

УДК 536.722:542.61:546.32:549.641.23

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-7\(35\)-935-946](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-7(35)-935-946)

Писаренко Сніжана Василівна доктор філософії з галузі Хімічна та біоінженерія, асистент кафедри хімії, вчитель хімії Наукового ліцею, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська, 40, м. Житомир, 10008, <https://orcid.org/0000-0002-5978-487X>

Камінський Олександр Миколайович кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, вчитель хімії вищої категорії Наукового ліцею, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська, 40, м. Житомир, 10008, <https://orcid.org/0000-0003-1971-8437>

Денисюк Роман Олександрович кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська, 40, м. Житомир, 10008, <https://orcid.org/0000-0003-3077-3795>

Анічкіна Олена Василівна кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська, 40, м. Житомир, 10008, <https://orcid.org/0000-0003-4843-0707>

Євдоченко Олена Сергіївна доктор філософії з галузі Освіта/ Педагогіка, доцент кафедри хімії, вчитель хімії Наукового ліцею, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська, 40, м. Житомир, 10008, <https://orcid.org/0000-0001-6338-5372>

Авдєєва Ольга Юрїївна доктор філософії з галузі Освіта/ Педагогіка, доцент, доцент кафедри хімії, вчитель хімії вищої категорії Наукового ліцею, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська, 40, м. Житомир, 10008, <https://orcid.org/0000-0001-6550-0776>

ТЕРМОДИНАМІКА РЕАКЦІЇ ОДЕРЖАННЯ НАТРІЙ ТИТАНАТУ СПОСОБОМ ЛУЖНОГО ВИЛУГОВУВАННЯ ІЛЬМЕНІТУ

Анотація. У роботі досліджено термодинаміку реакції одержання натрій титанату способом лужного вилуговування ільменіту Іршанської групи родовищ натрій гідроксидом. Це дослідження є важливим для глибшого розуміння хімічних процесів, що лежать в основі вилуговування ільменіту, а

також для оцінки можливостей впровадження цього процесу у промислове виробництво. Основну увагу приділено аналізу термодинамічних параметрів, таких як ентальпія, ентропія та енергія Гіббса, які є ключовими для оцінки енергетичної вигідності реакції.

Методом Тьомкіна-Шварцмана було обраховано зміну енергій Гіббса при різних температурах в ході хімічної реакції вилуговування ільменіту. Отримані значення енергії Гіббса дозволили зробити висновок про те, що реакція між ільменітом та натрій гідроксидом є енергетично вигідною, що підвищує ймовірність її протікання без додаткових енергетичних затрат. Це відкриває можливості для ефективного використання даного методу у промислових умовах.

Рентгенографічні дослідження, проведені у рамках роботи, показали, що ільменіт Іршанського родовища має високий вміст титан діоксиду, що пов'язано з наявністю дефектів на поверхні мінеральної сировини. Ці дефекти сприяють більш інтенсивному вилуговуванню і підвищенню ефективності процесу. Встановлено, що наявність дефектів на поверхні ільменіту полегшує взаємодію з натрій гідроксидом, що є важливим фактором для підвищення загальної ефективності процесу.

Результати дослідження термодинамічних параметрів та рентгенографічного аналізу дозволяють зробити висновок про високу ймовірність успішного промислового застосування процесу вилуговування ільменіту з метою отримання натрій титанату. Це відкриває нові можливості для ефективного використання ільменітової сировини, зниження енергетичних витрат та підвищення виходу кінцевих продуктів, що є важливим для хімічної промисловості та суміжних галузей.

Крім того, у статті наведено порівняльний аналіз різних методів вилуговування, що дозволяє визначити оптимальні умови для максимального виходу натрій титанату. Визначено, що застосування лужного вилуговування не лише сприяє зниженню енергетичних витрат, але й забезпечує екологічну безпеку процесу, зменшуючи утворення побічних продуктів та забруднюючих речовин.

Таким чином, отримані результати можуть бути використані для розробки нових технологій переробки ільменітової руди, що має велике значення для підвищення ефективності та стійкості виробничих процесів у гірничо-хімічній промисловості. Запропонований метод має потенціал стати основою для створення більш ефективних та екологічно безпечних технологій одержання титанатів.

Ключові слова: ільменіт, лужне вилуговування, натрій титанат, ентальпія, ентропія, енергія Гіббса.

Pysarenko Snizhana Vasylivna Doctor of Philosophy Degree Field of Study Chemical and bioengineering, Assistant Lecturer of the Department of Chemistry, teacher of chemistry at the Scientific Lyceum, Zhytomyr Ivan Franko State University, st. Velika Berdychivska, 40, Zhytomyr, 10008, <https://orcid.org/0000-0002-5978-487X>

Kaminskyi Oleksandr Mykolaiovych Candidate of Chemical Sciences (Ph. D.), an associate professor, an associate professor of the Chemistry department, teacher of chemistry at the Scientific Lyceum, Zhytomyr Ivan Franko State University, 40, Velyka Berdychivska Str., Zhytomyr, 10008, <https://orcid.org/0000-0003-1971-8437>

Denysiuk Roman Oleksandrovyh Candidate of Chemical Sciences (Ph. D.), an associate professor, an associate professor of the Chemistry department, Zhytomyr Ivan Franko State University, 40, Velyka Berdychivska Str., Zhytomyr, 10008, <https://orcid.org/0000-0003-3077-3795>

Anichkina Olena Vasylivna Candidate of Pedagogic Sciences (Ph. D.), an associate professor, Head of the Chemistry department, Zhytomyr Ivan Franko State University, 40, Velyka Berdychivska Str., Zhytomyr, 10008, <https://orcid.org/0000-0003-4843-0707>

Yevdochenko Olena Serhiyivna Doctor of Philosophy in the field of Education/ Pedagogy, associate professor of the Department of Chemistry, teacher of chemistry at the Scientific Lyceum, Zhytomyr Ivan Franko State University, st. Velika Berdychivska, 40, Zhytomyr city, 10008, <https://orcid.org/0000-0001-6338-5372>

Avdieieva Olga Yuriivna Doctor of Philosophy in the field of Education/ Pedagogy, an associate professor, an associate professor of the Chemistry department, teacher of chemistry at the Scientific Lyceum, Zhytomyr Ivan Franko State University, 40, Velyka Berdychivska Str., Zhytomyr, 10008, <https://orcid.org/0000-0001-6550-0776>

THERMODYNAMICS OF THE SODIUM TITANATE REACTION BY ALKALINE LEACHING OF ILMENITE

Abstract. The thermodynamics of the reaction of obtaining sodium titanate by the method of alkaline leaching of ilmenite of the Irshansk group of deposits with sodium hydroxide was investigated in the work. This study is important for a deeper understanding of the chemical processes underlying the leaching of ilmenite, as well as for evaluating the possibilities of introducing this process into industrial production. The main attention is paid to the analysis of thermodynamic parameters, such as enthalpy, entropy and Gibbs energy, which are key to evaluating the energy efficiency of a reaction.

The Tiomkin-Schwartzman method was used to calculate the change in Gibbs energies at different temperatures during the chemical reaction of ilmenite leaching. The obtained Gibbs energy values made it possible to conclude that the reaction between ilmenite and sodium hydroxide is energetically beneficial, which increases the probability of its occurrence without additional energy costs. This opens up possibilities for effective use of this method in industrial conditions.

X-ray studies carried out as part of the work showed that the ilmenite of the Irshan deposit has a high content of titanium dioxide, which is associated with the presence of defects on the surface of the mineral raw material. These defects contribute to more intensive leaching and increase the efficiency of the process. It was established that the presence of defects on the surface of ilmenite facilitates the interaction with sodium hydroxide, which is an important factor for increasing the overall efficiency of the process.

The results of the study of thermodynamic parameters and X-ray analysis allow us to conclude that there is a high probability of successful industrial application of the ilmenite leaching process in order to obtain sodium titanate. This opens up new opportunities for efficient use of ilmenite raw materials, reducing energy costs and increasing the yield of final products, which is important for the chemical industry and related industries.

In addition, the article provides a comparative analysis of various leaching methods, which allows determining the optimal conditions for the maximum yield of sodium titanate. It was determined that the use of alkaline leaching not only contributes to the reduction of energy costs, but also ensures the environmental safety of the process, reducing the formation of by-products and pollutants.

Thus, the obtained results can be used for the development of new technologies for processing ilmenite ore, which is of great importance for increasing the efficiency and sustainability of production processes in the mining and chemical industry. The proposed method has the potential to become the basis for creating more efficient and environmentally safe technologies for obtaining titanates.

Keywords: ilmenite; alkaline leaching; sodium titanate; enthalpy; entropy; Gibbs energy

Постановка проблеми. Сполуки титану мають різноманітні застосування в багатьох галузях промисловості завдяки своїм унікальним фізичним, хімічним та біологічним властивостям [1,2].

Включення калій титанату в структуру композиту алюмінієвого сплаву покращує механічні властивості [3], волокноподібні кристали підвищують теплоізоляційні властивості вуглецевих піно матеріалів [4]. Крім того, калій титанат використовується як зносостійкий матеріал у гальмівних колодках, в якості фотокаталітичного агента в реакціях розкладу води та барвників [5,6].

Літій титанат використовується для виготовлення літій-іонних батарей [7–9]. Плюмбум, цинк та вісмут титанати є діелектриками, п'єзоелектриками та проявляють магнітні властивості [10–12].

Натрій титанат покращує остеоінтеграцію та остеоіндукцію *in vivo*, що запобігає розшаруванню під час закручування та підвищує стабільність зубного імплантату [13], крім того, широко досліджується як перспективний анодний матеріал для іонно-натрієвих акумуляторів [14,15]. Натрій титанат шаруватої структури використовується для видалення іонів важких металів з води, що є досить актуальним в наш час через активні бойові дії, що ведуться на території нашої країни [16]. Також, за рахунок високої адсорбційної активності натрій титанат є потенційним субстратом для приготування високоякісних антибактеріальних засобів.

Солі титану різноманітного складу традиційно синтезують методом прожарювання при температурах реакції від 500 до 900 °С [12-15]. Вихідними реагентами зазвичай в таких реакціях виступають титан діоксид та відповідний гідроксид. Основним недоліком традиційних методів є висока температура реакції, крім того використання титан діоксиду в якості вихідного реагенту збільшує стабільність одержання відповідного титанату.

Таким чином, проблема одержання титанатів різного складу та будови полягає у оптимізації процесу та підвищення його ефективності за рахунок детального вивчення термодинамічних параметрів реакції та їх впливу на кінетичні характеристики процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одержання титантів різного складу є метою багатьох сучасних досліджень через досить широке коло їх використання. Автори [14] одержують натрій титанат складу $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ з тетрабутилтитанату та 10 М водного розчину NaOH змішували в автоклаві з нержавіючої сталі за температури 200 °С протягом 12 годин. Готовий білий осад промивали деіонізованою водою до значення рН 7.

В роботі [15] в якості вихідної сировини використано титан діоксид та натрій карбонат, які попередньо просушували протягом 20 годин за температури 373 К для видалення вологи. Суміш вихідних речовин з мольним співвідношенням 1:3 подрібнювали і перемішували в агатовій ступці протягом 1 години, а потім прожарювали за температури 1173 К в атмосфері повітря протягом 20 годин.

Для одержання натрій титанату автори [17] використали розчин натрій гідроксиду та титанілсульфату. Суміш вихідних реагентів перемішували магнітною мішалкою протягом 2 годин, її температура піднялася від 0 °С до кімнатної температури.

Вихідними реагентами для одержання натрій титанату в роботі [18] є металічний натрій, який розчинили в рідкому аміаку та титан діоксид, який додають після розчинення металу. Після цього ємність з розчином герметизу-

вали (для запобігання впливу повітря та вологи) і поміщали в піч, попередньо нагріту до 400 °С. Потім піч нагрівали до 900 °С і витримували при цій температурі 30 хв. Після закінчення процесу контейнер охолоджували до кімнатної температури, а отриманий продукт промивали дистильованою водою.

Мета статті – дослідження термодинамічних параметрів одержання натрій титанату способом лужного вилуговування ільменіту натрій гідроксидом.

Виклад основного матеріалу. Дослідження основних термодинамічних параметрів реакції є надзвичайно важливим для кількох ключових аспектів, зокрема, розуміння термодинамічних параметрів, таких як ентальпія, ентропія та вільна енергія Гіббса, дозволяє теоретично спрогнозувати умови проведення експериментальних досліджень за яких процес буде найефективнішим.

Крім того, термодинамічні дані є основою для моделювання та оптимізації промислових процесів. Знання про те, як змінюються термодинамічні параметри при різних умовах, дозволяє розробляти більш ефективні та економічно вигідні технології вилуговування. Це сприяє зниженню витрат на енергію та реагенти, а також підвищенню виходу цільових продуктів. Таким чином, вивчення термодинамічних параметрів реакції лужного вилуговування ільменіту натрій гідроксидом має ключове значення для покращення наукового розуміння, економічної ефективності, екологічної безпеки та інноваційного розвитку в цій галузі.

В роботі досліджено ільменітовий концентрат Іршанської групи родовищ. За результатами електронної мікроскопії з рентгеноспектральним елементним мікроаналізом на електронному мікроскопі “JSM – 6490 LV” з енергодисперсійним (EDS) та хвиледисперсійним (WDS) спектрометрами “EnergyPlus” (“OxfordInstruments”) встановлено, що зразки ільменіту мають високий вміст титану, який становить близько 79 % в перерахунку та титан діоксид.

На рис. 1 зображено SEM фотографію зразку ільменіту.

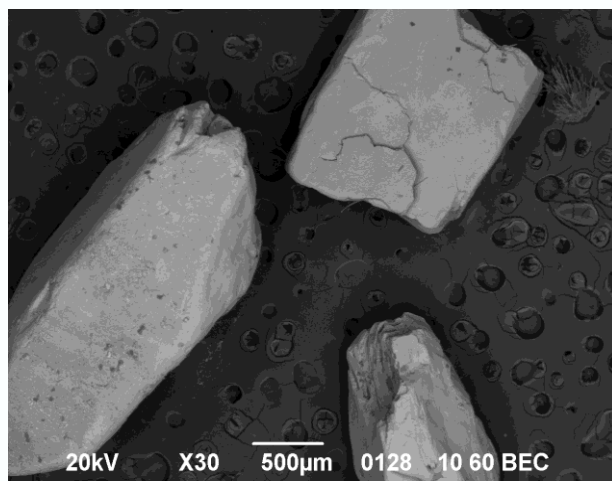


Рис. 1 SEM фотографія зразку ільменіту

Як видно з рис. 1 мінеральна сировина має неоднорідну поверхню, значну кількість тріщин та дефектів за рахунок яких, ільменіт Іршанської групи родовищ має унікальний склад.

За допомогою рентгенфазового аналіз з використанням рентгенівського дифрактометра ДРОН-3М (випромінювання міді, лінія K α , $\lambda = 0,1540$ нм) підтверджено структуру вихідного ільменітового концентрату (рис. 2).

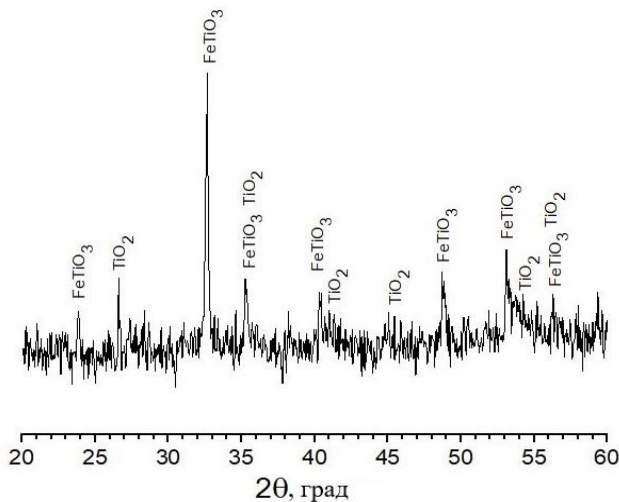
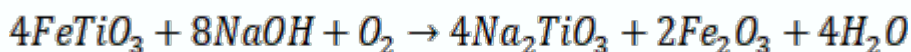


Рис. 2 Дифрактограма ільменітового концентрату

Використовуючи програмне забезпечення «MATCH!3» на дифрактограмі (рис. 2) ідентифіковано основні рефлекси FeTiO₃, які знаходяться при 23,80; 32,52; 35,25; 48,71 та 53,03° 2 θ кутах. Крім того, виявлено фазу TiO₂ при 26,52; 35,25; 41,20; 54,30 та 56,60° 2 θ кутах.

Одержання натрій титанату складу Na₂TiO₃ способом лужного вилугування ільменіту натрій гідроксидом описується рівнянням:



З метою встановлення можливості самочинного перебігу реакції розраховано основні термодинамічні функції стану системи (ΔG , ΔH , ΔS тощо).

Стандартну теплоту утворення (ентальпію) розраховано з використанням емпіричний метод М. Ле Вана, який базується на використанні формули [10]:

$$\Delta H_{298}^0 = n \cdot A + m \cdot C + (2m)^2 + n^2, \quad (1)$$

де n та m – кількість аніонів (TiO₃²⁻) та катіонів (Na⁺) у молекулі Na₂TiO₃; A і C – постійні для аніона (–795,45 кДж/моль) та катіона (–369,57 кДж/моль) [106].

Використовуючи дані стандартних значень термодинамічних величин ΔH_{298}^0 , ΔS_{298}^0 для реакцій вилугування ільменіту натрій гідроксидом, проведено розрахунки ентальпії та ентропії за законом Гесса.

Розрахунок зміни енергії Гіббса проводили з використанням методу Тьомкіна-Шварцмана, відповідно до формули з діапазоном температур 468-698 К:

$$\Delta G^0 = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0 - T \int_{298}^T \frac{dT}{T^2} \int_{298}^T \Delta C_p dT \quad (2)$$

Залежність теплоємності від температури описується рівнянням степеневого ряду за формулою:

$$\Delta C_p = \Delta a + \Delta b \cdot T - \Delta c' \cdot T^{-2}, \quad (3)$$

де Δa , Δb , $\Delta c'$ – коефіцієнти, розраховані для рівняння реакції вилугування відповідно до закону Гесса за 298 К.

Останній член правої частини рівняння (2) з врахуванням рівняння (3) розраховували за формулою:

$$T \int_{298}^T \frac{dT}{T^2} \int_{298}^T \Delta C_p dT = \Delta a M_0 + \Delta b M_1 + \Delta c M_{-2}, \quad (4)$$

де M_0 , M_1 та M_{-2} – коефіцієнти, що залежать від температури, які в свою чергу були обраховані за формулами (5–7):

$$M_0 = \ln \frac{T}{298} + \frac{298}{T} - 1 \quad (5)$$

$$M_1 = \frac{1}{2T} (T - 298)^2 \quad (6)$$

$$M_{-2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T} \right)^2 \quad (7)$$

Одержані розрахункові дані наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Термодинамічні характеристики реакцій вилугування ільменіту натрій гідроксидом за стандартних умов (298 К)

ΔH_{298}^0 кДж/моль	ΔS_{298}^0 Дж/моль·К	ΔG_{298}^0 кДж/моль	Δa	$\Delta b \cdot 10^3$	$\Delta c' \cdot 10^{-5}$
-331,64	292,80	-418,94	658,13	-695,36	-186,97

Таким чином, сукупність термодинамічних параметрів (негативне значення ΔH та позитивне значення ΔS) свідчить про те, що процес вилугування

ільменіту натрій гідроксидом є енергетично вигідним. Ці дані вказують на те, що реакція має високу ймовірність протікання без додаткових енергетичних затрат, що є важливим для промислових застосувань, де оптимізація енергетичних витрат є ключовим фактором.

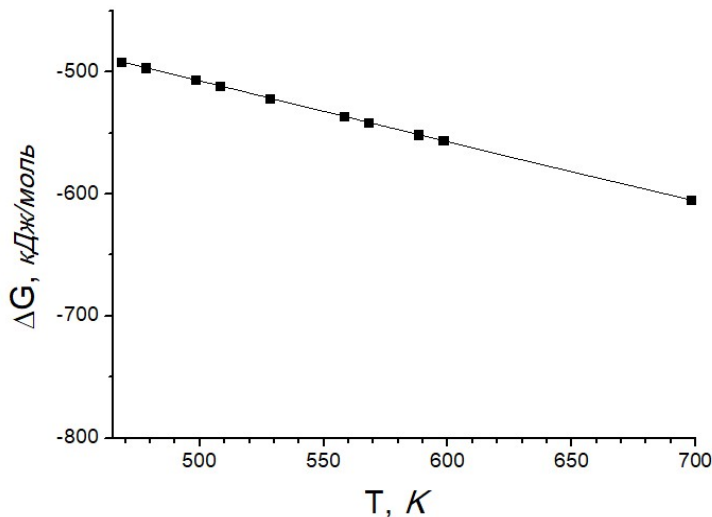


Рис. 3 Залежність енергії Гіббса реакції вилуговування ільменіту натрій гідроксидом від температури нагрівання

Дані, що наведені на рис.1, чітко демонструють, що підвищення температури нагрівання плавів у діапазоні 468-698 К сприяє зменшенню вільної енергії Гіббса і, відповідно, збільшенню вірогідності протікання реакцій вилуговування ільменіту натрій гідроксидом. Це свідчить про те, що реакція стає більш енергетично вигідною і може протікати самочинно при вищих температурах. Досліджені параметри мають важливе значення для промислового впровадження та оптимізації процесів, забезпечуючи підвищення ефективності та зменшення енергетичних витрат.

Висновки. У роботі проаналізовано термодинаміку процесу отримання натрій титанату методом лужного вилуговування ільменіту з Іршанської групи родовищ натрій гідроксидом. За допомогою методу Тьомкіна-Шварцмана були розраховані зміни енергій Гіббса при різних температурах в ході реакції вилуговування ільменіту.

Отримані дані підтвердили, що взаємодія ільменіту з натрій гідроксидом є енергетично вигідною і має високу ймовірність протікання без додаткових енергетичних затрат. Це означає, що реакція може відбуватися спонтанно при заданих умовах, що є значущим для зниження енергетичних витрат у промисловому процесі. Додатково, рентгенографічні дослідження показали, що ільменіт з Іршанського родовища має високий вміст титан діоксиду завдяки наявності дефектів на поверхні мінеральної сировини, що підвищує ефективність вилуговування.

Результати дослідження підтвердили високу ймовірність успішного промислового впровадження процесу вилуговування ільменіту для отримання натрій титанату. Це відкриває нові можливості для ефективного використання ільменітової сировини, зменшуючи енергетичні витрати і збільшуючи вихід кінцевих продуктів. Така оптимізація має важливе значення для хімічної промисловості та суміжних галузей, оскільки дозволяє підвищити економічну ефективність виробництва та знизити його екологічний вплив.

Дослідження також підкреслило необхідність подальшого вивчення термодинамічних аспектів лужного вилуговування ільменіту для інших типів реагентів і умов процесу. Це сприятиме розробці нових технологій і вдосконаленню існуючих методів вилуговування з використанням природних ресурсів.

Література:

1. Shih S.-J., Tzeng W.-L. Manipulation of morphology of strontium titanate particles by spray pyrolysis. *Powder Technology*. 2014. Vol. 264. P. 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.056>
2. Potassium titanate as heterogeneous catalyst for methyl transesterification / E. A. Z. González et al. *Powder Technology*. 2015. Vol. 280. P. 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.030>
3. Thermal and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Composite Reinforced with Potassium Hexatitanate Short Fiber / K. Asano et al. *MATERIALS TRANSACTIONS*. 2015. Vol. 56, no. 1. P. 160–166. <https://doi.org/10.2320/matertrans.m2014284>
4. The mechanical and thermal insulating properties of resin-derived carbon foams reinforced by K₂Ti₆O₁₃ whiskers / R. Luo et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528, no. 4-5. P. 2023–2027. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.10.106>
5. Synthesis, characterization and photocatalytic evaluation of potassium hexatitanate (K₂Ti₆O₁₃) fibers / M. A. Escobedo Bretado et al. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, no. 24. P. 12470–12476. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06>
6. Photocatalytic destruction and adsorptive processes of methylene blue by potassium titanate / S. Pysarenko et al. *Materials Today: Proceedings*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.476>
7. Improved electrochemical performances derived from synergistic titanium dioxide and iron titanate porous nanohybrids serving as lithium-ion battery anodes / S. Wang et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 714. P. 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.257>
8. Redox synthesis of poly (p-phenylenediamine)-reduced graphene oxide for the improvement of electrochemical performance of lithium titanate in lithium-ion battery anode / B. Rajagopalan et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 709. P. 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.166>
9. Mechanochemical-hydrothermal synthesis of layered lithium titanate hydrate nanotubes at room temperature and their conversion to Li₄Ti₅O₁₂ / S. Suzuki et al. *Materials Research Bulletin*. 2017. Vol. 90. P. 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.02.011>
10. Giant electrocaloric effect in lead zinc niobate titanate single crystal / Z. Zhu et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 710. P. 297–301. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.288>
11. Dielectric properties of iron doped calcium copper titanate, CaCu_{2.9}Fe_{0.1}Ti₄O₁₂ / A. K. Rai et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 509, no. 36. P. 8901–8906. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.06.008>

12. Study of magnetic and magnetoelectric measurements in bismuth iron titanate ceramic– $\text{Bi}_8\text{Fe}_4\text{Ti}_3\text{O}_{24}$ / A. Srinivas et al. *Materials Research Bulletin*. 2004. Vol. 39, no. 1. P. 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2003.09.028>

13. Nanoporous hydroxyapatite/sodium titanate bilayer on titanium implants for improved osteointegration / A. Carradò et al. *Dental Materials*. 2017. Vol. 33, no. 3. P. 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.12.013>

14. Solvothermal synthesis of $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ nanowires embedded in 3D graphene networks as an anode for high-performance sodium-ion batteries / Z. Zhou et al. *Electrochimica Acta*. 2016. Vol. 211. P. 430–436. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.06.036>

15. Dissolution behavior of sodium titanates in sulfuric acid and applications to the separation of TiO_2 from titanium-containing slag / M. Jiao et al. *Separation and Purification Technology*. 2024. P. 128070. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128070>

16. Magnetic sodium titanate nanotubes for simultaneous recovery of multiple low-level heavy and radioactive metal ions / O. H. Radwan et al. *Inorganic Chemistry Communications*. 2024. Vol. 167. P. 112773. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112773>

17. Highly efficient eco-friendly sodium titanate sorbents of Cs(I), Sr(II), Co(II) and Eu(III): synthesis, characterization and detailed adsorption study / M. Motlochová et al. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 743–754. <https://doi.org/10.1039/d3ra05663e>

18. Synthesis of mixed-phase sodium titanates and their activity in visible-light driven reduction of carbon dioxide / O. Shtyka et al. *Catalysis Communications*. 2022. P. 106462. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2022.106462>

References:

1. Shih, S.-J., & Tzeng, W.-L. (2014). Manipulation of morphology of strontium titanate particles by spray pyrolysis. *Powder Technology*, 264, 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.056>

2. González, E. A. Z., et al. (2015). Potassium titanate as heterogeneous catalyst for methyl transesterification. *Powder Technology*, 280, 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.030>

3. Asano, K., et al. (2015). Thermal and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Composite Reinforced with Potassium Hexatitanate Short Fiber. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 56(1), 160–166. <https://doi.org/10.2320/matertrans.m2014284>

4. Luo, R., et al. (2011). The mechanical and thermal insulating properties of resin-derived carbon foams reinforced by $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ whiskers. *Materials Science and Engineering: A*, 528(4-5), 2023–2027. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.10.106>

5. Escobedo Bretado, M. A., et al. (2019). Synthesis, characterization and photocatalytic evaluation of potassium hexatitanate ($\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$) fibers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(24), 12470–12476. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.021>

6. Pysarenko, S., et al. (2022). Photocatalytic destruction and adsorptive processes of methylene blue by potassium titanate. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.476>

7. Wang, S., et al. (2017). Improved electrochemical performances derived from synergistic titanium dioxide and iron titanate porous nano hybrids serving as lithium-ion battery anodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 714, 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.257>

8. Rajagopalan, B., et al. (2017). Redox synthesis of poly (p-phenylenediamine)-reduced graphene oxide for the improvement of electrochemical performance of lithium titanate in lithium-ion battery anode. *Journal of Alloys and Compounds*, 709, 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.166>

9. Suzuki, S., et al. (2017). Mechanochemical-hydrothermal synthesis of layered lithium titanate hydrate nanotubes at room temperature and their conversion to $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. *Materials Research Bulletin*, 90, 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.02.011>

10. Zhu, Z., et al. (2017). Giant electrocaloric effect in lead zinc niobate titanate single crystal. *Journal of Alloys and Compounds*, 710, 297–301. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.288>
11. Rai, A. K., et al. (2011). Dielectric properties of iron doped calcium copper titanate, $\text{CaCu}_2.9\text{Fe}_{0.1}\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(36), 8901–8906. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.06.008>
12. Srinivas, A., et al. (2004). Study of magnetic and magnetoelectric measurements in bismuth iron titanate ceramic– $\text{Bi}_8\text{Fe}_4\text{Ti}_3\text{O}_{24}$. *Materials Research Bulletin*, 39(1), 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2003.09.028>
13. Carradò, A., et al. (2017). Nanoporous hydroxyapatite/sodium titanate bilayer on titanium implants for improved osteointegration. *Dental Materials*, 33(3), 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.12.013>
14. Zhou, Z., et al. (2016). Solvothermal synthesis of $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ nanowires embedded in 3D graphene networks as an anode for high-performance sodium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 211, 430–436. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.06.036>
15. Jiao, M., et al. (2024). Dissolution behavior of sodium titanates in sulfuric acid and applications to the separation of TiO_2 from titanium-containing slag. *Separation and Purification Technology*, 128070. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128070>
16. Radwan, O. H., et al. (2024). Magnetic sodium titanate nanotubes for simultaneous recovery of multiple low-level heavy and radioactive metal ions. *Inorganic Chemistry Communications*, 167, 112773. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112773>
17. Motlochová, M., et al. (2024). Highly efficient eco-friendly sodium titanate sorbents of Cs(I), Sr(II), Co(II) and Eu(III): synthesis, characterization and detailed adsorption study. *RSC Advances*, 14(1), 743–754. <https://doi.org/10.1039/d3ra05663e>
18. Shtyka, O., et al. (2022). Synthesis of mixed-phase sodium titanates and their activity in visible-light driven reduction of carbon dioxide. *Catalysis Communications*, 106462. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2022.106462>