвуку. Аналізовані зразки хлориду натрію з відомим вмістом домішок, що знаходяться в скляних тиглях, поміщали в хімічні стакани місткістю 1000 мл, охолоджували до відповідної температури, доливали охолоджений гідроген пероксид і опромінювали УЗ відповідних параметрів. Потім концентрат розчиняли в хлоридній кислоті (1 : 1), кількісно переносили в мірну пробірку і розбавляли кислотою до 10 мл. Концентрат розпорошували в полум'ї пальника спектрометра. Хром визначали полум'яним ААС методом у відновному полум'ї ацетилен-повітря за довжини хвилі 357.90 нм та ширині щілини монохроматора 0.20 мм.

Для підвищення розчинності хлориду натрію у гідроген пероксиді нами використано також і одночасну дію ультразвуку високої та низької частот. Використання УЗ двох частот для розчинення хлориду натрію у гідроген пероксиді обумовлено вищою ефективністю двочастотного УЗ у порівнянні з УЗ однієї

частоти. Це пояснюється особливостями утворення і схлопування кавітаційних пухирців за двочастотної дії УЗ, в результаті чого переважно (більше 90 %) утворюються малі сферичні кавітаційні пухирьки, за умови схлопування саме яких і інтенсифікуються дані процеси [20-23].

Методика проведення експерименту з використанням двочастотного ультразвуку. Наважку розтертого в ступці до пилоподібного стану хлориду натрію (кухонної солі) масою близько 40 г поміщають в попередньо висушений скляний тигель № 4 і зважують з точністю до 0.001 г. Тигель з наважкою поміщають в хімічний стакан, охолоджують до температури $-20 - -25$ °C і впливають на систему одночасно ультразвуком високої та низької частот відповідних параметрів, після чого фільтрують. Потім тигель з наважкою, після того, як гідроген пероксид стече, переносять в іншу склянку ($t = -20 - -25$ °C) і повторюють процес. Фільтруючий тигель поміщають в

порцелянову чашку, дають нагрітися до кімнатної температури, доливають 30 мл нагрітої до 60 °C хлоридної кислоти (1 : 1) і нагрівають чашку з тиглем майже до кипіння. Потім виймають тигель і промивають його двома порціями хлоридної кислоти по 5 мл. Рідину в чашці упарюють до об'єму 4–5 мл, переносять в пробірку з рисками і розбавляють хлоридною кислотою до 10 мл. В отриманому концентраті встановлюють вміст Хрому атомно-абсорбційним методом. Правильність методики перевіряли методом «введено-знайдено».

Результати та їх обговорення

За використання механічного струшувача (150 струшувань за хвилину) розчинність хлориду натрію в гідроген пероксиді зменшується за температури вище -20 °C, а за температури нижче -25 °C кількість розчиненого хлориду натрію практично не змінювалося (табл. 1). Ступінь вилучення хрому не перевищувала 85.4 % (табл. 2).

Table 1

Solubility of sodium chloride in hydrogen peroxide

Таблиця 1

Розчинність хлориду натрію в пероксиді водню		
Розчинність NaCl, г/100 мл розчинника		
Температура, °C	*без дії ультразвуку	**з дією ультразвуку
-10	12.71	15.41
-15	18.93	26.73
-20	33.72	41.92
-25	34.83	42.01
-30	34.82	41.94

У цій таблиці і в наступних представлені усереднені результати шести дослідів. *Використаний механічний струшувач з періодичністю 150 струшувань в хвилину. **Використана дія УЗ частотою 22 кГц, інтенсивністю 0.6 Вт/см² протягом 22 с.

Table 2

Influence of the time of selective dissolution of sodium chloride on the degree of chromium extraction (mechanical stirring)

Таблиця 2

Вплив часу селективного розчинення хлориду натрію на ступінь вилучення Хрому (механічне перемішування)

Час, хв.	Ступінь вилучення Хрому, %
10	72.4
15	79.5
20	85.1
25	85.4
30	85.4

Для аналізу використаний хлорид натрію кваліфікації х.ч. для спектрального аналізу. Введено Хрому 0.06 мг / кг. Використаний

механічний струшувач з періодичністю 150 струшувань за хвилину.

За використання низькочастотного УЗ розчинність хлориду натрію в гідроген

пероксиду у порівнянні з механічним перемішуванням збільшувалася (табл. 1).

Оптимальні параметри впливу низькочастотного УЗ на розчинність хлориду натрію, такі як частота, інтенсивність і час дії, підбирали експериментально, змінюючи кожен з них до встановлення максимально можливого значення аналітичного сигналу.

Для процесу розчинення хлориду натрію в гідроген пероксиді ці параметри склали: 18–44 кГц (рис. 1), 0.5–0.7 Вт/см², 20–25 с відповідно (рис. 2, 3). Максимально можлива розчинність хлориду натрію в пероксиді водню (до 42 г/100 мл) досягалася за температур від –20 до –25 °С (табл. 1).

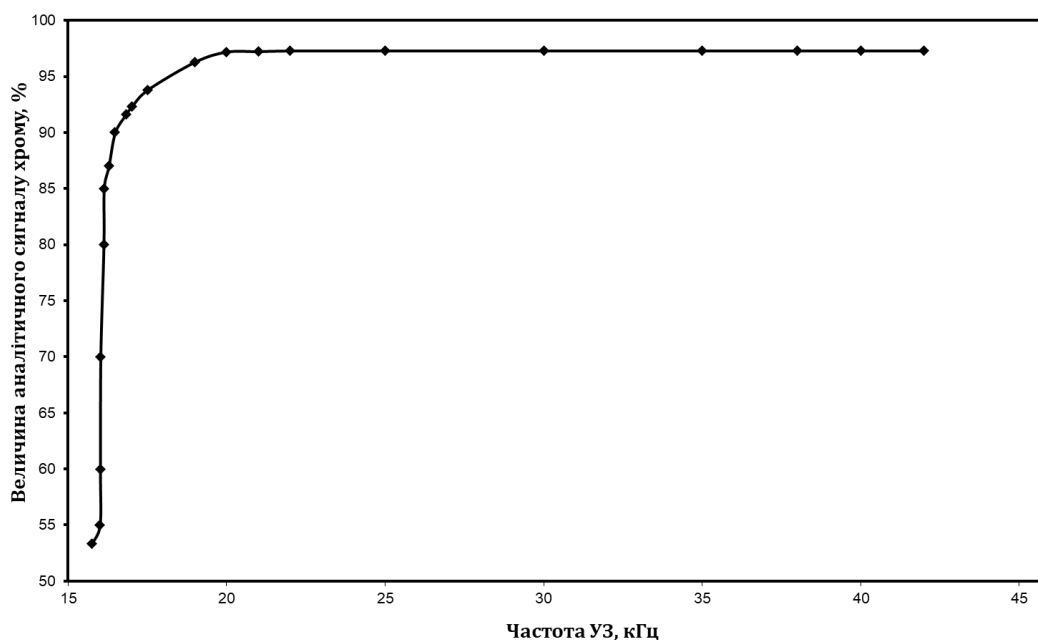


Fig. 1. Influence of ultrasound frequency on the value of the analytical signal of chromium

Рис. 1. Вплив частоти УЗ на величину аналітичного сигналу хрому

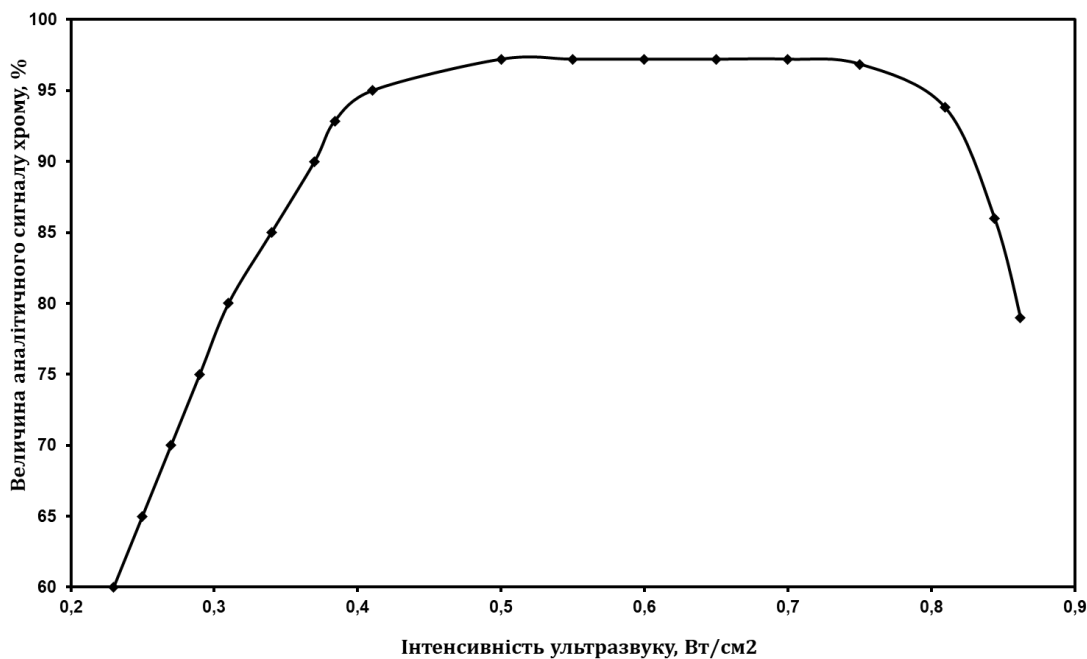


Fig. 2. The influence of ultrasound intensity on the value of chromium analytical signal

Рис. 2. Вплив інтенсивності УЗ на величину аналітичного сигналу хрому

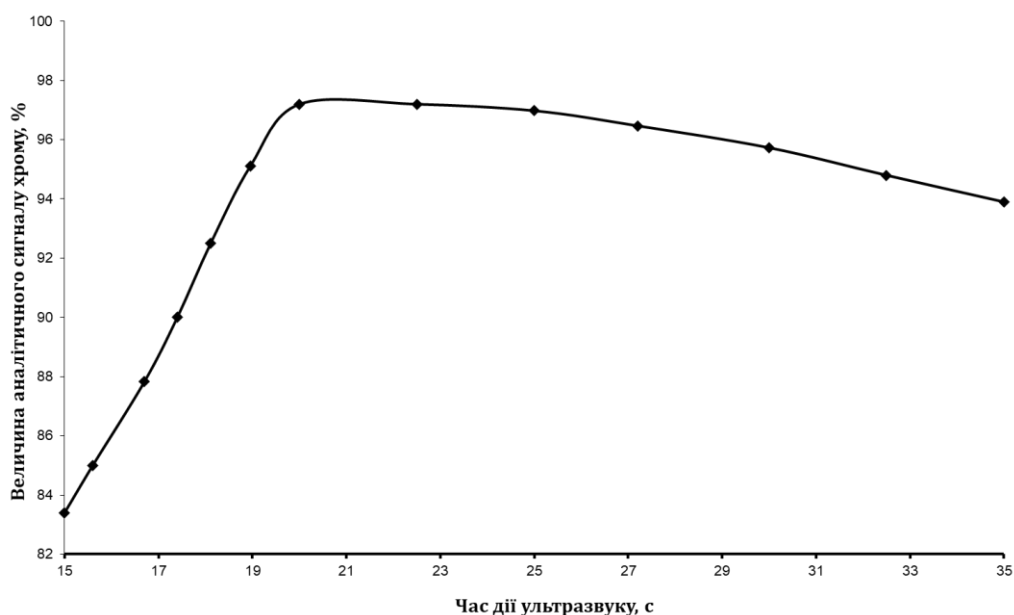


Fig. 3. Influence of time of ultrasound action on the value of the analytical signal of chromium
Рис. 3. Вплив часу дії УЗ на величину аналітичного сигналу хрому

За впливу УЗ розчинність хлориду натрію підвищується з 34.83 до 42.01 г/100 мл з одночасним скороченням часу розчинення з 25–30 хв. до 20–25 с (табл. 1). За інтенсивності УЗ менше 0.5 Вт/см² спостерігається незначне зменшення розчинності хлориду натрію, а за інтенсивності більше 0.7 Вт/см² розчиняється не тільки хлорид натрію, але і домішки, які містяться в ньому (рис. 2). За впливу УЗ менше 20 с повного розчинення хлориду натрію не відбувається, а вплив більше 25 с приводить до розігріву розчину і, водночас, розчиняються і сполуки Хрому, про що свідчить зменшення величини аналітичного сигналу хрому (рис. 3).

За одночасної дії УЗ високої та низької частот підвищується ефективність щодо інтенсифікації масообмінних процесів [23]. Це пов'язано з особливостями утворення кавітаційних пухирців. Завдяки використанню двочастотної дії УЗ утворюється до 90 % відсотків малих

кавітаційних пухирців. Під час схлопування саме них інтенсифікуються данні масообмінні процеси [19, 23].

На підставі вивчення розчинності хлориду натрію в гідроген пероксиді за умови впливу УЗ низької частоти розроблена методика визначення Хрому в хлориді натрію і кухонній солі. У табл. 3 наведені результати визначення вмісту Хрому у кухонній солі з використанням різних методик аналізу: 1) з використанням механічного перемішування [1], 2) з використанням низькочастотного ультра-звуку, 3) з використанням одночасної дії ультразвуку високої та низької частот. У табл. 4 наведені порівняльні характеристики відомої і розроблених методик визначення вмісту Хрому у кухонній солі. Наведені у табл. 4 дані свідчать, що розроблені методики краще відомої за експресністю та величиною відносного стандартного відхилення результатів аналізу.

Table 3

Results of chromium determination in table salt

Таблиця 3

Спосіб отримання концентрата	Результати визначення Хрому у кухонній солі			
	Знайдено, мг/кг / S _r (n = 6, p = 0.95)			
	Кухонна сіль «Екстра»		Кухонна сіль ДП «Артемсіль»	
	Введено Хрому, мг/кг			
	0	0.06	0	0.06
Без УЗ	<u>0.029±0.050</u> 0.101	<u>0.090±0.052</u> 0.102	<u>0.039±0.059</u> 0.091	<u>0.094±0.053</u> 0.092
З УЗ низької частоти	<u>0.033±0.003</u> 0.041	<u>0.093±0.007</u> 0.044	<u>0.044±0.004</u> 0.042	<u>0.103±0.007</u> 0.040
З двочастотним УЗ	<u>0.034±0.002</u> 0.022	<u>0.094±0.002</u> 0.023	<u>0.046±0.002</u> 0.021	<u>0.105±0.002</u> 0.022

Table 4
Таблиця 4

Comparative characteristics of known and developed methods for the determination of chromium in table salt
Порівняльна характеристика відомої і розроблених методик визначення Хрому у кухонній солі

Параметри	Способи отримання концентрату	
	без УЗ	з УЗ однієї частоти/ з двочастотним УЗ
Нижня межа визначення Хрому, мг/кг	0.001	0.001/0.001
S _r при аналізі кухонної солі зі вмістом Хрому 0.034 мг/кг	0.102	0.042/0.022
Час аналізу 10 проб, хв.	46–52 хв.	55–65 с / 55–65 с
Ступінь витягу введеного Хрому, %	85	94–95/ 98–99

Зміна частоти низькочастотного ультразвуку в ході обробки суміші в діапазоні від 18 до 100 кГц не впливала на розчинність хлориду натрію у гідроген пероксиді (табл. 5). Порівняння результатів, одержаних з використанням високочастотного УЗ частотою 0.5–3.0 МГц показало, що кращі результати були отримані за використання УЗ частотою 1.0–2.0 МГц (табл. 6). Одночасно інтенсивність низькочастотного УЗ повинна бути 0.15–0.25 Вт/см² (табл. 5), а високочастотного – 0.25–0.50 Вт/см² (табл. 6).

Table 5
Таблиця 5

The influence of the frequency of low-frequency ultrasound on the solubility of sodium chloride in hydrogen peroxide and the purity of the final product

Вплив частоти низькочастотного УЗ на розчинність хлориду натрію у гідроген пероксиді та чистоту кінцевого продукту

Характеристики	Частота УЗ, кГц %							
	17	18	22	50	60	80	100	110
Розчинність хлориду натрію у гідроген пероксиді, г/100 мл	43.23	47.14	47.20	47.01	47.11	47.20	47.11	45.43

Частота високочастотного УЗ 1.0 МГц, інтенсивність – 0.30 Вт/см². Інтенсивність низькочастотного УЗ – 0.20 Вт/см². Час дії УЗ – 20 с.

Як виходить з даних, наведених у табл. 7, використання двочастотного ультразвуку призводить до підвищення розчинності хлориду натрію у гідроген пероксиді у порівнянні з використанням ультразвуку однієї частоти з 42 г/100 мл до 47.2 г/100 мл.

Table 6
Таблиця 6

The influence of the frequency of high-frequency ultrasound on the solubility of sodium chloride in hydrogen peroxide and the purity of the final product

Вплив частоти високочастотного УЗ на розчинність хлориду натрію у пероксиді водню та чистоту кінцевого продукту

Характеристики	Частота УЗ, МГц %					
	0.5 МГц	1 МГц	1.5 МГц	2 МГц	2.5 МГц	3 МГц
Розчинність хлориду натрію у пероксиді водню, г/100 мл	40.11	47.20	47.12	47.09	44.21	36.22

Частота низькочастотного УЗ 22,0 кГц, інтенсивність високочастотного УЗ – 0,30 Вт/см². Інтенсивність низькочастотного УЗ – 0,20 Вт/см². Час дії УЗ – 20 с.

На підставі вивчення розчинності хлориду натрію в гідроген пероксиді за одночасної дії УЗ високої та низької частот розроблена методика визначення Хрому у кухонній солі. Слід зазначити, що використання одночасної дії ультразвуку високої та низької частот у порівнянні з використанням ультразвуку однієї низької частоти дозволило покращити метрологічні характеристики результатів аналізу (табл. 3, 4).

The influence of ultrasound intensity on the solubility of sodium chloride in hydrogen peroxide and the purity of the final product

Таблиця 7

Вплив інтенсивності ультразвуку на розчинність хлориду натрію у перексиді водню та чистоту кінцевого продукту

Інтенсивність низькочастотного УЗ, Вт/см ²	Інтенсивності УЗ високої частоти, Вт/см ²					
	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60
Розчинність хлориду натрію у перексиді водню, г/100 мл						
0.10	34.11	38.32	40.21	41.17	43.33	40.03
0.15	43.24	46.15	47.03	46.45	46.34	43.14
0.20	42.03	47.20	47.20	47.14	45.61	43.12
0.25	41.10	47.01	47.15	46.32	47.18	44.21
0.30	40.22	42.04	42.11	47.03	43.02	40.11

Частота низькочастотного УЗ – 22 кГц, частота високочастотного УЗ – 1 МГц. Час дії УЗ – 30 с.

Висновки

Таким чином, вивчено використання УЗ в ході визначення Хрому у кухонній солі з використанням екстракції макрокомпоненту. Розроблені методики визначення вмісту Хрому в кухонній солі з використанням екстракції макрокомпоненту. Встановлено, що використання ультразвуку дозволяє підвищити ступінь вилучення введеної частини Хрому та покращити метрологічні характеристики отриманих результатів аналізу кухонної солі. Використання двочастотного ультразвуку у порівнянні з використанням ультразвуку однієї частоти

дозволяє підвищити розчинність хлориду натрію у гідроген перексиді з 42 до 47 г/100 мл, підвищити ступінь вилучення введеної частини Хрому з 94–95 до 98–99 %, а також покращити метрологічні характеристики результатів аналізу кухонної солі. Правильність методик перевірено аналізом одних і тих самих проб відомою методикою, а також методом «введено-знайдено». Методики визначення Хрому у кухонній солі є експресними і характеризуються високою чутливістю і точністю.

References

- [1] Yurchenko, O. I., Chernozhuk, T. V., Pateleymonov, A. V., Baklanova, L. V., Baklanov, O. M. (2023), [Analytical chemistry of table salt, brines and highly mineralized waters]. Kharkiv: V.N. Karazin Kharkiv National University. (in Ukrainian).
- [2] Gilbert, T. R., Clay, A. M. (1973). Determination of chromium in sea water by atomic absorption spectrometry. *Anal. Chim. Acta*, 67(2), 289–295. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(01\)80863-1](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(01)80863-1)
- [3] Jia, X., Gong, D., Xu, B., Chi, Q., Zhang, X. (2016). Development of a novel, fast, sensitive method for chromium speciation in wastewater based on an organic polymer as solid phase extraction material combined with HPLC-ICP-MS. *Talanta*, 147, 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.09.047>
- [4] Houda, P. S. (2021). *Trace elements in soils*. Chichester, Great Britain: J. Wiley & Sons. [doi:10.13140/RG.2.2.26667.26407](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26667.26407)
- [5] Muhammad Rizwan, Murtaza Haider, Abrar Ul Hassan and Sakhawat Al (2017). Determination of Heavy Metals in the Different Samples of Table Salt. *Journal of Basic & Applied Sciences*. 13, 198–202. [doi:10.6000/1927-5129.2017.13.34](https://doi.org/10.6000/1927-5129.2017.13.34)
- [6] Heshmati A, Vahidinia A, Salehi A. (2014). Evaluation of Heavy Metals Contamination of Unrefined and Refined Table Salt. *Int J Res Stu Biosci*, 2, 21–24
- [7] Qadir, H., Farrukh, M., Aurangzaib, M. (2005). Production of table salt from Kohat rock salt. *J. App. Sci*, 5, 12–14. <https://doi.org/10.3923/jas.2005.12.14>
- [8] Simonova, T. N., Dubrovina, V. A., Vishnikin A. B. (2016). Speciation of chromium through aqueous two-phase extraction of complexes of Cr(III) with 4-(2-pyridylazo)resorcinol and Cr(VI) with 1,5-diphenylcarbazine. *J. Serb. Chem. Soc.*, 81(6). 645–659. <https://doi.org/10.2298/JSC150630016S>
- [9] Yan, J., Zhang, C., Wang, C., Lu, D., Chen, S. (2023). A novel separation and preconcentration methodology based on direct immersion dual-drop microextraction for speciation of inorganic chromium in environmental water samples. *Talanta*, 255, 123902. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123902>
- [10] Zhai, H.-M., Ji, B., Tian, S.-S., Fang, F., Zhao, S., Wu, Z.-Y. (2021). Cr speciation analysis based on electrokinetic sample pretreatment with a paper based analytical device. *Talanta*. 234, 122656. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.122656>
- [11] Yurchenko, O. I., Gubskii, S. M., Chernozhuk, T. V., Baklanov, A. N., Kravchenko, O. A. (2020). [Monitoring of content of sodium, potassium, calcium and magnesium in whey processed products]. *J. Chem. Technologies*, 28(1), 27–33 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/082004>
- [12] Vishnikin, A. B., Al-Shwaiyat, M. K. E. A., Bazel, Y. R., Andruch, V. (2007). Rapid, sensitive and selective spectrophotometric determination of phosphate as an ion associate of 12-molybdophosphate with Astra Phloxine. *Microchim. Acta*, 159, 371–378. <https://doi.org/10.1007/s00604-007-0754-7>
- [13] Tamen, A.-E., Vishnikin, A. (2021). In-vessel headspace liquid-phase microextraction. *Anal. Chim. Acta*, 1172, 338670. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338670>
- [14] Alidadi, H., Tavakoly Sany, S., Zarif Garaati Oftadeh, B. (2019). Health risk assessments of arsenic and toxic heavy metal exposure in drinking water in northeast

- Iran. *Environ Health Prev Med* 24(59), 2-17. <https://doi.org/10.1186/s12199-019-0812-x>
- [15] Astani, M, Mashinchian, M. A, Ghavam, M. P (2021). Assessment of heavy metal in the sediments of Bandar Abbas. *J Environ Geol*, 15, 13-26
- [16] Mohammadpour, A., Emadi, Z., Samaei, M. R., Ravindra, K. (2023). The concentration of potentially toxic elements (PTEs) in drinking water from Shiraz, Iran: a health risk assessment of samples. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 23295-23311 <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23535-2>
- [17] Soylak, M., Peker, D. S. K., Turkoglu, O. (2008). Heavy metal contents of refined and unrefined table salts from Turkey, Egypt and Greece. *Environ. Monit. Assess.*, 143, 267-272. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9975-9>
- [18] Tian, K., Huang, B., Xing, Z., Hu, W. (2018). In situ investigation of heavy metals at trace concentrations in greenhouse soils via portable X-ray fluorescence spectroscopy. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 25(11), 1011-1022. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1405-8>
- [19] Yurchenko, O., Baklanov, A., Chernozhuk, T. (2021). Chemical applications of ultrasound: On the use of ultrasound in the analysis and technology of brains and sodium chloride solutions. LAP LAMBERT Academic Publishing.
- [20] Yurchenko, O. I., Chernozhuk, T. V., Baklanov, A. N., Baklanova, L. V., Rebrov, A. L., Ponomarenko, T. V., Rebrova, T. P., Cherginets, V. L. (2021). Analysis of highly concentrated aqueous solutions of alkali metal chlorides using sonoluminescence spectroscopy. *Appl. Spectr.*, 76, 184-188. <https://doi.org/10.1177/00037028211052091>
- [21] Yurchenko, O. I., Chernozhuk, T. V., Baklanov, A. N., Baklanova, L. V., Kravchenko, O. A. (2018). [Analytical signal amplification technologies in sonoluminescence spectroscopy by double-frequency ultrasound]. *Methods Objects Chem. Anal.*, 13(3), 103-109. <https://doi.org/10.17721/moca.2018.103-109> (in Ukrainian)
- [22] Yurchenko, O. I., Chernozhuk, T. V., Kravchenko, O. A., Baklanov, A. N. (2023). [Atomic absorption and X-ray fluorescent detection of chromium and cobalt in pharmaceuticals]. *J. Chem. Technologies*. 31(1), 37-43. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i1.238921> (In Ukrainian).
- [23] Priego, C. F., Luque de Castro, M. D. (2007). Ultrasound in analytical chemistry. *Anal. Bioanal. Chem.*, 387, 249-257. <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0966-4>
- [24] Feng, Y., Tao, Y., Meng, Q., Qu, J., Ma, S., Han, S., Zhang, Y. (2022). Microwave-combined advanced oxidation for organic pollutants in the environmental remediation: An overview of influence, mechanism, and prospective, *Chemical Engineering Journal*, 441, 135924
- [25] Nóbrega, J. A., Donati, G. L. (2011). *Microwave-Assisted Sample Preparation for Spectrochemistry*. In book: Encyclopedia of Analytical Chemistr. [doi:10.1002/9780470027318.a9185](https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9185)