

**Баженов Євгеній Васильович**, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, АТ «ІНСТИТУТ ТИТАНУ», ORCID: 0000-0002-2889-788X

**Скачков Віктор Олексійович**, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4447-4641

**Метеленко Наталя Георгіївна**, професор, доктор економічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-6757-3124

**Воляр Роман Миколайович**, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-77299-0053

**Скидін Павло Валерійович**, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-5252-3452

## ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В КОЛЬОРОВІЙ МЕТАЛУРГІЇ УКРАЇНИ – ФТОРАММОНІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ РОЗКРИТТЯ ІЛЬМЕНІТУ

Стаття присвячена узагальненню об'єктивних передумов зацікавленості до металу титану, який уособлює унікальне поєднання фізико-хімічних властивостей за значних земних ресурсів сировини титану. Актуалізовано техніко-економічні критерії, що визначають темпи розповсюдження металу титану в інноваційних технологіях кольорової металургії, зокрема, енергоефективність та екологічність. Здійснено критичний аналіз сучасних технологій отримання металу титану, який включає визначення проблем технології отримання і подальшого використання металу титану; аналіз технологій отримання металу та похідних на його основі, які, у сукупності, поєднують і технології очищення проміжних матеріалів; оцінку недоліків хлорної технології поряд з її домінуванням у світі. Окреслено актуальність переходу від екстенсивних зусиль до революційних рішень розвитку технології отримання металу титану з метою вирішення триєдиного наукового завдання «оптимізація витрат на сировину – енергоефективність – екологічна зумовленість виробництва». Здійснено первинну оцінку фтораммонійної технології розкриття ільменіту в виробництві титану та титановмісних матеріалів, досліджено еволюційний шлях розвитку технології та окреслено перспективи її розвитку. Обґрунтовано принципову схему отримання діоксиду титану за технологією фтораммонійного розкриття ільменітового концентрату з наступним поділом цільових компонентів. Окреслено переваги та перспективи технологічного рішення запропонованого способу розкриття ільменітового концентрату і подальшої сепарації цільових компонентів з отриманням діоксиду титану і оксиду заліза. Доведено, що техніко-економічний потенціал запропонованого концептуального рішення підсилено за рахунок можливості отримання кремнійвмісних компонентів з перспективою отримання діоксиду кремнію високої чистоти. Доведено результати лабораторних досліджень у напрямку розвитку технології сепарації робіт з виділення кремній- і титановмісних компонент.

Ключові слова: титан, адитивні технології, хлорна технологія, фтораммонійна технологія, ільменітовий концентрат, екологічна безпека.

*Постановка проблеми у загальному вигляді.* Затребуваність металу титану визначена необхідністю задоволення запитів галузей промисловості, що забезпечують об'єктивні потреби існування та розвитку сучасного суспільства. Об'єктивна передумова величезної зацікавленості до металу титану – це унікальне поєднання його фізико-хімічних властивостей за значних земних ресурсів сировини (вміст у земній корі до 0,6 %).

Домінування титану за темпами розвитку споживання визначається затребуваністю стратегічних галузей для сучасних індустріально розвинених держав – військова сфера, насамперед авіація і ракетна техніка, космічна галузь, хімічна промисловість, металургія, машинобудування, медицина, будівництво. Так, метал титан володіє високою міцністю

при низькій вазі, що робить його унікальним матеріалом для виробництва літальних, космічних апаратів, автомобілів та інших конструкцій, де важливо враховувати вагу та необхідність її мінімізації; титан є високо стійким до корозії, що робить його високозатребуваним для хімічної та нафтової промисловості, а також для виробництва морських конструкцій; титан використовується для виробництва імплантатів через його біокомпатибельність (наскільки матеріал є безпечним і придатним для використання в біологічних системах без спричинення шкоди) та міцність; титан має унікальні фізичні властивості, відмінну міцність та корозійну стійкість для використання в атомній енергетиці, електроніці та в інноваційних технологіях. Очевидно, що зростання попиту на цей метал свідчить про його актуальність у сучасному технологічному світі. Таким чином, найважливіші техніко-економічні критерії, що визначають темпи поширення використання металу титану – це технологічність з погляду сучасних засобів його обробки та доступність з погляду вартості отримання металу; останнім часом також актуалізовані критерії щодо витрат енергії (енергоефективність) та екологічності (екологічна безпека).

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Накопичений світовий досвід – як позитивний, так і досвід негативних побічних ефектів у сфері суспільного виробництва, висуває нові вимоги до розвитку та вдосконалення. Досить висока складність і капіталомісткість виробництв, що використовуються на сьогодні в металургії та в хімічній промисловості, об'єктивно обмежують розвиток практичного застосування новітніх інноваційних технологій, які рухають суспільне виробництво вперед. Вдосконалення традиційних технологій, як правило, по своїй суті зводиться до масштабування та/або обов'язування технологічних об'єктів сучасними засобами контролю та управління, і це є шлях екстенсивного розвитку. Тому поява нових, значною мірою революційних із погляду сучасних критеріїв оцінки, технологій – є актуальним завданням сьогодення.

В останні роки питання перетворень в титановій галузі України незмінно впирається в проблему приватизації АТ «Об'єднана гірничо – хімічна компанія» – найбільшої державної компанії, яка володіє найбільшими родовищами титанових руд. Дійсно, стратегічна визначеність з долею найбільшого титанового державного активу впливає на галузь в цілому. Однак революційні зміни в технологіях виробництва титану, що відбулися в останні роки, мають не менш важливе і таке ж рішуче значення [1].

Понад 70 років Україна була сировинною базою для радянського титанового виробництва. Розробка Малишевського родовища титано-цирконієвих руд і Іршанських розсипів ільменіту дозволила забезпечити майже 100% потреб титанових заводів в Пермській (ПАТ «Корпорація ВСМПО-АВІСМА») та Східно-Казахстанській областях (АО «УКТМК»), а також єдиному в УРСР Запорізькому титано-магнієвому комбінатові (ТОВ «ЗТМК»). Після розпаду СРСР і розпаду радянської економіки основні виробники титанової продукції стали самостійно шукати шляхи виходу з економічної кризи і власне місце на світових ринках [1].

При всій важливості виробництва «компактного» металевого титану (зливки, електроди, листи, прокат, фасонне лиття, вироби за адитивною технологією) – як основи технологій машинобудування особливої важливості, на цей напрямок споживання титану сьогодні витрачається не більше 5 – 6% переробленої титановмісної сировини. Основні обсяги споживання титановмісної сировини покривають потреби в діоксиді титану та інших його хімічних сполук (споживачі – галузі промисловості хімічна, харчова, фармацевтична, будівельна та будівельних матеріалів).

Специфічна особливість титану полягає в тому, що всі його видатні фізико-хімічні характеристики можна досягти виключно при забезпеченні високої чистоти матеріалів, що містять титан. Саме ця особливість, яка значною мірою посилена високою хімічною активністю титану, визначає проблеми технології отримання та подальшого використання даного унікального металу.

Найбільш відомі процеси отримання металевого титану – процес Хантера з використанням натрію як відновника і процес Кролла з відновленням тетрахлориду титану магнієм (процес) [2].

Всі технології виробництва як металу титану, так і похідних на його основі, об'єднують технології очищення проміжних матеріалів і у сукупності являють собою замкнений цикл.

Саме ефективність процедури очищення проміжних продуктів титану зумовила традиційну широко поширену технологію на основі процесу Кролла. Це хлоридна технологія, яка застосовується практично на всіх великих титанових металургійних підприємствах. За цією ж технологією отримують високочистий хлорид титану, який використовується за технологією, що отримала пріоритетний розвиток, і спрямована на одержання пігментного двоокису титану шляхом “спалювання” хлориду титану в кисневій атмосфері.

Недоліки хлоридної технології полягають у її багатостадійності і в наявності дискретних процесів (магнійтермічне відновлення тетрахлориду титану, сепарація титанової губки), високої енерговитратності, невисоким рівнем використання реагентів (по хлору – не вище 70%) та екологічну проблематичність (отримання 1 т. металу веде до утворення до 100 м<sup>3</sup> хлоридних стічних вод і поповнення відвалів хлоровмісними електролітами, відпрацьованими сольовими шламами високої кислотності з рН < 3) з великими втратами у відвалах цінних компонентів (наприклад, рідкісних і рідкісноземельних металів).

Попри дедалі більше накопичення розуміння недоліків, хлоридна технологія зараз домінує у світі, навіть незважаючи на наявність альтернативних схем – сірчанокислотної, солянокислотної та ін. Вказані альтернативні технології також мають недоліки, які обмежують їх розповсюдження і мінімізують їх претензії на домінування у світовому масштабі. Але більш значуща причина використання хлоридної технології визначена інерцією, яка обумовлена традицією розвитку промислової інфраструктури, що задовольняє запити споживачів металу титану та похідних на його основі. Принципова зміна існуючої інфраструктури є процесом із значними витратами, який до цього часу замінювався лише за рахунок оптимізуючих коригувань технології та обладнання.

Об’єктивні зміни критеріїв оцінки процесу одержання титану визначають актуальність зміни підходу до розвитку, задаючи нові вимоги до технології, витрат ресурсів та урахування впливу на екологію.

Значною мірою актуальність переходу від екстенсивних зусиль до революційних рішень розвитку технології підкреслюється таким чинником – отримані вигоди удосконалення традиційної схеми дедалі частіше не компенсують сталої тенденції зростання витрат на забезпечення сировиною та енергією, витрат на задоволення екологічних обмежень.

У якості прикладу доцільно розглянути розвиток прогресивної схеми одержання кінцевих виробів за адитивною технологією з використанням металевих порошків з титану та інтерметалідів на його основі. Незважаючи на забезпечення ефективного використання металу на кінцевій операції адитивного формування виробу, ефективність цього способу обмежена високою вартістю порошків (десятки та сотні доларів за кілограм). Висока ціна є наслідком високовитратної багатостадійної схеми одержання металевих порошків (титанова губка, електронно-променева плавка металу з отриманням електродів, формування порошків) – що й визначає сумарний вихід не вище 5 – 7%. Наукове завдання полягає у синхронізації переваг нової, прогресивної технології з вартістю використовуваних у процесах витратних матеріалів – принципових рішень у рамках традиційних технологічних схем до сьогодні не існує.

У напрямку пошуку перспективної технологічної схеми – з погляду зазначених вище критеріїв – запропоновано до розгляду технологію фторидного способу переробки руд, що містять титан.

*Виділення невирішених науково-технічних завдань.* Початок робіт з фторидних технологій відноситься до другої половини ХХ століття [3 – 8]. Висока активність фтору та його сполук у поєднанні з накопиченим на той час технологічним досвідом роботи з фторидами урану (матеріал для реакторів) дозволили розпочати випробування та практичну реалізацію ефективних технологічно коротких, високопродуктивних, високоточних та з високою екологічною надійністю схем з розкриття титанових концентратів. Отримані у процесі розвитку фторидної технології варіанти її практичної реалізації дозволяють розглядати цей напрямок як перспективний в напрямку реалізації сформульованих критеріальних оцінок технології отримання титану [8–11].

Перспективи розвитку технології забезпечені значними світовими запасами основного джерела промислового отримання фтору – мінералу флюорит (плавиковий шпат),

який у 2020 році оцінений у 320 мільйонів тон (тобто закриває потреби світового споживання як мінімум на найближчі 200–250 років).

*Метою роботи є розробка принципової схеми виділення (отримання) діоксиду титану за технологією фтораммонійного розкриття ільменітового концентрату з наступним поділом цільових компонентів.*

*Виклад основного матеріалу.* До розгляду пропонується схема отримання діоксиду титану за технологією фтораммонійного розкриття ільменітового концентрату з наступним розподілом цільових компонентів. Отримані в результаті реакції розкладання кристалів ільменіту комплексні солі – фторометалати – конвертуються в оксиди цільових компонентів – діоксид титану ( $\text{TiO}_2$ ) та оксид заліза ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Супутні продукти реакцій регенеруються та реверсуються у початкові етапи процесу.

На рисунку 1 представлена принципова схема виділення (отримання) діоксиду титану за технологією фтораммонійного розкриття ільменітового концентрату. У якості основного активного реагенту застосовується твердофазний фторвмісний комплексоутворювач фторид амонію ( $\text{NH}_4\text{F}$ ). Вибір активного реагенту заснований на факті більш високої реакційної здатності порівняно з газоподібним фтороводнем ( $\text{HF}_g$ ), та іншими технологічними і екологічними перевагами. Реакція розкриття ільменітового концентрату здійснюється при температурах (варіанти режимів) від  $150^\circ\text{C}$  до  $220^\circ\text{C}$  у розплаві або розчині комплексоутворювача. Побічні продукти реакції у вигляді парогазової суміші (ПГС), яка не містить фтор-компоненти, евакуюються з реактора, уловлюються, конденсуються у воді, регенеруються з наступним реверсом у голову (первинний етап) процесу; фтор залишається у розплаві/розчині.

З рисунку зрозуміло, що запропонована принципова схема має таку потенційну перевагу: основний високоактивний елемент – фтор (F), що визначає особливі технологічні умови забезпечення процесу і що задає потенціал екологічної безпеки процесу, знаходиться або у твердофазних речовинах (початковий стан комплексоутворювача), або в розчині продуктів реакцій.

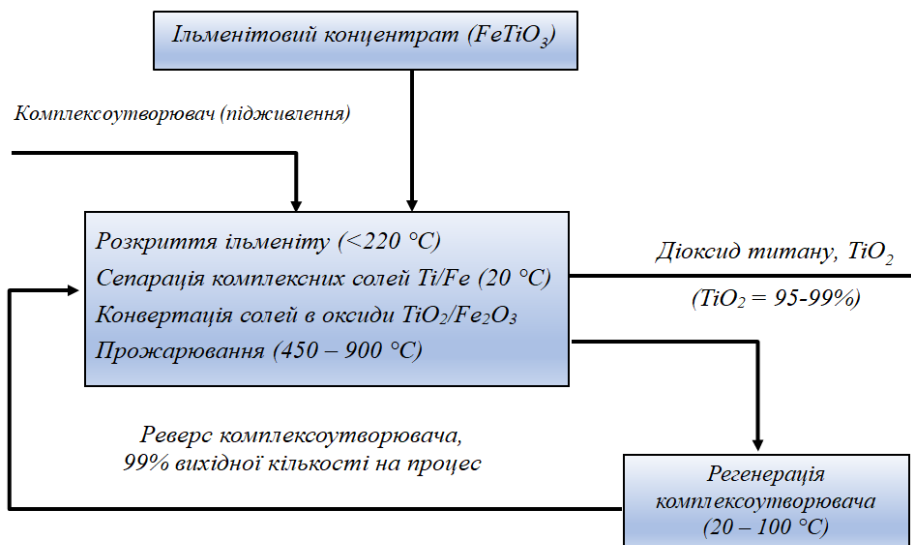


Рисунок 1 – Принципова схема виділення (отримання) діоксиду титану з використанням технології фтораммонійного розкриття ільменітового концентрату

Запропонований спосіб розкриття ільменітового концентрату і подальшої сепарації цільових компонентів з отриманням діоксиду титану та оксиду заліза дозволяє:

- зменшити енерговитрати на технологічні потреби;
- спростити ланцюг технологічного обладнання;
- зменшити екологічне навантаження відповідно кліматичних цілей [12] усунувши викиди вуглекислого газу, усунути відвали речовин, що мають високу екологічну небезпеку;



– гранично скоротити хіміко-екологічну небезпеку виробництва (агресивні фторвмісні компоненти не накопичуються в значних обсягах в газоподібному стані – виключно в локальних обсягах в реакторі протягом обмеженого часу евакуації із зони реакцій в систему конденсації, основні обсяги фторвмісних компонентів застосовуються в твердій фазі, у складі водних розчинів регенерації комплексоутворювача, у складі розплавів у локалізованому просторі реактора);

– отримати невисоку собівартість виробництва при високій якості одержуваної продукції;

– одержувані порошки діоксиду титану можуть бути інтегровані в традиційну схему виробництва продуктів, що містять титан (титанові пігменти, титанова губка) – надаючи широку існуючу промислову базу використання прогресивного більш дешевого і одержуваного з меншими екологічними проблемами витратного матеріалу (представлено на рис. 3);

– одержувані порошки діоксиду титану економічно ефективно можуть бути доведені до якості, що відповідає вимогам титанового пігменту (ДСТУ 9808-84).

Техніко-економічний потенціал концептуального підходу виділення (отримання) діоксиду титану за технологією фтораммонійного розкриття ільменітового концентрату визначає можливості забезпечення при високому вилученні корисних компонентів отримувати їх з невисоким вмістом домішкових компонентів, для діоксиду титану – чистотою 99,5 – 99,8% (вимоги ГОСТ 9808-84 щодо пігментного двоокису титану регламентує – 98%).

Нарощування потенціалу концептуального підходу визначено його універсальністю, зокрема, технологічними можливостями отримання кремнійвмісних компонентів, перспективність яких визначена можливістю отримання діоксиду кремнію ( $\text{SiO}_2$ ) чистотою 99,998 – 99,9999 % (для порівняння, чистота напівпровідникового кремнію сонячної якості складає 99,99% і 99,9999% електронної якості). Спектр робіт у цьому напрямку досить широкий, можна виділити використання діоксиду кремнію високої чистоти як вихідного матеріалу у виробництві кремнію напівпровідникової якості [13 – 14]; високодисперсного діоксиду кремнію як аналогу продукту AEROSIL AG (популярний продукт фірми Evonik Degussa AG) [15].

Апробацію процесу розтину ільменітового концентрату в лабораторних умовах виконано з використанням ільменітового концентрату Малишевського родовища (рис. 2).

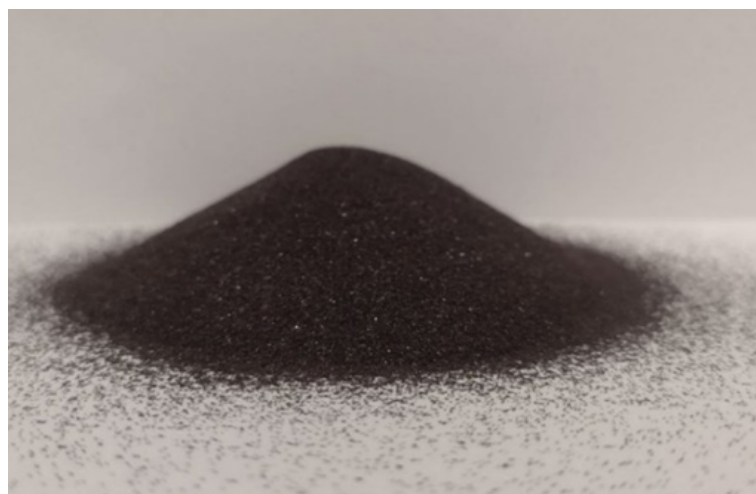


Рисунок 2 – Ільменітовий концентрат (65,2%  $\text{TiO}_2$ , 1,1%  $\text{SiO}_2$ ) Малишевське родовище, (Вільногірський ГМК, місто Вільногірськ, Україна)

Продукт розкриття ільменітового концентрату представлений на рис. 3.

Поділ отриманих комплексних солей виконувався послідовними процедурами вилуговування. Продукти, які отримані в результаті виконаних процедур, наведено на рис. 4.

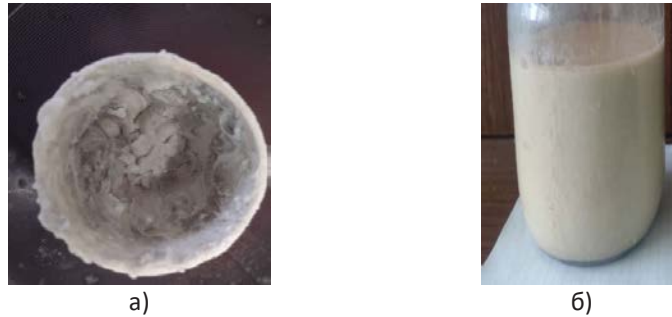


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд продукту розкриття концентрату ільменітового фторидом амонію (лабораторні зразки)  
 а – зразок, отриманий при веденні процесу у розплаві комплексоутримувача;  
 б – зразок, отриманий при веденні процесу у водному розчині комплексоутворювача

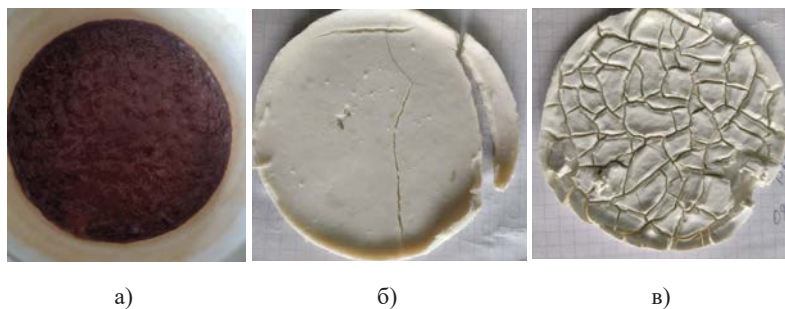


Рисунок 4 – Візуалізація одержаних зразків компонентів продукту розкриття ільменітового концентрату  
 а – компонент, що містить залізо; б – компонент, що містить титан;  
 в – компонент, що містить кремній

На початкових етапах лабораторного дослідження за умов організаційного забезпечення та фінансової підтримки Офіційного представництва в Україні Міжнародного Інформаційного Нобелівського Центру та ТОВ «Венчурні технології» (м. Дніпро) було виявлено елементи недосконалості процесу виділення (отримання) діоксиду титану за технологією фтораммонійного розкриття ільменітового концентрату, що призвело до появи непрореагованого концентрату і скрапу. З метою розвитку технологічної схеми сепарації виконані роботи з виділення кремній-, залізо-, та титановмісних компонент. Кількісне оцінювання (вимірювання) цільових елементів в отриманих продуктах на первинному етапі дослідження наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Кількісне вимірювання вмісту цільових компонентів у отриманих зразках продуктів розкриття ільменітового концентрату

Компонента	Ti	TiO <sub>2</sub>	Si	SiO <sub>2</sub>
Продукт, що містить титан	51,8	86,3%	5,9%	12,6%
Продукт, що містить кремній	3,0%	4,9%	43,2%	92,5%

*Висновки.* Запропоновано концептуальний підхід (принципова схема) виділення (отримання) діоксиду титану за технологією фтораммонійного розкриття ільменітового концентрату з наступним поділом цільових компонентів та обґрунтовано потенційні переваги та техніко-економічний потенціал розвитку запропонованої технології.

Результати кількісного вимірювання вмісту цільових компонентів у отриманих продуктах розкриття ільменітового концентрату дають змогу здійснювати розвиток технології виділення діоксиду титану з метою розробки у подальшому безперервного процесу розкриття ільменіту з отримання діоксиду титану з властивостями, які забезпечують застосування у промисловому виробництві титанового пігменту та металевих порошків титану.

**Бібліографічний перелік**

1. Метал нової України: випередити час та замкнути цикл. URL: <https://www.unian.ua/economics/other/metal-novoji-ukrajini-viperedzhaye-chas-i-zamikaye-cikl-12068193.html> (дата звернення: 12.11.2023).
2. Matthew R. Earlam. Extractive Metallurgy of Titanium. Conventional and Recent Advances in Extraction and Production of Titanium Metal. Book 2020, P. 97 – 112.
3. Рабинович Е. Химия урана. Москва : Издательство иностранной литературы, 1954. С. 192-199.
4. Carlson<sup>1</sup> O. N., Schmidt<sup>1</sup> F. A. and Wilhelm<sup>1</sup> H. A. Preparation of Zirconium and Hafnium Metals by Bomb Reduction of Their Fluorides. Journal of The Electrochemical Society, 1954. Volume 104, Number 1.
5. Галкин Н.П., Судариков Б.Н., Верятин У.Д., Шишков Ю.Д., Майоров А.А. Технология урана / Под ред. Н.П. Галкина, Б.Н. Сударикова. Атомиздат, 1964. 310 с.
6. Раков Э. Г., Ягодин Г. А. Фториды в технологии редких металлов : учеб. пособие. Москва : Изд-во Моск. хим.-технол. ин-та им. Д. И. Менделеева, 1980. 60 с.
7. Раков Э. Г. Физико-химические основы фторидной металлургии: Дис. ... докт. хим. наук. Москва, 1980. 385 с.
8. Червоний І.Ф., Листопад Д.А. Альтернативные технологии производства титана. *Металлургия*, 2010. Випуск 22. С. 15-26.
9. Процесс прямого производства циркаллой. Перевод с англ. Атомная техника за рубежом, 1969. № 4. 16 с.
10. Раков Э.Г., Мельниченко Е.И. Свойства и реакции фторидов аммония. *Успехи химии*, 1984. Вып. 9. с. 1463 – 1492.
11. US 20180030575 A1. METHOD FOR PREPARING RUTILE FROM ACID-SOLUBLE TITANIUM SLAG. Подача заявки: 2015-05-15. Публикация: 2018-02-01.
12. Кліматичні цілі та українська промисловість: модернізуйся або програй. URL: <https://easoaction.org.ua/klimatychni-tsili-ta-uaprom.html>.
13. Баженов Е.В., Критская Т.В., Сукач М. К. Кварцовый песок – доступна недорого сировина для технологій електроніки та фотовольтаніки. *Underwater technologies: industrial and Civil Engineering*, 2022. Iss.12. P. 63 – 67.
14. Баженов Е.В., Критская Т.В., Сукач М. К. Кремний из песка – перспективная технология получения кремния полупроводникового качества. *Transfer of Innovative Technologies*, 2022. Vol.5. №1. P. 29 – 44.
15. Шварцман Л.Я., Баженов Е.В. Одержання колоїдного діоксиду кремнію (SiO<sub>2</sub>) з кварцу. *Проблеми науково-технічної діяльності*, 2023. №1 (25). С.37-43.

**References**

1. The metal of the new Ukraine: to be ahead of time and close the cycle. URL: <https://www.unian.ua/economics/other/metal-novoji-ukrajini-viperedzhaye-chas-i-zamikaye-cikl-12068193.html> (access date: 11.12.2023).
2. Matthew R. Earlam. Extractive Metallurgy of Titanium. Conventional and Recent Advances in Extraction and Production of Titanium Metal. Book 2020, P. 97 – 112.
3. E. Rabyonovych. Uranium chemistry. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1954. P. 192-199.
4. Carlson<sup>1</sup> O. N., Schmidt<sup>1</sup> F. A. and Wilhelm<sup>1</sup> H. A. Preparation of Zirconium and Hafnium Metals by Bomb Reduction of Their Fluorides. Journal of The Electrochemical Society, 1954. Volume 104, Number 1.
5. Galkin N.P., Sudarikov B.N., Veryatyn U.D., Shishkov Y.D., Mayorov A.A. Uranium technology / Ed. N.P. Galkina, B.N. Sudarikova. Atomizdat, 1964. 310 p.
6. Rakov E. G., Yagodin G. A. Fluorides in the technology of rare metals: учеб. allowance Moscow: Izd-vo Moscow. chemical technology in-ta named D. I. Mendeleeva, 1980. 60 p.
7. Rakov E. G. Physico-chemical foundations of fluoride metallurgy: Diss. ... Dr. chemical of science Moscow, 1980. 385 p.
8. Chervony I.F., Listopad D.A. Alternative technologies of titanium production. *Metallurgy*, 2010. Issue 22. P. 15-26.
9. Process of direct production of zircalloy. Translation from English Nuclear technology abroad, 1969. No. 4. 16 p.
10. Rakov E.G., Melnychenko E.I. Properties and reactions of ammonium fluorides. Successes in chemistry, 1984. Vol. 9. p. 1463 - 1492.
11. US 20180030575 A1. Method for preparing rutile from acid-soluble titanium slag. Application submission: 2015.05.15. Publication: 2018.02.01.

12. Climate goals and Ukrainian industry: modernize or lose. URL: <https://ecoaction.org.ua/klimatychni-tsili-ta-uaprom.html>.

13. Bazhenov E.V., Kritskaya T.V., Sukach M.K. Quartz sand is an affordable raw material for electronics and photovoltaic technologies. Underwater technologies: industrial and civil engineering, 2022. Iss. 12. R. 63-67.

14. Bazhenov E.V., Kritskaya T.V., Sukach M.K. Silicon from sand - a promising technology for obtaining semiconductor quality silicon. Transfer of Innovative Technologies, 2022. Vol.5. No. 1. R. 29-44.

15. Shvartsman L.Ya., Bazhenov E.V. Production of colloidal silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) from quartz. Problems of scientific and technical activity, 2023. No. 1 (25). P. 37-43.

**Bazhenov Yevgeny**, senior researcher, candidate of technical sciences, TITAN INSTITUTE JSC, ORCID: 0000-0002-2889-788X

**Skachkov Viktor**, Professor, doctor of technical sciences, Zaporizhia national university, ORCID: 0000-0002-4447-4641

**Metelenko Natalya**, professor, doctor of economic sciences, Zaporizhia national university, ORCID: 0000-0002-6757-3124

**Volyar Roman**, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhia national university, ORCID: 0000-0002-77299-0053

**Skidin Pavlo**, graduate student, Zaporizhia national university ORCID: 0000-0003-5252-3452

#### **INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE NON-FERROUS METALLURGY OF UKRAINE – FLUORAMMONIUM TECHNOLOGY FOR THE DISCOVERY OF ILMENITE**

The article is devoted to the generalization of the objective prerequisites of interest in titanium metal, which represents a unique combination of physical and chemical properties with significant earthly resources of titanium raw materials. The technical and economic criteria determining the rate of spread of titanium metal in innovative technologies of non-ferrous metallurgy, in particular, energy efficiency and environmental friendliness, have been updated. A critical analysis of modern technologies for obtaining titanium metal has been made, which includes the identification of problems in the technology for obtaining and further use of titanium metal; analysis of technologies for obtaining metal and derivatives based on it, which, in aggregate, combine technologies for cleaning intermediate materials; assessment of the shortcomings of chlorine technology along with its dominance in the world. The relevance of the transition from extensive efforts to revolutionary solutions for the development of technology for obtaining titanium metal has been outlined in order to solve the triune scientific task «optimization of costs for raw materials – energy efficiency – environmental conditioning of production». An initial assessment of the fluoroammonium technology for the opening of ilmenite in the production of titanium and titanium-containing materials has been made, the evolutionary path of the technology's development has been investigated, and the prospects for its development has been outlined. The principal scheme of obtaining titanium dioxide by the technology of fluoroammonium opening of ilmenite concentrate with subsequent separation of the target components has been substantiated. The advantages and prospects of the technological solution of the proposed method of opening the ilmenite concentrate and subsequent separation of the target components to obtain titanium dioxide and iron oxide has been outlined. It has been proven that the technical and economic potential of the proposed conceptual solution is enhanced due to the possibility of obtaining silicon-containing components with the prospect of obtaining silicon dioxide of high purity. The results of laboratory research towards the development of technology for the separation of works on the isolation of silicon- and titanium-containing components have been proven.

Key words: titanium metal, additive technologies, chlorine technology, fluorine-ammonium technology, ilmenite concentrate, environmental safety.

Стаття надійшла до редакції 01.12.2023 р.