

УДК 546.161 + 661.482

- Шевченко В. Г. канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: shevawk@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9037-6367
- Баженов Є. В. канд. техн. наук, старший науковий співробітник АТ «ІНСТИТУТ ТИТАНУ», м. Запоріжжя, Україна, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: bazeugen@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2889-788X
- Омельченко О. С. старший викладач кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: omelchenko15@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8925-4178
- Шалева Н. В. асистент кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: shaleva1711@ukr.net, ORCID 0000-0002-6571-0359

ОЦІНКА ФТОРАММОНІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗКРИТТЯ ІЛЬМЕНІТУ З ОТРИМАННЯМ ЗАТРЕБУВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА МЕДИЦИНИ

Мета роботи. Оцінювання переваг інноваційного напрямку одержання затребуваних оксидів титану та кремнію за технологією гідрофторування ільменітових концентратів.

Методи дослідження. Оцінка якості лабораторних зразків – продуктів розкриття гідрофторуванням ільменіту щодо можливості інтеграції отриманих матеріалів як у існуючі виробничі схеми виробництва актуальної титанової та кремнієвої продукції, так і у забезпеченні сировинних потреб перспективних технологічних процесів. Хімічний аналіз виконувався методом атомарного спектрального аналізу. У лабораторних дослідженнях використовувався сировинний компонент – концентрат ільменіту Малишевського родовища (Вільногірський ГМК, Україна). В якості реагенту використовувався фторовмісний комплексотворювач – фторид амонію (NH_4F). Виконані лабораторні дослідження розкладання ільменіту у водному розчині фториду амонію при температурах, не перевищуючих 200 °С.

Отримані результати. Визначення температурного діапазону та умов ведення процесу розкладання ільменіту забезпечує його високу продуктивність та отримання продуктів, які є проміжними і склад яких задає зміст наступних процесів одержання цільових продуктів. Реалізація розкладання ільменіту з використанням реакцій в твердій фазі забезпечує високий потенціал екологічної безпеки технології.

Наукова новизна. Отримані дані можуть бути використані для обґрунтування працездатної версії енергозощаджуючого технологічного процесу розкладання ільменітового концентрату. На підставі отриманих хімічних аналізів продуктів розкладання гідрофторуванням ільменіту встановлена відповідність отриманих продуктів вимогам до вихідних матеріалів ряду напрямків їх використання в металургії та медицині. Показана можливість інтеграції отриманих матеріалів як у існуючі виробничі схеми титанової та кремнієвої продукції, так і у забезпеченні сировинних потреб перспективних технологічних процесів.

Практична цінність. Показники чистоти одержаних продуктів підтверджують перспективи дослідженої інтеграції розглянутої технології в існуючі виробничі схеми одержання продуктів, що містять титан і кремній.

Ключові слова: концентрат, ільменіт, титан, гідрофторування, оксид титану, оксид кремнію.

Вступ

У роботі наведено аналіз зростання інтересу до титану та його хімічних сполук внаслідок їх фізико-хімічних та технологічних властивостей, які відповідають актуальним запитам промисловості та медицини сучасного суспільства. У роботі поставлена задача оцінювання практичної можливості розкладання ільменітового концентрату з використанням фториду амонію з отримання титан-, залізо- та кремній-вмісних продуктів відповідної якості. Актуальність дослідження визначена високим попитом на титан-вмісних продуктів при актуалізації нових вимог до діючих технологій по енергетиці, ефективності використання сировинних

ресурсів та екології. В роботі виконано критичний аналіз технологічних процесів переробки титановмісної сировини, що знайшли масштабне промислове застосування. Виконано аналіз стану розробки проблеми із відображенням проблем розвитку діючих технологій – насамперед, хлоридної технології отримання металеві титанової губки та титанового пігменту. Як альтернатива розглянута технологія фтораммонійного розкладання ільменіту. Пропозиції авторів по оцінках перспектив розглянутої технології базовані на результатах лабораторних досліджень розкладання ільменітового концентрату з використанням фториду амонію з виділенням титан-, залізо- та кремній-вмісних продуктів. Ступень вилучення цільових компонентів перевищує

можливості традиційних технологій широкого застосування. Одержана ступінь чистоти цільових компонентів відповідає параметрам, що забезпечують можливість їх застосування як у промисловості, так і в медицині. Виконано оцінювання можливості запропонованої технології до адаптації в існуючі схеми виробництва титан- та кремній-вмісних матеріалів, в інноваційній схемі розвитку виробництва для мінімізації витрат сировинних та енергетичних ресурсів.

Аналіз досліджень та публікацій

Найбільше практичне значення серед підприємств титанової галузі мають виробництва тетрахлориду титану ($TiCl_4$), діоксиду титану (TiO_2), металевого титану (губка, зливки, прокат, виливки, порошки) та феротитану. Феротитан в даному дослідженні не розглядається.

Переважає кількість сировини, що містить титан, використовується для виробництва діоксиду титану і ряду інших хімічних сполук на його основі. Споживачі – хімічна, харчова, фармацевтична, будівельна промисловості. На виробництво «компактного» металевого титану (зливки, електроди, листи, прокат, фасонне лиття) витрачається не більше 7–10 % сировини, яка містить титан. Основні споживачі – це авіаційна та космічна промисловість, суднобудування, машинобудування [1]. Об'єктивний інтерес до титану пояснюється унікальним поєднанням його фізико-хімічних властивостей. При цьому є значний потенціал можливостей зростання споживання, що забезпечується значними ресурсами сировини (вміст титану в земній корі становить 0,61 %) [2].

Вдосконалення технології з метою виведення її на критеріальні оцінки, які відповідають сучасним техніко-економічним та екологічним вимогам, зводиться до пошуку рішень щодо зменшення енерговитрат. Насамперед, слід виділити напрямки зниження температурних режимів процесів. Як системне рішення – переорієнтувати процеси на використання внутрішньої хімічної енергії реагентів.

Актуальність цієї задачі визначила низку напрямків оптимізації процесу отримання титану та сполук на його основі. Як найбільш актуальні виділяють способи прямого отримання порошків металевого титану з ільменітових концентратів. Слід зазначити, що незважаючи на перспективність цього напрямку, існує проблема введення інноваційних технологій у широку практику, що пояснюється значною капіталоемністю.

Роботи в інноваційному напрямку у світі велися і ведуться. Щодо України, то високий потенціал країни, можливості централізованих зусиль уряду щодо залучення інвестицій у сферу видобутку та переробки титану заблоковані війною [3].

Мета роботи

Мета роботи полягає в отриманні практичних результатів лабораторних досліджень розкладання ільменітового концентрату з використанням фториду амонію з виділенням титан-, залізо- і кремнійвмісних ком-

плексних солей та їх перетворення через гідрометалургійні процеси у відповідні оксиди, які визначені як товарний продукт.

Окрім того, надана оцінка можливості системної інтеграції розглянутого процесу в діючі промислові схеми виробництва, які мають широке поширення, та перспективні інноваційні технології.

Матеріал і методика досліджень

Схема представленого дослідження складається з двох частин: розкладання ільменіту за фтораммонійною технологією та гідрометалургійних процесів конверсії комплексних солей у відповідні оксиди титана, заліза, кремнію.

В дослідженнях використовувався сировинний компонент – ільменітовий концентрат Малишевського родовища (Вільногорський ГМК, Україна). Склад концентрату регламентований ТУ У 14-10-005-98. Склад концентрату, використаного у дослідженнях: 65,2 % TiO_2 , 1,7 % Al_2O_3 , 1,1 % SiO_2 . Середній розмір кристалів 70 мкм.

Як реагент використовувався твердофазний фторид амонію (NH_4F). Обрані режими ведення процесу забезпечують отримання цільових продуктів реакції у вигляді комплексних сполук титану і кремнію, фториду амонію, що не прореагував, та нерозчинної комплексної солі заліза [4].

Отримані у результаті реакцій фторування комплексні сполуки (фторометалати амонію та оксофторометалати амонію) мають фізико-хімічні характеристики, які дозволяють ефективно виконати їхню сепарацію. Технологічні прийоми перетворення названих продуктів на оксиди (TiO_2 , Fe_2O_3 , SiO_2) достатньо доступні та мають високу точність розподілу компонентів.

Реакція розкладання ільменіту ведеться або у розплаві комплексотворювача, або в його водному розчині [5]. Ступінь розкладання ільменіту при температурах вище 180 °C становить 98–99 % [5, 6]. Послідовність та режими перетворення отриманих продуктів, наступні процеси термообробки дозволяють одержувати порошки високої хімічної чистоти. Для діоксиду титану це 95–99,9 % та можливість керувати поліморфізмом діоксиду титану – отримуючи як анатаз, так і рутил (включаючи порошки пігментної якості) [6, 7].

Побічні продукти, отримані в результаті розкладання ільменіту, накопичуються в розчині продуктах реакції, або уловлюються на виході герметично закритого реактора, конденсуються, акумулюються в рідкій фазі і направляються на регенерацію у вигляді вихідних реагентів – фторидів амонію.

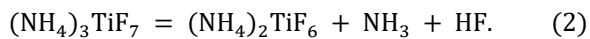
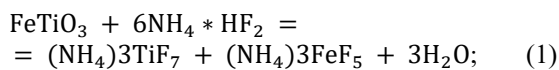
Розкладання ільменіту призводить до отримання комплексних солей і фторидів металів зі складу ільменіту та надає матеріальну базу реалізації паралельних термофізичних та гідрометалургійних процесів перетворення супутніх елементів у продукти, що мають товарне значення.

Насамперед, розглядаються залізо та кремній. Технологічна ефективність отримання кремнію у вигляді

оксиду відкриває можливості реалізації технології переробки багатих на кремнезем сировинних матеріалів шляхом знекремніювання. Суть процесу полягає у кратному підвищенні вмісту цільових кошових компонентів. Якість одержаних порошкових матеріалів оксиду кремнію по чистоті 98–99,998 % [6, 7] забезпечує перспективи їхнього широкого застосування у промисловості та у виробництві медичних препаратів та виробів [8].

В роботі реалізовано розкладання ільменіту. Як активний реагент-комплексоутворювач варіативно використовували фторид амонію (NH₄F), або гідрофторид амонію (NH₄*HF). Схема експерименту [7]: реалізація процесу розкладання концентрату ільменіту в лабораторних умовах, сепарація отриманих комплексних солей, отримання оксидів титану і супутніх елементів з оцінкою їх ступеня чистоти (рис. 1).

Витрати комплексоутворювача на процес визначаються із стохастичного співвідношення в реакціях розкладання ільменіту та термічного розкладання комплексної солі гептафторотитанату амонію на гексафторотитанат амонію, аміак та фтороводород:



При завантаженні NH₄*HF₂ береться з надлишком, величина якого визначається відповідно з компенсації випаровування комплексоутворювача.

Результати досліджень

Отриманий за реакцією (2) (NH₄)₂TiF₆ – гексафтортитанат амонію піддається гідрометалургійному про-

цесу додаткового очищення та виділення ГДТ (гідрат діоксиду титану) високої чистоти. При цьому утворюється кінцевий розчин, що містить фторид амонію. Кінцевий розчин піддають випаровуванню, забезпечуючи регенерацію фториду амонію для реверсу схеми розкладання ільменіту. Отримані в результаті лабораторних досліджень рішення, щодо послідовності та режимів процедур переходу від комплексних солей через ГДТ до діоксиду титану, значною мірою спрощують послідовність перетворень при забезпеченні скорочення енерговитрат. Термічна обробка ГДТ при температурі 900 °C протягом 60 хвилин призводить до утворення рутила. Зниження температури термічної обробки ГДТ до 450 °C (2,5 години) призводить до утворення анатазу.

В результаті отримують дисперсні порошки оксидів.

Як приклад, дисперсний порошок оксиду титану, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 2 – це продукт, отриманий без додаткового очищення від сполук тривалентних марганцю та заліза.

Хімічний склад визначався атомним спектральним аналізом.

На даному етапі відпрацьовані технологічні прийоми отримання продуктів із вмістом оксиду титану від 95 % до 98 %. Подальше відпрацювання технології має на меті стале отримання продукту з чистотою не менше 99,0–99,8 %.

Отримані супутні продукти – фтороферрати амонію, піддаються окислювальному пірогідролізу з утворенням оксиду заліза Fe₂O₃ з можливістю доведення його до якості залізооксидного пігменту (вміст діоксиду титану менше 4 % мас). Режими пірогідролізу визначають колірну гаму пігменту – червоний, коричневий.

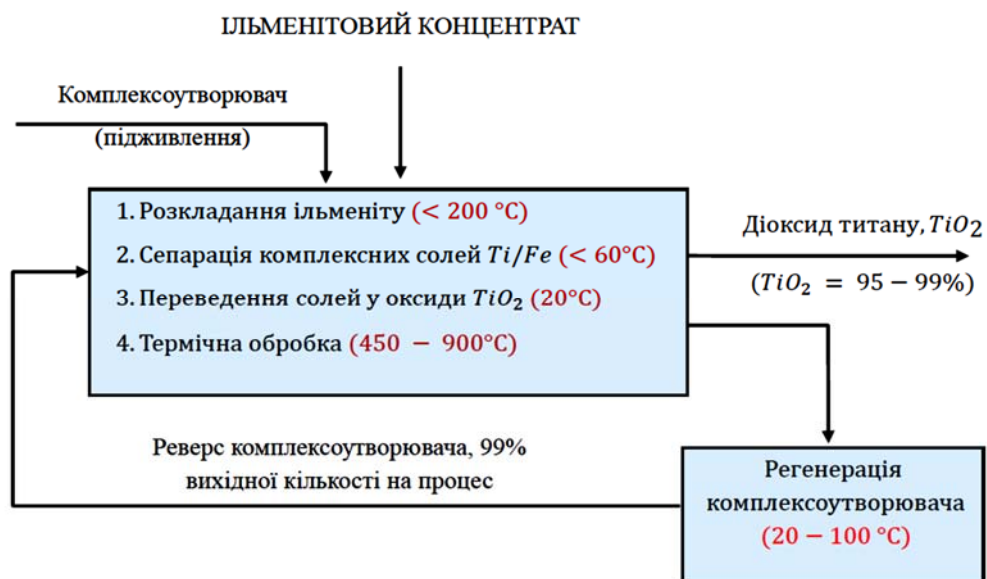


Рисунок 1. Принципова схема отримання діоксиду титану з використанням технології фторамонійного розкладання ільменіту



Рисунок 2. Порошок діоксида титану (98,29 % TiO₂, 0,92 % SiO₂)

Отриманий супутній продукт – гексафторсилікат амонію (NH₄)₂SiF₆ піддається аміачному осадженню з утворенням діоксида кремнію (SiO₂). Чистота продукту та дисперсні характеристики близькі до характеристик AEROSIL® компанії Evonik Industries AG (Німеччина) (середній розмір часток 5–40 нм, 99,8 %). Чистота продукту достатня для його використання в процесах отримання діоксида титану пігментної якості із вмістом діоксида титану 94–98 % і тетрахлориду титану TiCl₄ (99,999 %) для отримання губчастого титану магнійтермічним відновленням. Техніко-економічні показники процесу можуть бути покращені при відпрацюванні процесів по виділенню супутніх продуктів, таких як діоксид кремнію. Як приклад, отримання дисперсного порошку діоксида кремнію (рис. 3).



Рисунок 3. Порошок діоксида кремнію (98,0 % SiO₂, 0,07 % TiO₂)

Можливості технології фторамонійного розкладання ільменіту з одержанням високочистих дисперсних порошоків діоксида титану визначають перспективи впровадження у існуючі системи виробництва. Вдосконалення цих технологій може бути розширено вирішенням задачі прямого одержання порошоків металевого титану із порошоків його діоксида. Можливості адаптації технології до системи виробництва титанової продукції показано на рис. 4.

Рівень чистоти діоксида титану (95–99,9 %), дозволяє використовувати його в існуючих хлоридних схемах отримання діоксида титану пігментної якості та титанової губки через проміжну сполуку – тетрахлорид титану. Заміна титанового шлаку на порошокоподібну сировину з високою концентрацією діоксида титану забезпечує ефективність процесу хлорування, скорочуючи матеріальні та енергетичні витрати.

Адаптація запропонованого рішення в існуючі виробничі схеми одержання пігментного діоксида титану та титанової губки через тетрахлорид титану зберігає наявний потенціал отримання широкого спектру продукції.

Розглянута технологія надає фізико-хімічні можливості керувати процесом формування структури порошку та поліморфних перетворень діоксида титану з отриманням анатазу та рутила [9]. Діоксид титану рутильної модифікації доводиться до якості пігменту. Анатазна форма може бути використана, наприклад, як інноваційна фотокаталітична нанодобавка в екобетони [10].

Запропонована технологія надає можливості отримання високочистих порошоків діоксида титану і кремнію з орієнтацією на потреби фармакології [8, 11].

Техніко-економічний потенціал отримання діоксида титану за технологією фторамонійного розкладання концентрату ільменіту доповнюється можливістю отримання затребуваних супутніх речовин – оксидів заліза та кремнію.

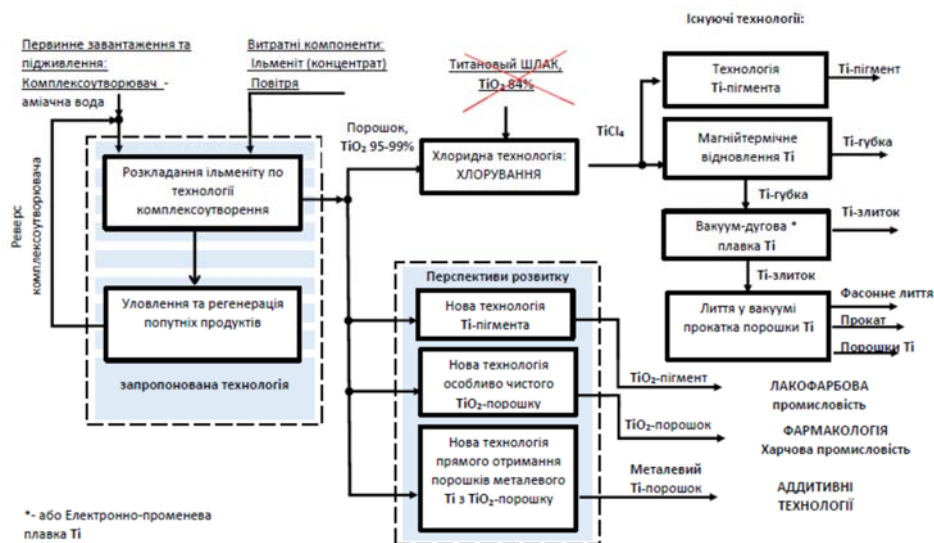


Рисунок 4. Адаптація запропонованої технології у існуючі системи виробництва титанової продукції

Зокрема, технологія отримання діоксиду кремнію (SiO₂) чистотою вище 99,998 % забезпечує його використання як аналог продукту AEROSIL AG (популярний продукт фірми Evonik Degussa AG) [12], і перспективного вихідного сировинного компонента у схемах виробництв напівпровідникового кремнію [13, 14].

Висновки

1. Розглянуто принципову схему отримання діоксиду титану за технологією фторамонійного розкладання ільменітового концентрату з подальшим поділом цільових компонентів (діоксиди титану, кремнію, заліза) та обґрунтовано техніко-економічний потенціал розвитку розглянутої технології.

2. Результати вимірювання кількісного вмісту оксидів цільових компонентів в отриманих продуктах розкладання концентрату ільменіту дозволяють розраховувати на перспективи ефективної адаптації розглянутого підходу в існуючі схеми отримання затребуваних титановмісних матеріалів.

3. Технологія отримання технічного діоксиду титану через комплексні проміжні сполуки забезпечує:

- перспективу відмови від енерговитратного та значного екологічного навантаження при виплавленні титанового шлаку;

- розкладання ільменіту у твердій фазі при невисоких температурах (не вище 220 °С);

- повну регенерацію комплексоутворювача з реверсом його на початок процесу, що зумовлює значну економічну та екологічну ефективність;

- розширення сировинної бази титанової галузі за рахунок залучення в переробку дешевшої сировини – ільменітових концентратів з невисоким (від 36 %) вмістом діоксиду титану;

- вирішення проблеми декарбонізації виробництва через виведення з технології деревинного вугілля, одночасно знижуючи постачання дорогих та дефіцитних компонентів;

- підвищення відсотків переробки сировини (вилучення діоксиду титану 92–95 %) з отриманням діоксиду титану високого ступеня чистоти від 95% до 99,9 % – залежно від вимог споживача.

4. Переваги технології:

- зменшення витрат на виробництво діоксиду титану не менше ніж в 1,5 рази (залежно від обсягів виробництва);
- зниження експлуатаційних та енерговитрат (на 30 млн. кВт-годин – при виробництві діоксиду титану до 10 тис. тон на рік);

- скорочення викидів до атмосфери вуглекислого газу (на 3 млн. тон – при виробництві діоксиду титану в 10 тис. тон на рік).

5. Отримання можливості керування параметрами діоксиду титану (поліморфізм, кількість домішок, розмір часток), що забезпечує можливість отримання продуктів, затребуваних у хімічній промисловості в рамках, як існуючих, так і у розвитку перспективних технологій (прямого відновлення титану з діоксиду).

Список літератури

1. Титан України [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://geoproject.com.ua/publ011.html> 1/4 (дата

звернення 22.12.2023).

2. Металлургия титана [Текст] / В. В. Сергеев, Н. В. Галицкий, В. П. Киселев, В. М. Козлов. – Металлургия, 1971. – 320 с.

3. Зеркало недели [Электронный ресурс] / Режим доступу: <https://zn.ua/ECONOMICS/ws-j-ukrainakhochet-postavljat-titan-v-ssha-vmesto-rossii-no-ej-meshajut-politika-i-vojna.html>.

4. Лабораторні дослідження процесу розкриття ільменітового концентрату за енергоефективною технологією із застосуванням фториду амонію [Текст] / Шевченко В. Г., Баженов Є. В., Попов С. М., Шалева Н. В. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2024. – № 1. – С. 41–46.

5. Раков, Е. Г. Особенности и реакции фторидов аммония. Успехи химии. [Текст] / Е. Г. Раков, О. И. Мельниченко О.И. – Вып. 9, 1984. – С. 1463–1492.

6. Способ переработки титансодержащего минерального сырья RU 2058408. С22В 34/12 / Мельниченко Е. И., Эпов Д. Г., Гордиенко П. С. и др. ; заявл. 15.06.1994 ; опубл. 20.04.1996.

7. Інноваційні технології в кольоровій металургії України – технологія розкриття ільменіту. [Текст]: Збірник наукових праць «Металургія» / Баженов Є. В., Скачков В. А., Метеленко Н. Г. И др. – 2023. – С. 51–61.

8. Медицинская химия и клиническое применение диоксида кремния [Текст]: монография / под ред. А. А. Чуйко / А. А. Чуйко, В. А. Тертых, В. В. Лобанов и др. – К. : Наукова думка, 2003. – 414 с. ISBN 966-00-0185-1.

9. Пирогидролиз в газовой фазе фтораммониевых солей титана RU 2 539 582 С1/ Алексейко Л. Н., Гончарук В. К., Масленникова И. Г. ; заявл. : 23.12.2013 ; опубл.: 20.01.2015.

10. Шкромата, О. И. Влияние мелкодисперсных добавок и пав на прочность и степень проницаемости бетона / Шкромата, О. И. – Сумской национальной аграрный университет, 2021. – 16 с. Режим доступа: <https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/7705/1/Влияние%20мелкодисперсных%20добавок.pdf>

11. Self-Cleansing Cement Matrix using Nano Titanium Dioxide / Fattah, K., Tamimi, A., Alkadi, A. et al. International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering (IJAMCE), 6 (1), 2019/ – P. 37–40. ISSN: 2394-2827.

Режим доступу: https://www.iraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/13-534-155617593837-40.pdf

12. Шварцман, Л. Я. Одержання колоїдного діоксиду кремнію (SiO₂) з кварцу [Текст] / Л. Я. Шварцман, Є. В. Баженов // Проблеми науково-технічної діяльності. – 2023. – № 1(25). – С. 37–43.

13. Баженов, Є. В. Кварцовий пісок – доступне недороге сировина для технологій електроніки та фотovoltaїки [Текст] / Є. В. Баженов, Т. В. Критська, М. К. Сукач // Underwater technologies: industrial and Civil Engineering. – 2022. – Iss. 12. – P. 63–67.

14. Баженов, Є. В. Кремній з піску – перспективна технологія отримання кремнію напівпровідникової якості / Є. В. Баженов, Т. В. Критська, М. К. Сукач // Transfer of Innovative Technologies. – 2022. – Vol. 5. – № 1.

Одержано 25.03.2024

EVALUATION OF THE FLUORAMMONIUM TECHNOLOGY OF DISCLOSURE OF ILMENITE WITH OBTAINING THE REQUIRED MATERIALS FOR INDUSTRY AND MEDICINE

- Shevchenko V. Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical and applied mechanics, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: shevawkw@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9037-6367
- Bazhenov E. Candidate of Technical Sciences, senior researcher of JSC "INSTITUT TITAN", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: bazeugen@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2889-788X
- Omelchenko O. Senior lecturer of the Department of Theoretical and applied mechanics, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: omelchenko15@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8925-4178
- Shaleva N. Assistant of the Department of Theoretical and applied mechanics, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: shaleva1711@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6571-0359

Purpose. Evaluation of the advantages of the innovative direction of obtaining the sought-after titanium and silicon oxides using the technology of hydrofluorination of ilmenite concentrates

Research methods. Evaluation of the quality of laboratory samples – products of hydrofluorination of ilmenite with regard to the possibility of integrating the obtained materials into existing production schemes for the production of current titanium and silicon products, as well as in providing raw materials for promising technological processes. Chemical analysis was carried out by the method of atomic spectral analysis. In the laboratory studies, the raw material component was used – ilmenite concentrate from the Malyshev deposit (Vilnohirsky MMC, Ukraine). A fluorine-containing complexing agent – ammonium fluoride (NH_4F) was used as a reagent. Laboratory studies of the decomposition of ilmenite in an aqueous solution of ammonium fluoride at temperatures not exceeding 200 °C were performed.

Obtained results. Determination of the temperature range and conditions for conducting the ilmenite decomposition process ensures its high productivity and obtaining products that are intermediate and the composition of which determines the content of the subsequent processes of obtaining the target products. Implementation of decomposition of ilmenite using reactions in the solid phase provides a high potential for environmental safety of the technology.

Scientific novelty. The obtained data can be used to justify a workable version of the energy-saving technological process of decomposition of ilmenite concentrate. Based on the obtained chemical analyzes of the decomposition products by hydrofluorination of ilmenite, the compliance of the obtained products with the requirements for the starting materials of a number of areas of their use in metallurgy and medicine was established. The possibilities of integration of the obtained materials into the existing production schemes of titanium and silicon products, as well as in providing the raw material needs of promising technological processes are shown.

Practical value. The indicators of the purity of the obtained products confirm the prospects of the researched integration of the considered technology into the existing production schemes for obtaining products containing titanium and silicon.

Key words: concentrate, ilmenite, titanium, hydrofluorination, titanium oxide, silicon oxide.

References

1. Titan of Ukraine (2023). <http://geoproject.com.ua/publ011.html> 1/4.
2. Sergeev, V. V., Metallurgy of titanium (1971). Publishing House "Metallurgy", 320.
3. Mirror of the week. Access mode: <https://zn.ua/ECONOMICS/wsj-ukraina-khochet-postavyat-titan-v-ssha-vmesto-rossii-no-ej-meshajut-politika-i-war.html>.
4. Shevchenko, V. G. (2024). Laboratory studies of the process of opening ilmenite concentrate using energy-efficient technology using ammonium fluoride. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 41–46.
5. Rakov, E. (1984). Features and reactions of ammonium fluorides. *Success in chemistry*, 1463–1492.
6. RU 2058408. C22B 34/12 (1996). Method of processing titanium-containing mineral raw materials. Submission of application: 15.06.1994. Date of publication of the patent: 04.02.1996.
7. Bazhenov, E. V. (2023). Innovative technologies in non-ferrous metallurgy of Ukraine – the technology of opening ilmenite. *Collection of scientific papers "Metallurgy"*, 51–61.
8. A. A. Chuyko (2003). *Medical chemistry and clinical use of silicon dioxide*. Kyiv : Naukova dumka, 414.
9. RU 2 539 582 C1 (2015). Pyrohydrolysis in the gas phase of fluoroammonium salts of titanium. Application submission: 12.23.2013. Date of publication of the patent: 20.01.2015.
10. Shkromada, O. I. (2021). Influence of finely dispersed additives and powders on the strength and degree of permeability of concrete. *Sumy National Agrarian University*, 16 p.
11. Fattah, K., Tamimi, A., Alkadi, A., Afaneh, M., Awada, M., Khalaf, A. (2019). Self-Cleansing Cement Matrix using Nano Titanium Dioxide. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering (IJAMCE)*, 6 (1), 37–40.
12. Shvartsman, L. (2023). Production of colloidal silicon dioxide (SiO_2) from quartz. *Problems of scientific and technical activity*, 37–43.
13. Bazhenov, E (2022). Quartz sand is an available and inexpensive raw material for electronics and photovoltaic technologies. *Underwater technologies: industrial and Civil Engineering*, 63–67.
14. Bazhenov, E. (2022). Silicon from sand is a promising technology for obtaining semiconductor-quality silicon. *Transfer of Innovative Technologies*, 29–44.