

ГІДРОТЕРМАЛЬНЕ ВИЛУЧЕННЯ СПОЛУК ЛІТІЮ З ПЕТАЛІТУ $\text{Li}[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}]$

Т. В. Павленко, О. П. Іваненко

*Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України, Україна,
Київ 03680, просп. Акад. Палладіна, 32/34
e-mail: pavlenkoktv@gmail.com*

На основі досліджень розкладання петалітової руди розроблено гідротермальний метод вилучення сполук літію та алюмінію з літєвого алюмосилікату $\text{Li}[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}]$ (петаліт). Розкладання здійснювали в автоклавах шляхом хімічної взаємодії незбагаченої руди з розчином NaOH за присутності оксиду кальцію. Протягом 1 години за температури 240–280 °С, заданому каустичному модулі 14–18, концентрації вихідного розчину 400–450 г/дм³ Na_2O та співвідношенні $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 1 : 1$ у реакційній суміші досягається ступінь вилучення літію 89–94 %, алюмінію 77–95 %. Із рідкої фази (алюмінатний розчин), що містить 1,5–2,5 г/дм³ Li_2O та 32–44 г/дм³ Al_2O_3 , можна отримати алюмінат або карбонат літію та інші сполуки.

Ключові слова: гідротермальний процес, петаліт, лужний розчин, ступінь вилучення, літій.

ВСТУП. Сталий розвиток економіки України, її енергетичну та оборонну безпеку, захист від глобальних криз може забезпечити наявність покладів власних стратегічних мінеральних копалин. З огляду на природну обмеженість запасів «критичної» сировини у світі, забезпеченість власними ресурсами є запорукою економічної безпеки та незалежності країни. Україна має одні з найбільших на європейському континенті поклади літєвої сировини, запаси якої оцінюються в 0,5–5 млн т у перерахунку на Li_2O [1]. Зростаюче використання літію для виробництва скла та кераміки, полімерів, мастильних матеріалів, лікарських препа-

ратів тощо підвищує попит на літєву сировину та сполуки літію на світовому ринку. Найбільше застосування літій знаходить у виробництві сучасних хімічних джерел електроенергії (літій-іонних батарей LiBs), де його використовують при виготовленні електродних та електролітних матеріалів [2–4]. Попит на літій на світовому ринку, за оцінками фахівців, уже в 2022 році має збільшитися майже вдвічі ~ до 58 000 т, причому вартість його за останні 5 років зросла втричі (до 16 500\$ за кг), а потреба у ньому в найближчі 20 років збільшиться майже в 40 разів. Недаремно літій отримав назву «золото 21 століття». Це зумовлено

швидкими темпами зростання випуску електромобілів. За прогнозами, у 2030 році світовий ринок електромобілів складатиме понад 125 млн шт., що майже в 40 разів більше, ніж зараз [5].

Ефективне використання мінерально-сировинної бази країни дає потенціал для розвитку видобувної промисловості, гірничо-збагачувальної і, як наслідок, власного виробництва літію та його сполук. Для цього необхідною є технологія перероблення вітчизняної літієвої сировини, що відкриває перспективу для створення виробництва літієвих джерел струму та інших літійвмісних матеріалів [6–9].

Метою цієї роботи є дослідження гідротермальних процесів, що відбуваються при розкладанні складного літієвого алюмосилікату, зокрема, петаліту $\text{Li}[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}]$, який є основним складовим компонентом петалітової руди Полохівського родовища, а також визначення впливу параметрів цих процесів на вилучення з неї цінних компонентів (літію та алюмінію).

ЕКСПЕРИМЕНТ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. Для досліджень використовували незбагачену петалітову руду Полохівського родовища (Кіровоградська обл.), хімічний склад якої був таким, мас. %: Li_2O – 0,75; Al_2O_3 – 14,65; SiO_2 – 74,19; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ – 5,20 та ін.

Розкладання сировини проводили у сталевих автоклавах об'ємом 100 см^3 , із впресованими в них нікелевими вставками. Автоклави закріплювали на хрестовині, вмонтованій у повітряний термостат. Нагрівання і витримку автоклавів за постійного обертання їх здійснювали в заданих умовах проведення експерименту. Для приготування реакційної суміші використовували роз-

терту до 0,3 мм петалітову руду, розчини NaOH (х. ч.) та оксид кальцію (х. ч.). Після витримки автоклавів їх охолоджували водою до температури $80\text{--}90\text{ }^\circ\text{C}$ та відокремлювали тверду фазу від рідкої на вакуумній лійці. Фільтрат збирали і аналізували на вміст в ньому Li_2O , Al_2O_3 , Na_2O . Промиті осади висушували за $100\text{--}110\text{ }^\circ\text{C}$ та визначали вміст у них Li_2O , Al_2O_3 , Na_2O , SiO_2 , CaO та втрати при прожарюванні. Хімічний склад рідкої та твердої фаз визначали за загальноприйнятими в аналізі силікатів методами, перераховуючи вміст складових на їхні оксиди [10]. Літій у рідкій та твердій фазах визначали атомно-абсорбційним методом на спектрофотометрі "SP9" фірми "Pye Unicam" (Велика Британія). Натрій у рідкій фазі визначали об'ємним методом, титруючи розчином $0,1\text{N HCl}$, а у твердій фазі – фотометрією полум'я на фотометрі «ПФМ». Алюміній у рідкій і твердій фазах та кальцій у твердій фазі визначали комплексометричним методом, відтитровуючи розчином $0,1\text{N}$ трилону Б. Оксид кремнію та втрати при прожарюванні ($1000\text{ }^\circ\text{C}$) визначали ваговим методом. Дослідження фазового складу продуктів, які утворилися внаслідок гідротермальних перетворень, а також вихідної руди, виконували на дифрактометрі «ДРОН-3М» із CuK_α -випромінюванням. Для ідентифікації дифрактограм використовували комп'ютерну програму Match! із базою даних дифрактограм PDF-2 [11].

Петалітова руда Полохівського родовища – це літійвмісна польовошпатована сировина, яка, крім петаліту, містить польові шпати (альбіт $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$, мікроклін $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$), кварц SiO_2 , сподумен $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ та ін., що разом становлять до 98 % [12]. Основний літієвий мінерал у руді – пе-

таліт, його вміст складає близько 25 %. За хімічним складом – це алюмосилікат літію $\text{Li}[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}]$, який теоретично містить 4,9 мас.% Li_2O , а фактично його вміст не перевищує 3–4 мас.% через ізоморфне заміщення літію натрієм та калієм. Проба руди, яку досліджували, містить 0,75 мас.% Li_2O . Також руда містить домішки рідкісних елементів (Rb, Cs, Nb, Ta, Be, Sn та ін.), тому навіть за низького їхнього вмісту доцільною є її комплексне перероблення. Рентгенівську дифрактограму дослідженого зразка петалітової руди наведено на рис. 1.

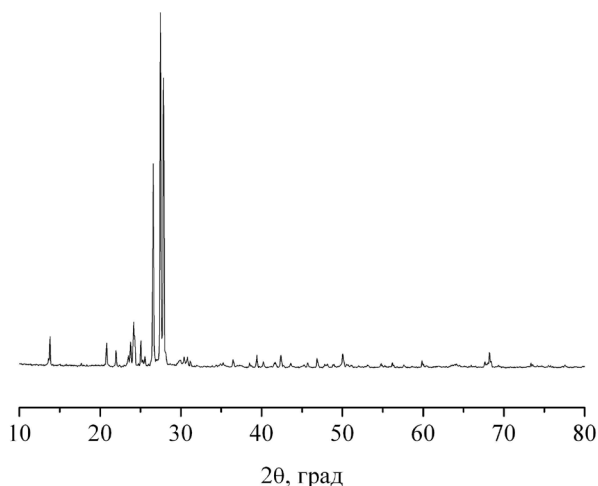
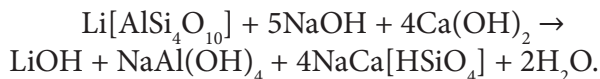


Рис. 1. Рентгенівська дифрактограма петалітової руди Полохівського родовища

Для незбагаченої петалітової руди з низьким вмістом літію запропоновано використовувати гідрохімічний метод перероблення алюмосилікатів – спосіб Пономарьова – Сажина [6, 13]. Він полягає в тому, що розкладання алюмосилікату літію та вилучення у розчин сполук літію і алюмінію здійснюють безпосередньо в автоклавах шляхом хімічної взаємодії руди з розчином NaOH за присутності оксиду кальцію. При цьому у розчин переходять

сполуки літію та алюмінію, а кальцій та кремній утворюють малорозчинну сполуку $(\text{Na}, \text{K})_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Необхідною умовою розкладання алюмосилікатів за цим методом та досягнення високого ступеня вилучення складових компонентів у розчин є великий надлишок гідроксиду натрію у реакційній суміші, висока концентрація його розчинів (до $450 \text{ г/дм}^3 \text{ Na}_2\text{O}$) та підвищена температура. Оскільки петаліт, як і інші складні алюмосилікати літію, важко розкладається під дією хімічних реагентів (луги, кислоти) за звичайних умов, то саме в гідротермальному процесі діє висока температура та створюється високий тиск і руйнується петаліт та утворюється гідроксид літію [14]. Взаємодію основних компонентів при розкладанні петалітової руди у гідротермальних умовах можна описати такою схемою:



Щоб визначити тривалість оброблення сировини для максимального вилучення літію, було досліджено кінетику процесу за 240 та 280 °C. Результати досліджень наведено в табл. 1 та на рис. 2.

Практично повне розкладання петаліту за температури 240 °C відбувається через $0,5$ – $1,0$ год, досягаючи ступеня вилучення, %: Li_2O – 89 – 92 ; Al_2O_3 – 92 – 95 , який залишається майже незмінним упродовж 4 -х годин. Така ж сама тенденція зберігається і за більш високої температури. Для повного розкладання петалітової руди та максимального вилучення літію й алюмінію у цьому випадку потрібно стільки ж часу, причому за температури 280 °C ступінь вилучення Li_2O такий самий, як і Al_2O_3 .

Таблиця 1.

Склад рідкої та твердої фази за різної тривалості оброблення петалітової руди (концентрація вихідного розчину NaOH – $454 \text{ г/дм}^3 \text{Na}_2\text{O}$), розрахований каустичний модуль $\alpha_k = 18$, дозування $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 1 : 1$)

Тривалість, год	Склад фільтрату, г/дм^3			Хімічний склад твердої фази, мас.%					
	Li_2O	Na_2O	Al_2O_3	Li_2O	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Na_2O	В.п.п.*
240 °C									
0,5	1,91	384,40	39,50	0,04	0,42	35,35	34,99	19,69	8,58
1,0	2,08	381,30	39,50	0,03	0,34	35,77	35,11	19,05	8,02
2,0	1,89	365,80	38,50	0,04	0,32	34,64	34,03	20,76	8,81
3,0	1,73	365,80	37,40	0,05	0,57	33,24	33,00	21,90	9,92
4,0	1,96	384,40	38,50	0,03	0,39	35,55	34,84	20,30	8,02
280 °C									
0,5	1,88	387,50	38,50	0,02	0,45	34,70	36,36	17,90	8,04
1,0	1,97	387,50	39,00	0,04	0,45	34,20	35,90	21,39	8,51
2,0	1,87	378,20	37,50	0,02	0,55	35,60	36,40	18,12	7,39
3,0	1,95	378,20	38,00	0,04	0,49	34,10	35,80	19,06	8,52
4,0	2,02	396,80	39,80	0,03	0,36	35,10	35,90	18,31	7,98

* – Втрати при прожарюванні

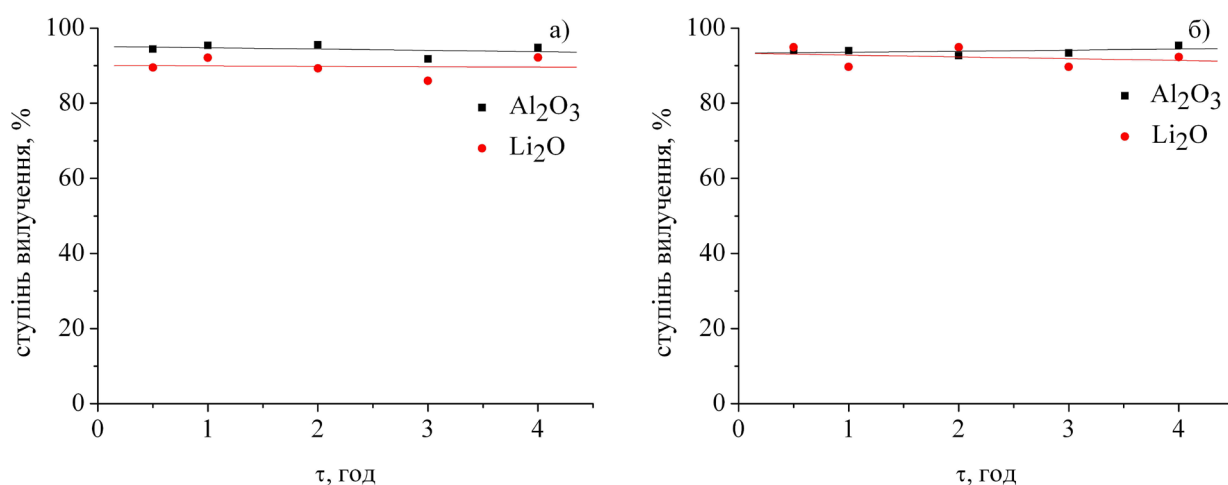


Рис. 2. Залежність ступеня вилучення літію та алюмінію від тривалості гідротермального оброблення петалітової руди за температури: а) – 240 °C, б) – 280 °C

Для забезпечення селективного відокремлення сполук кремнію при гідротермальном розкладанні петалітової руди в реакційну суміш додавали оксид кальцію, що утворює з SiO_2 малорозчинну сполуку, а літій та алюміній при цьому залишаються у розчині. Кількість доданого оксиду кальцію вираховували за заданим співвідношенням $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 1 : 1$. Тверда фаза, що утворюється, має у своєму складі мінімальну кількість Li_2O та Al_2O_3 , тому можна вважати, що руда розкладається повністю протягом 1 години. На рис. 3 представлено дифрактограму твердої фази, утвореної після розкладання петаліту за 280°C , основною сполукою якої є натрієво-кальцієвий гідросилікат. Хімічний склад утворених твердих фаз відповідає складу $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ незалежно від тривалості гідротермального оброблення.

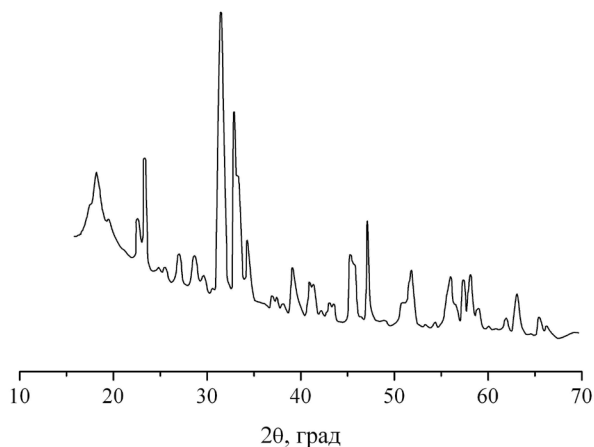


Рис. 3. Дифрактограма твердої фази, утвореної після розкладання петаліту за 280°C

Важливим чинником ефективного перебігу зазначеного процесу в гідротермальних умовах є визначення оптималь-

ного каустичного модуля розчинів ($\alpha_k = 1,645 \cdot \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$), що утворюються після розкладання петалітової руди. Це потрібно для того, щоб визначити кількість лужного розчину необхідної концентрації для забезпечення практично повного розкладання руди. Щоб досягти високого ступеня вилучення у рідку фазу літій та алюмінію, що містяться в рудах у невеликій кількості, необхідно проводити процес у напрямку отримання розчинів із більш високим каустичним модулем або за більш високої температури розкладання. Підвищення каустичного модуля в усіх випадках призводить до збільшення вилучення корисних компонентів руди у розчин, але найбільш ефективним шляхом є збільшення температури гідротермального процесу, оскільки з ростом температури підвищується розчинність літій та алюмінію у лужному розчині. В таблиці 2 наведено результати досліджень впливу каустичного модуля розчину на ступінь вилучення літій та алюмінію за різних температур проведення процесу і різних концентрацій вихідних розчинів NaOH .

Аналізуючи результати, можна зробити висновок, що збільшення каустичного модуля підвищує ступінь переходу у розчин алюмінію, при цьому практично не змінює показники вилучення літій. Якщо порівнювати ефективність розкладання за однакового каустичного модуля, то видно, що підвищення концентрації лужного розчину до $450 \text{ г/дм}^3 \text{ Na}_2\text{O}$ суттєво збільшує ступінь вилучення Al_2O_3 , а для Li_2O він залишається незмінно високим. Що стосується впливу температури на гідротермальний процес, то слід зазначити, що її підвищення значно впливає на зростання швидкості

Таблиця 2.

Вплив каустичного модуля та концентрації вихідного розчину NaOH
на ступінь вилучення Li_2O і Al_2O_3 з пегалітової руди

Концентрація Na_2O у вихідному розчині, г/дм ³	Температура, °С	Каустичний модуль		Склад фільтрату, г/дм ³			Хімічний склад шламу, %						Ступінь вилучення, %	
		Розрахований	Фільтрата	Na_2O	Al_2O_3	Li_2O	Al_2O_3	Li_2O	SiO_2	CaO	Na_2O	В.п.п.	Li_2O	Al_2O_3
400	240	14,0	12,3	291,40	38,98	2,08	1,39	34,58	35,99	18,81	8,66	90,4	79,9	
		12,0	13,3	269,70	33,27	2,45	1,89	34,01	32,43	20,16	8,73	85,8	72,3	
	14,0	14,7	282,10	31,45	2,18	1,66	34,96	33,90	18,47	7,56	89,0	77,0		
	18,0	15,4	310,00	33,00	1,45	0,52	35,94	36,06	18,41	7,86	92,4	82,2		
	12,0	12,5	331,70	43,66	2,78	1,48	34,64	33,83	17,20	8,13	88,8	79,5		
	14,0	15,8	328,60	34,31	2,38	1,85	35,36	33,45	19,11	7,95	89,0	74,3		
450	240	12,0	12,3	291,40	38,98	2,87	1,55	34,60	33,68	19,48	7,82	89,1	78,2	
		14,0	12,6	306,90	40,02	2,49	1,02	34,81	34,49	20,06	8,13	92,3	86,3	
	18,0	14,1	350,30	40,80	1,78	0,41	34,68	35,74	17,16	7,91	92,7	94,7		

розкладання руди та ступеня вилучення корисних компонентів у розчин. Як видно з таблиці 2, при однаковому розрахованому $\alpha_k = 14$, концентрації NaOH – 450 г/дм³ Na₂O та за температури 240 °С ступінь вилучення алюмінію у розчин складає 74,3 %, підвищення до 280 °С за тих самих умов збільшує вилучення Al₂O₃ на 12 %, вилучення Li₂O залишається однаковим на рівні 90 %. Загалом, сукупність факторів, що впливають на хід гідротермального процесу, змінюється

залежно від якості сировини, що піддається розкладанню. За невеликого вмісту літію та алюмінію у руді значення каустичного модуля повинно бути настільки вищим, настільки нижчою є температура розкладання та концентрація вихідного розчину, щоб досягти такого ж ступеня вилучення корисних компонентів у рідку фазу.

На рис. 4 представлено схему розкладання петалітової руди.

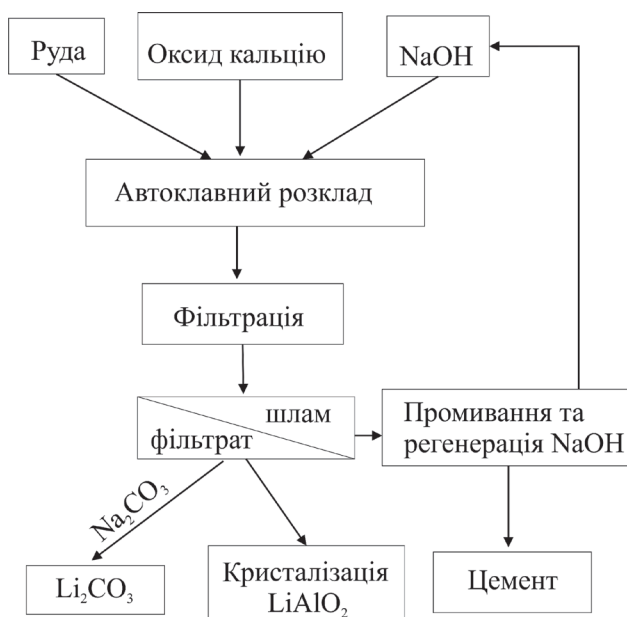


Рис. 4. Схема гідрохімічного перероблення петалітової руди

ВИСНОВКИ. Гідрохімічний метод можна застосовувати для перероблення незбагаченої петалітової руди Полохівського родовища. За температури розкладання 240–280 °С, концентрації вихідного розчину 400–450 г/дм³ Na₂O, заданого каустичного модуля рідкої фази (алюмінатний розчин) 14–18 та додаванням оксиду кальцію у співвідношенні CaO : SiO₂ = 1 : 1 можна протягом 1 години розкласти петалітову

рудю. За таких умов ступінь вилучення літію складає 89–94 %, алюмінію – 77–95 %. В алюмінатному розчині після розкладання міститься 1,5–2,5 г/дм³ Li₂O, що дозволяє отримувати з нього або алюмінат літію, або карбонат та інші сполуки. Шлам, який складається переважно з натрієво-кальцієвого гідросилікату, містить всього 0,03–0,05 % Li₂O, його можна використовувати у цементному виробництві.



Роботу виконано в межах Цільової комплексної програми НАН України «Критичні та стратегічні мінеральні ресурси України за умов глобалізації та змін клімату», державний реєстраційний номер: 0121U112346.

HYDROTHERMAL EXTRACTION OF LITHIUM COMPOUNDS FROM PETALITE $\text{Li}[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}]$

T.V. Pavlenko, O.P. Ivanenko

*V.I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry, NAS of Ukraine, 32/34 Acad. Paldin Avenue, Kyiv 03142, Ukraine
e-mail: pavlenkoktv@gmail.com*

Based on studies of the decomposition of petalite ore, the hydrothermal method for the extraction of lithium and aluminum compounds from lithium aluminosilicate $\text{Li}[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}]$ (petalite) has been developed. The studied sample of ore contains, wt. %: Li_2O – 0.75 and Al_2O_3 – 14.65. For unenriched petalite ore with low lithium content, it is proposed to use the hydrochemical method of aluminosilicate processing – Ponomarev – Sazhin method. According to this method, the decomposition of ore is carried out directly in autoclaves by chemical interaction of ore components with NaOH solution in the presence of calcium oxide. The conditions (high temperature and pressure) for the destruction of petalite and the transition of lithium into the liquid phase are created exactly in the hydrothermal process. In this case, lithium and aluminum compounds pass into the solution, and calcium and silicon form a partially soluble compound in the solid phase – sodium-calcium hydrosilicate $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. The degree of extrac-

tion of lithium reaches 89–94 %, aluminum reaches 77–95 % within 1 hour at a temperature of 240–280 °C, given caustic modulus 14–18, the concentration of the initial solution of 400–450 g/dm³ of Na_2O and the ratio of $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 1 : 1$ in the reaction mixture. Aluminate or lithium carbonate and other compounds can be obtained from an aluminate solution containing 1.5–2.5 g/dm³ of Li_2O and 32–44 g/dm³ of Al_2O_3 . The solid phase formed as a result of decomposition, with a high degree of extraction of lithium from the ore contains a small amount of Li_2O in its composition and therefore can be used in the cement industry.

Depending on the quality of the decomposed raw material, the course of the hydrothermal process is influenced by a set of factors. With a small content of lithium and aluminum in the ore, the caustic modulus of aluminate solutions ($\alpha\kappa = 1,645 \cdot \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) formed after decomposition is important. Its calculation is required in order to determine the amount of alkaline solution of the required concentration to ensure almost complete decomposition of the ore. This value should be higher the lower the decomposition temperature and the concentration of the initial solution to achieve the same degree of recovery of useful components in the liquid phase. With the same caustic modulus, the efficiency of ore decomposition increases significantly with increasing process temperature and increasing the concentration of the initial solution. This can be seen in the values of the degree of extraction of aluminum, which increases by 12 % with increasing temperature from 240 to 280 °C, while the extraction of lithium remains practically unchanged.

Key words: hydrothermal process, petalite, alkaline solution, degree of extraction, lithium.

ЛІТЕРАТУРА

1. www.minerals-ua.info.
2. Ярославцев А. Б., Кулова Т. Л., Скундин А. М. Электродные наноматериалы для литий-ионных аккумуляторов. *Успехи химии*. 2015. **84** (8): 826–852. (<https://doi.org/10.1070/RCR4497>)
3. Набиев Р. Н., Газарханов А. Т., Абдуллаев А. А., Гараев Г. И. Сравнительный анализ особенностей аккумуляторных батарей на основе лития. *Авиакосмическое приборостроение*. 2019. (9): 42–55. (doi:10.2579/aviakosmos.09.2019.867)
4. Smith K., Wang Ch.-Y. Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2006. **160** (1): 662–673. (<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.01.038>)
5. www.reportbuyer.com (Global Lithium Industry. April 2021. Report ID: 5478488).
6. Yelatontsev D., Mukhachev A. Processing of lithium ores: Industrial technologies and case studies – A review. *Hydrometallurgy*. 2021. **201**: Article 105578. (<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105578>)
7. Meshram P., Pandey B.D., Mankhand T.R. Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. *Hydrometallurgy*. 2014. **150**: 192–208. (<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.10.012>)
8. Sitando O., Crouse P.L. Processing of a Zimbabwean petalite to obtain lithium carbonate. *International Journal of Mineral Processing*. 2012. **102–103**: 45–50. (<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.09.014>)
9. Xing P., Wang Ch., Zeng L., Ma B., Wang L., Chen Yo., Yang Ch. Lithium Extraction and Hydroxysodalite Zeolite Synthesis by Hydrothermal Conversion of α -Spodumene. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019. **7** (10): 9498–9505. (<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00923>)
10. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.
11. www.crystalimpact.com.
12. Кузьменко Т. Г., Коваленко Ю. Г., Михайленко Н. Т., Каташева Н. Г., Попов М. І. Дослідження петалітової руди Полохівського родовища як сировини для виготовлення тонкокерамічних виробів. *Легка промисловість*. 2003. (1): 59–63.
13. Сажин В. С. Новые гидрохимические способы получения глинозема. Киев: Наук. думка, 1979. 208 с.
14. Павленко Т. В., Панченко Р. Г., Омельчук А. А., Рудковская Л. М., Онищук С. Ф. Автоклавное разложение петалитовой руды Полоховского месторождения. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2005. (5): 45–47.

REFERENCES

1. www.minerals-ua.info.
2. Yaroslavtsev A.B., Kulova T.L., Skundin A.M. Electrode nanomaterials for lithium-ion batteries. *Russian Chemical Reviews*. 2015. **84** (8): 826–852. (<https://doi.org/10.1070/RCR4497>)
3. Nabiye R.N., Hazarkhanov A.T., Abdullayev A.A., Garayev Q.I. Comparative analysis the features of the lithium-based accumulator batteries. *Aerospace Instrument-Making*. 2019; (9): 42–55. (doi:10.2579/aviakosmos.09.2019.867)
4. Smith K., Wang Ch.-Y. Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2006. **160** (1): 662–673. (<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.01.038>)
5. www.reportbuyer.com (Global Lithium Industry. April 2021. Report ID: 5478488).
6. Yelatontsev D., Mukhachev A. Processing of lithium ores: Industrial technologies and case studies – A review. *Hydrometallurgy*. 2021. **201**: Article 105578. (<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105578>)

7. Meshram P., Pandey B.D., Mankhand T.R. Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. *Hydrometallurgy*. 2014. **150**: 192–208. (<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.10.012>)
8. Sitando O., Crouse P.L. Processing of a Zimbabwean petalite to obtain lithium carbonate. *International Journal of Mineral Processing*. 2012. **102–103**: 45–50. (<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.09.014>)
9. Xing P., Wang Ch., Zeng L., Ma B., Wang L., Chen Yo., Yang Ch. Lithium Extraction and Hydroxysodalite Zeolite Synthesis by Hydrothermal Conversion of α -Spodumene. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019. **7** (10): 9498–9505. (<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00923>)
10. Arinushkina E.V. Manual for Chemical Analysis of Soils. Moscow: Publishing house Mosk. University, 1970. 488 p. (*in Russian*).
11. www.crystalimpact.com.
12. Kuzmenko T.G., Kovalenko Y.G., Mikhailenko N.T., Katasheva N.G., Popov M.I. Research of petalite ore of Polokhiv deposit as raw material for production of thin ceramic products. *Lehka promyslovist*. 2003. (1): 59–63 (*in Ukrainian*).
13. Sazhin V.S. New hydrochemical methods for producing alumina. Kiev: Nauk. Dumka, 1979. 208 p. (*in Russian*).
14. Pavlenko T.V., Panchenko R.G., Omel'chuk A.A., Rudkovskaya L.M., Onischuk S.F. Autoclave decomposition of petalite ore from the Polokhovskoye deposit. *Ekotekhnologii i resursoberezhniye*. 2005. (5): 45–47 (*in Russian*).

Стаття надійшла 19.11.2021.