



ЭОЖ 669.292.2

DOI: 10.31643/2021/6445.33



FTAMP 53.37.91, 31.15.3

Recovery of niobium from wastes generated in titanium production by cation exchange sorbents

¹Baigenzhenov O. S., ¹Toishybek A. M., ^{1*}Khabyeyev A. T., ²Aimbetova I.O., ³Dagubayeva A.T.

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

² Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University

³ RSE «National Center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan»

* Corresponding author email: a.khabyeyev@satbayev.university

ABSTRACT

This article presents the technology of niobium recovery by processing of chloride residues generated during the chlorination of titanium slags. For waste processing, a two-stage leaching technology is proposed. Water is used at the first stage of leaching and hydrochloric acid 4.0 M is used at the second stage. For the purpose of sorption of niobium from the solution composition obtained during leaching, cation-exchange sorbents Purolite-C104 and KU-2-8 H were used. By the usage of Purolite-C104 ion exchange resin the sorption efficiency of niobium from a solution with a concentration of 2 g/l was about 71.0 % (0.071 g/g) in 3.5 hours, while for KU-2-8 H ion exchange resin, sorption efficiency was about 89.0 % (0.089 g/g).

Keywords: chloride wastes, leaching, niobium sorption, cation exchange sorbents.

Received: 25 May 2021

Peer reviewed: 14 July 2021

Accepted: 17 August 2021

Information about authors:

Baigenzhenov Omirserik Sabyrzhonovich

Doctor Ph.D., Assoc. Professor. Non-commercial joint-stock company "Satbayev University", the department "Metallurgical processes, heat engineering and technology of special materials", Almaty, Republic of Kazakhstan <https://orcid.org/0000-0001-5803-7680>. E-mail: o.baigenzhenov@satbayev.university

Toishybek Azamat Magauiyayuly

Ph.D. student. Non-commercial joint-stock company "Satbayev University", the department "Metallurgical processes, heat engineering and technology of special materials", Almaty, Republic of Kazakhstan, <https://orcid.org/0000-0002-7431-0103>. E-mail: A.Toishybek@stud.satbayev.university

Khabyeyev Alibek Talgatbekovich

Doctor Ph.D., Assoc. Professor. Non-commercial joint-stock company "Satbayev University", the department "Metallurgical processes, heat engineering and technology of special materials", Almaty, Republic of Kazakhstan, <https://orcid.org/0000-0001-9397-2367>. E-mail: a.khabyeyev@satbayev.university

Aimbetova Indira Orazgaliyevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the International Kazakh-Turkish University named after Khoja Ahmed Yasawi, Turkestan, Kazakhstan, 0000-0002-9060-0813, E-mail: science@ayu.edu.kz

Dagubayeva Assel Toktarovna

Master of Technical Sciences, junior researcher, RSE «National Center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan», Almaty, Republic of Kazakhstan, <https://orcid.org/0000-0002-2675-0577>. E-mail: omir_asel_88@mail.ru

Титан өндірісінің қалдықтарынан ниобийді катион алмасушы сорбенттер көмегімен бөліп алу

¹Байгенженов О.С., ¹Тойшыбек А.М., ^{1*}Хабиев А.Т., ²Аймбетова И.О., ³Дагубаева А.Т.

¹ Сәтбаев Университет, Алматы, Қазақстан

² Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті

³ Қазақстан Республикасының минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу ұлттық орталығы РМК, Алматы, Қазақстан

* Автордың электрондық поштасы: a.khabyeyev@satbayev.university

<p>Алынған: 25 мамыр 2021 Сараптама жасалды: 14 шілде 2021 Қабылданған: 17 тамыз 2021</p>	<p>ТҮЙІНДЕМЕ</p> <p>Мақалада титан шлактарын хлорлау процесінде түзілетін хлорлық қалдықтарды өңдеу арқылы ниобий концентратын алу технологиясы сипатталған. Қалдықтарды өңдеу үшін екі сатылы шаймалау технологиясы ұсынылады, шаймалаудың бірінші сатысында су қолданылса, екінші сатыда 4,0 М тұз қышқылы қолданылады. Шаймалау процесінде алынған ерітінді құрамынан ниобийді сорбциялау мақсатында Purolite-C104 және KU-2-8 Н катион алмасушы сорбенттері қолданылды. Purolite-C104 ион алмасу шайырын қолдану кезінде 2 г/л концентрациялы ерітіндіден ниобий сорбциясының көрсеткіші 3,5 сағатта 71,0 % (0,071 г/г) шамасында болса, KU-2-8 Н ион алмасу шайыры қолданылғанда бұл көрсеткіш 89,0 % (0,089 г/г) шамасында болды.</p> <p>Түйін сөздер: хлоридті қалдықтар, шаймалау, ниобий сорбциясы, катион алмасу сорбенттері.</p>
<p>Байгенженов Өмірсерік Сабыржанұлы</p>	<p>Авторлар туралы ақпарат: <i>Doctor Ph.D., қауымд.проф. «Сәтбаев университеті», «Металлургиялық процестер, жылу техникасы және арнайы материалдар технологиясы» кафедрасы, Алматы, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0001-5803-7680. E-mail: o.baigenzhenov@satbayev.university</i></p>
<p>Тойшыбек Азамат Мағауияұлы</p>	<p><i>Ph. D. докторант, «Сәтбаев университеті», «Металлургиялық процестер, жылу техникасы және арнайы материалдар технологиясы» кафедрасы, Алматы, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0002-7431-0103. E-mail: A.Toishybek@stud.satbayev.university</i></p>
<p>Хабиев Алибек Талғатбекұлы</p>	<p><i>Doctor Ph.D., қауымд.проф. «Сәтбаев университеті», «Металлургиялық процестер, жылу техникасы және арнайы материалдар технологиясы» кафедрасы, Алматы, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0001-9397-2367. E-mail: a.khabiyev@satbayev.university</i></p>
<p>Аимбетова Индира Оразғалиевна</p>	<p><i>Техника ғылымдарының кандидаты, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университетінің ассоц.профессоры, Түркістан, Қазақстан, 0000-0002-9060-0813, E-mail: science@ayu.edu.kz</i></p>
<p>Дағубаева Асел Токтаровна</p>	<p><i>Техника ғылымдарының магистрі, «Қазақстан Республикасының минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі ұлттық орталығы» РМК, кіші ғылыми қызметкер, Алматы, Қазақстан Республикасы, https://orcid.org/0000-0002-2675-0577. E-mail: omir_asel_88@mail.ru</i></p>

Кіріспе

Ниобий - жер қыртысындағы массасы $2 \cdot 10^{-3}$ % құрайтын, балқу температурасы жоғары металл [1, 2]. Әлемдегі өндірілетін ниобийдің 90 %-ға жуығы болат өндірісі үшін пайдаланылады. Сонымен қатар, ниобийді ракета құрастыру, ғарыш және әуе техникаларында, атом энергетикасында, радиотехникада, электроникада және химиялық өндірісте кеңінен пайдаланады.

Ниобийдің 150-ден астам минералдары белгілі. Ниобий металының маңызды ерекшелігі – физика-химиялық қасиеті титанға жақындығы және титанмен гетеровалентті изоморфизмге қабілеттілігі болып табылады. Бұл титанмен бірге кездесетін ниобий минералдарының түзілуіне, сонымен қатар титан минералдарында ниобий қоспаларының пайда болуына себеп болады. Техникалық-әдеби деректерге сәйкес, ниобий өндірісіне экономикалық тиімді болып саналатын тек екі минералдық топ бар, олар титанониобаттар танталониобаттар) [2, 3]. Сол себепті, титан минералдары және титан өндірісінің қалдықтары ниобий өндірісінің негізгі шикізат көздерінің бірі болып табылады [3, 4, 5].

Қазақстанда титан концентраттарын өңдеу үшін магний термиялық тотықсыздандыруға негізделген Кроль әдісі қолданылады. Аталған әдісті қолдану барысында көп мөлшерде қалдық түзіледі, титанның 1 тоннасын өндіру барысында шамамен 2 тоннадай хлоридті қалдықтар түзіледі. Осыған байланысты, хлорид қалдықтарын залалсыздандыру қажеттілігі туындайды [6,7]. Әртүрлі хлоридтік қалдықтар (пайдаланылған электролиттер, балқымалар, шламдар) қалдықтар полигонына лақтырылып, шикізат ретінде қолданылмайтындықтан қоршаған ортаға зиянын тигізеді. Бұл қалдықтардың зиянын нақтырақ түсіндіру үшін келесідей мысал келтіруге болады: титан хлораторларының қалдықтық балқымаларының сумен қатынасы 1:2 мөлшерінде шаймалағанның өзінде алынатын ерітіндінің рН-ы 1.0-1.2 мөлшеріндегі қышқыл ерітінділер алынады. Осыдан кейін-ақ табиғи жағдайда мыңдаған тонна қалдықтардың үстіне жауатын жаңбыр мен қар суларының әсерінен түзілетін қышқыл ерітінділердің зиянын шамалауға болады.

Титан өнеркәсібінің қалдықтарын кешенді қайта өңдеу мәселесі – ұзақ уақыттан

бері талқыланып келеді. Қалдықтарды ниобий өндірісінің шикізаты ретінде пайдалану бағыты үлкен қызығушылық тудырады. Себебі, құрамында ниобийдің жеткілікті мөлшері бар титан өндірісінің қалдықтары беттік қабатта кездеседі және суда жақсы ериді. Аталған маңызды сипаттамалар өндірістің өзіндік құнының төмендеуіне әкеледі. Осыған байланысты титан - өндірісінің қалдықтарын

қайта өңдеу - перспективті және өзекті бағыт болып табылады.

Ниобийді өндіру процесінде тұндыру [8] және экстракциялау әдістері қолданылады [9, 10]. Бірақ, ниобийді шаймалау процесінің ерітінділерінен тұндыру және экстракциялау әдістері арқылы бөліп алу қымбат және тиімсіз әдістер. Сондықтан, ниобийді ерітінділерден сорбция әдісімен бөліп алу процесі - басқа әдістермен салыстырғанда үлкен маңызға ие.

Ионалмасу процестерінің арзандығы, селективтілігі [11], сияқты артықшылықтарына байланысты ол ниобийді бөліп алу үшін қолайлы әдіс болып саналады. Ион алмасу процестерін экстракциямен салыстырғанда фазалардың бөліну барысында ешқандай қиындықтар болмайтындықтан және үшінші фаза түзілмейтін артықшылықтарына байланысты ерітіндідегі концентрациясы төмен металдарды бөліп алу үшін өте тиімді әдіс болып есептеледі. Сорбциялық процестердің аталған артықшылықтарына байланысты, әдісті титан өндірісінің қалдықтарынан ниобий өндіру мақсатында зерттеу қажеттілігі туындайды.

Ниобийді сорбциялау бойынша жүргізілген көптеген зерттеу жұмыстарының басым бөлігінде модельдік ерітінділер қолданылады [12]. Сондықтан, ондай зерттеулердің көпшілігі өндірісте шектеулі қолданылады, себебі өндірісте алынған шаймалау процесінің ерітінділері құрамы бойынша күрделі және бірнеше металл иондары мен басқа ластаушы заттардан тұрады. Сол себептен ниобийді алу үшін сорбциялық

процестің қолданылу аясын көрсету мақсатында, нақты шаймалау ерітінділерін қолдануға қатысты зерттеулер жүргізу қажет. Туындаған осындай қажеттіліктерге байланысты, титан өндірісінің қалдықтарынан ниобийді катион алмасушы сорбенттермен сорбциялау қарастырылып, зерттелетін сорбенттер ретінде Purolite-C104 және KU-2-8 ион алмасу сорбенттері таңдалды. Процеске әсер ететін ерітінді концентрациясы мен уақыт сияқты әртүрлі жүйелік параметрлердің әсері зерттеліп, нәтижелері талқыланды.

Қолданылған материалдар

Зерттеу жұмыстарында ниобийдің шикізаты ретінде титан өндірісінің қалдықтық балқымалары қолданылды. Қалдықтық материалдар құрамындағы компоненттердің басым бөлігі хлоридтік формада кездеседі. Шаймалау процесінің алдында таңдалған сынамаға химиялық талдау жұмыстары жүргізіліп құрамындағы металл-элементтердің пайыздық мөлшері анықталды. Химиялық талдау жұмыстарының нәтижесі төмендегі 1-кестеде көрсетілген. Қалдық құрамындағы негізгі элементтер ретінде натрий, калий, көміртегі, темір және кремнийді атауға болады. Бастапқы қалдық құрамындағы ниобий мөлшері 0.009 %-ды құрады.

Шаймалау және сорбция процестерінен кейін алынған ерітінділер құрамындағы ниобий концентрациясы «КазФерроСталь» ЖШС-де қолданылатын, элементтерді талдауға арналған iCAP 7000 Series ICP спектрометрі арқылы талданды.

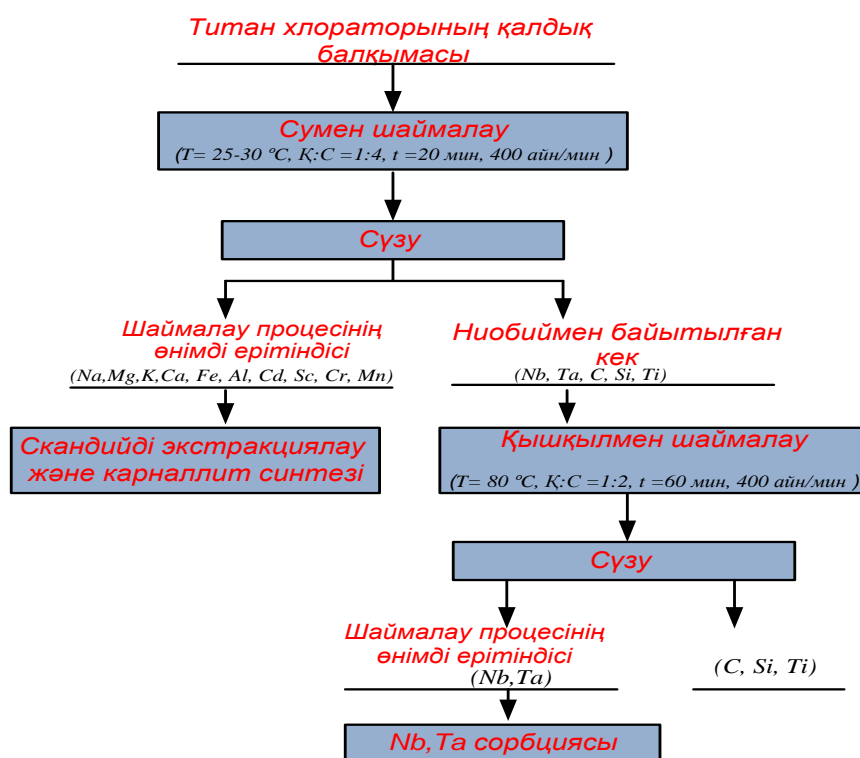
Шаймалау процесінің ерітіндісінен ниобийді сорбциялау үшін KU-2-8 H және Purolite-C104 катион алмасушы сорбенттер қолданылды. Ион алмасу шайырларының физика-химиялық қасиеттері мен сипаттамалары 2-ші кестеде көрсетілген.

Кесте 1 - Титан қалдықтарының химиялық құрамы

№	Элемент	Құрамы,%	№	Элемент	Құрамы,%	№	Элемент	Құрамы, %
1	Nb	0.009	6	K	10.7	11	Mn	1.80
2	Ta	0.001	7	Mg	4.61	12	Al	0.71
3	Ti	1.85	8	C	6.53	13	Cr	1.62
4	Fe	7.42	9	Si	5.18	14	Sc	0.014
5	Na	19.1	10	Ca	0.85	15	Cd	1.12

Кесте 2 - Ион алмасу шайырларының физико-химиялық қасиеттері мен сипаттамалары

Ион алмастырғыш шайырдың атауы	Түрі	Орташа өлшемі, мм	Матрица	Бөлшектің тығыздығы, г/мл	Сыйымдылығы, экв/л
Purolite-C104	Макрокеуекті әлсіз негіздік катионалмастырғыш	0.6 – 0.85	Стирол-дивинилбензол сополимері	1.04	1.30
KU-2-8 Н	Макрокеуекті күшті негіздік катионалмастырғыш	0.315 – 1.25	Стирол-дивинилбензол сополимері	0.75-0.8	1.9

**Сурет 1** - Екі сатылы сумен шаймалау процесінің технологиялық сұлбасы

Өнімдік шаймалау ерітіндісін дайындау

Құрамында ниобий бар ерітіндіні дайындау үшін екі сатылы шаймалау процесі жүргізілді. Екі сатылы шаймалаудың технологиялық сұлбасы 1-ші суретте көрсетілген. Бірінші сатыда (> 0,5 мм) өлшемге дейін ұсақталған титан хлораторларының қалдықтық балқымаларының сынамалары (100г) сумен шаймаланды. Шаймалау тәжірибелері 500 мл асты дөңгелек колбаларда жүргізілді. Шаймалау процесі 25°C-та, Қ:С қатынасы 1:4 мөлшерінде және араластыру жылдамдығы 400 айн/мин кезінде жүргізілді.

Сумен шаймалау процесінен кейін, шаймалау ерітіндісі мен ниобийге бай қалдықты бөліп алу үшін пульпаны сүзу процесіне жібердік. Алынған шаймалау ерітіндісі скандий және карналлит алу процесстеріне жіберілді. Ерімеген кек құрамынан қышқыл қалдығын жою үшін дистилденген сумен шайып, кептіріп, массасын анықтағаннан кейін ары қарай екінші сатыда қышқылмен шаймалау процесіне жіберілді. Екінші сатыдағы қышқылдық шаймалау кезінде тұз қышқылының концентрациясы 4,0 моль/л болды. Шаймалау *аналитикалық таза* тұз қышқылымен және дистилденген суды қолдану арқылы жүзеге асырылды.

Қышқылдық шаймалау бойынша жүргізілген эксперименттер буланудың әсерінен шығын болмас үшін тоңазытқышы бар магнитті араластырғыш плитада температурасы реттелетін колбада (сыйымдылығы 250 мл) жүргізілді.

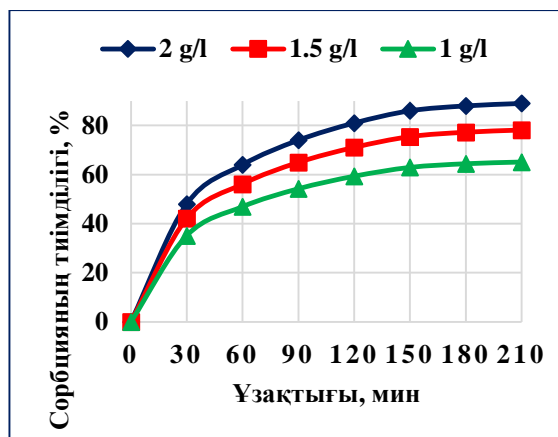
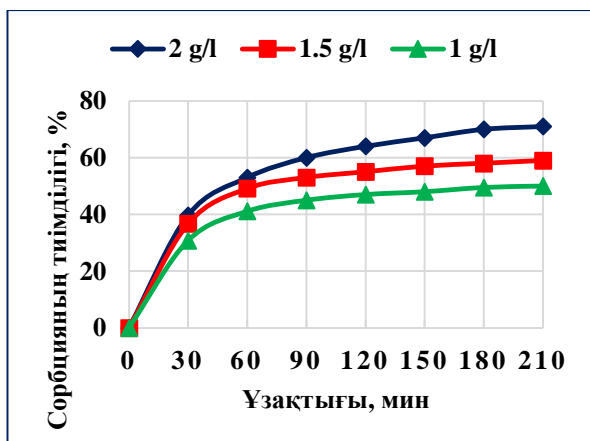
Шаймалау уақыты бірінші сатыда алынған кек пен тұз қышқылы ерітіндісінің үлгісін ыдысқа салғаннан бастап есептелді. Шаймалау процесі ыдыста 80°C температураны тұрақты ұстап тұратын сулы термостатта жүргізілді. Шаймалау процесінде С:Қ қатынасы 2:1 және агитациялық араластыру жылдамдығы 400 айн/мин жылдамдықта болды. Процесс аяқталғаннан кейін ыстық ерітінді сүзгіден өткізіліп, қатты қалдық тұрақты салмақ алынғанша 70°C температурасында кептірілді.

Нәтижелер мен талқылау

Екінші сатыдағы қышқылмен шаймалау ерітінділерін талдау нәтижелері ерітіндідегі ниобийдің концентрациясы 2.0 г /л екенін көрсетті. Ниобийдің ерітіндіге өту дәрежесі 94 % мөлшерінде болды. Ниобий (V) хлорид иондарының экстракциясын зерттеу кезінде, авторлар $HCl < 5$ моль/л жағдайында ниобий

катиондық түрде, ал $HCl > 5$ моль/л жағдайында ниобий аниондық түрде болатындығын анықтаған [13]. Осыған байланысты, біздің жағдайда ерітіндідегі тұз қышқылының концентрациясы 4,0 моль/л болғандықтан, катион алмасушы иониттер қолданылды.

Процесс ұзақтығының әсері. KU-2-8 Н және Purolite-C104 ион алмасу шайырлары бойынша ниобийдің сорбциясы бөлме температурасында, процесінің әртүрлі ұзақтығында (0,5-3,5 сағ) және ниобийдің әртүрлі бастапқы концентрациясында (1,0, 1,5 және 2,0 г/л) жүргізілді. Алынған нәтижелер 2-суретте көрсетілген. Сорбция процесінің тиімділігі процесс ұзақтығы мен ерітіндінің бастапқы концентрациясының өсуіне байланысты артатындығы байқалды. Purolite-C104 ион алмасу шайырын қолдану кезінде 1,0 г/л концентрациясы кезінде сорбциялау дәрежесі 50,0 % (0,025 г/г), 1,5 г/л концентрациясы кезінде 59,0% (0,045 г/г) және 2 г/л концентрациясы кезінде, ниобийдің сорбциясының көрсеткіші 71,0 % (0,071 г/г) шамасында болды. KU-2-8 Н ион алмасу шайыры үшін сорбцияның көрсеткіші тиісінше 65,1 % (0.033 г/г), 78,1 % (0.059 г/г) және 89.0 % (0.089 г/г) шамасында болды.



Сурет 2 - Purolite-C104 (а) және KU-2-8 Н (б) катионды ион алмасу шайырларының ниобийдің адсорбциясына уақыттың әсері

Сонымен қатар концентрациялар әр түрлі болса да ұқсас тенденцияны көрсетті, сорбциялау тиімділігі бастапқы 1 сағатта күрт өсуімен сипатталды. Содан кейін ол салыстырмалы түрде төмен тиімділік көрсетіп, соңында 3 сағаттан кейін сорбциялау дәрежесінде айтарлықтай өзгеріс байқалмады.

Бұл сыртқы бетке бағытталған диффузияның беткі қабаттан ион ядросына

бағытталған диффузиядан жылдам жүретіндігін көрсетеді.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу жұмыстарының нәтижесінде титан өндірісінің қалдықтарынан ниобийді гидрометаллургиялық әдістермен бөліп алу технологиясы жасалды.

Жасалған технология өндірісінің басқа да қалдықтарын өңдеуге пирометаллургиялық процестердің жоқтығына және фтор қышқылын қолданбайтындығына байланысты тиімді әдіс болып табылады. Сорбция процесінің 94 % - дық жоғары көрсеткішіне байланысты, жасалған әдісті титан

өндірісінің басқа да қалдықтарын өңдеуге қолдануға болады.

Мүдделер қайшылығы. Барлық авторлардың атынан корреспондент автор мүдделер қайшылығы (конфликт) жоқ деп мәлімдейді.

Осы мақалаға сілтеме: Байгенженов О.С., Тойшыбек А.М., Хабиев А.Т., Аймбетова И.О., Дагубаева А.Т. Титан өндірісінің қалдықтарынан ниобийді катион алмасушы сорбенттер көмегімен бөліп алу // *Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* -2021. №3(318), pp.97-103. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.33>

Cite this article as: Baigenzhenov O. S., Toishybek A. M., Khabiyev A. T., Aimbetova I.O., Dagubayeva A.T. Titan öndirisiniñ qaldıqtarınan niobiydi kation almaswşı sorbentter kömegimen bölip alw [Recovery of niobium from wastes generated in titanium production by cation exchange sorbents]. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* - 2021. Volume 3, Issue 318, pp. 97-103. (In Kazakh). <https://doi.org/10.31643/2021/6445.33>

Извлечение ниобия из отходов титанового производства с помощью катионообменных сорбентов

¹Байгенженов О.С., ¹Тойшыбек А.М., ¹Хабиев А.Т., ²Аймбетова И.О., ³Дагубаева А.Т.

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

² Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави

³ РГП Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, Алматы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

В статье описана технология получения ниобиевого концентрата путем переработки хлоридных отходов, образующихся в процессе хлорирования титановых шлаков. Для переработки отходов предлагается двухступенчатая технология выщелачивания. На первой стадии выщелачивания используется вода, на второй – раствор 4,0 М соляной кислоты. С целью проведения сорбции ниобия из раствора, полученного в процессе выщелачивания, были использованы катионообменные сорбенты Purolite-C104 и KU-2-8 H. При использовании ионообменной смолы Purolite-C104 показатель сорбции ниобия из раствора с концентрацией 2 г/л за 3,5 часа составлял около 71,0 % (0,071 г/г), для ионообменной смолы KU-2-8 H этот показатель составлял около 89,0 % (0,089 г/г).

Ключевые слова: хлоридные отходы, выщелачивание, сорбция ниобия, катионообменные сорбенты.

Информация об авторах:

**Байгенженов Омирсерик
Сабыржанович**

доктор Ph.D., ассоц. профессор Satbayev University, кафедра «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов», Алматы, Республика Казахстан, <https://orcid.org/0000-0001-5803-7680>. E-mail: o.baigenzhenov@satbayev.university

Тойшыбек Азамат Мағауияұлы

Ph.D. докторант, "Satbayev University", кафедра «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов», Алматы, Республика Қазақстан, <https://orcid.org/0000-0002-7431-0103>. E-mail: A.Toishybek@stud.satbayev.university

Хабиев Алибек Талғатбекұлы

доктор Ph.D., ассоц. профессор Satbayev University, кафедра «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов», Алматы, Республика Казахстан, <https://orcid.org/0000-0001-9397-2367>. E-mail: a.khabiyev@satbayev.university

Аймбетова Индира Оразғалиевна

Кандидат техн. наук, ассоц. профессор Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан, 0000-0002-9060-0813, E-mail: science@ayu.edu.kz

Дагубаева Асел Токтаровна

Магистр техн. наук, РГП «Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан», младший научный сотрудник, Алматы, Республика Казахстан, <https://orcid.org/0000-0002-2675-0577>. E-mail: omir_asel_88@mail.ru

Әдебиеттер

- [1] Sarsembekov T.K., Yanko T.B., Sidorenko S.A., Pylypenko M.M. Concomitant extraction process of niobium at the titanium tetrachloride production // *БАҢТ*. 2020. №1(125), 173-177
- [2] Wang Z., Zhang J., Zhao B., Liu Z. Extraction of titanium resources from the titanium-containing waste slag: Thermodynamic analysis and experimental verification. *Calphad*, 2020, 71, 102211. doi: 10.1016/j.calphad.2020.102211
- [3] Shikika, A., Sethurajan, M., Muvundja, F., Mugumaoderha, M. C., & St. Gaydardzhiev. A review on extractive metallurgy of tantalum and niobium // *Hydrometallurgy*, 2020.- 105496. doi: 10.1016/j.hydromet.2020.105496
- [4] Banerjee D., Williams J.C. Perspectives on titanium science and technology, *Acta Mater.* 61 (3), 2013, 844–879
- [5] Pourabdoli M., Raygan S., Abdizadeh H., Hanaei K. A new process for the production of ferrotitanium from titania slag, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 46 (1), 2013, 17–23
- [6] Хабишев А.Т., Байгенженов О.С., Акбаров М.С., Сыдыканов М.М. Исследование возможности извлечения молибдена из сульфатных растворов на анионите Леватит MP62W5 // *Комплексное использование минерального сырья (Complex Use of Mineral Resources)*. – 2020. – №2 (313). – С. 46-51. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.16>
- [7] Maldybayev G., Naimanbaev M., Shadrinova I., Lokhova N., Sharipov R. Study of soda effect on the sintering process of low titanium slag, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 53, 3, 2018, 564-571
- [8] Ma, Y., Stopic, S., Huang, Z., Friedrich, B. Selective recovery and separation of Zr and Hf from sulfuric acid leach solution using anion exchange resin. *Hydrometallurgy*, 2019, 89, 105143. doi: 10.1016/j.hydromet.2019.105143
- [9] Monroy-Guzman, F., Trubert, D. & Le Naour, C. Adsorption behavior of Zr, Hf, Nb, Ta and Pa on macroporous anion exchanger in NH₄SCN/HClO₄ and NH₄SCN/HF media. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 254, 431–437 (2002). <https://doi.org/10.1023/A:1021621617523>
- [10] Kenzhaliyev B. K., Surkova T. YU., Yessimova D. M. Concentration of rare-earth elements by sorption from sulphate solutions // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources*. 2019. –№3. – P. 5-9. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.22>
- [11] Volodin V. N., Tuleushev Y. Zh., Kenzhaliyev B. K., Trebukhov S. A. Thermal degradation of hard alloys of the niobium-cadmium system at low pressure // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a [Complex Use of Mineral Resources]*. № 1 (312), 2020. pp. 41-47. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.05>
- [12] Ghosh, M., Remya Devi, P.S., Verma, R. et al. Sorption of niobium on colloidal silica and the effect of humic acid. *J Radioanal Nucl Chem* 306, 2015, 147–153. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4055-z>
- [13] Tamhina B., Ivsic A. G., Extraction and Spectrophotometric Determination of Niobium by Tetraphenylarsonium and Phosphonium Chloride from a Hydrochloric Acid Solution // *Microchemical journal*, 1984, № 30, 178-185

Reference

- [1] Sarsembekov T.K., Yanko T.B., Sidorenko S.A., Pylypenko M.M. Concomitant extraction process of niobium at the titanium tetrachloride production // *БАҢТ*. 2020. №1(125), 173-177
- [2] Wang Z., Zhang J., Zhao B., Liu Z. Extraction of titanium resources from the titanium-containing waste slag: Thermodynamic analysis and experimental verification. *Calphad*, 2020, 71, 102211. doi: 10.1016/j.calphad.2020.102211
- [3] Shikika, A., Sethurajan, M., Muvundja, F., Mugumaoderha, M. C., & St. Gaydardzhiev. A review on extractive metallurgy of tantalum and niobium // *Hydrometallurgy*, 2020.- 105496. doi: 10.1016/j.hydromet.2020.105496
- [4] Banerjee D., Williams J.C. Perspectives on titanium science and technology, *Acta Mater.* 61 (3), 2013, 844–879
- [5] Pourabdoli M., Raygan S., Abdizadeh H., Hanaei K. A new process for the production of ferrotitanium from titania slag, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 46 (1), 2013, 17–23
- [6] Khaliyev A.T., Baigenzhenov O.S., Akbarov M.S., Sydykanov M.M. Issledovaniye vozmozhnosti izvlecheniya molibdena iz sul'fatnykh rastvorov na anionite Levatit MP62W5 [Study of the possibility of molybdenum recovery from sulfate solutions on the anionite Lewatit MP62W5] // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources*. 2020. – №2 (313). – p.46-51. (In Russian). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.16>
- [7] Maldybayev G., Naimanbaev M., Shadrinova I., Lokhova N., Sharipov R. Study of soda effect on the sintering process of low titanium slag, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 53, 3, 2018, 564-571
- [8] Ma, Y., Stopic, S., Huang, Z., Friedrich, B. Selective recovery and separation of Zr and Hf from sulfuric acid leach solution using anion exchange resin. *Hydrometallurgy*, 2019, 89, 105143. doi: 10.1016/j.hydromet.2019.105143
- [9] Monroy-Guzman, F., Trubert, D. & Le Naour, C. Adsorption behavior of Zr, Hf, Nb, Ta and Pa on macroporous anion exchanger in NH₄SCN/HClO₄ and NH₄SCN/HF media. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 254, 431–437 (2002). <https://doi.org/10.1023/A:1021621617523>
- [10] Kenzhaliyev B. K., Surkova T. YU., Yessimova D. M. Concentration of rare-earth elements by sorption from sulphate solutions // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources*. 2019. –№3. – P. 5-9. (In English). <https://doi.org/10.31643/2019/6445.22>
- [11] Volodin V. N., Tuleushev Y. Zh., Kenzhaliyev B. K., Trebukhov S. A. Thermal degradation of hard alloys of the niobium-cadmium system at low pressure // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a [Complex Use of Mineral Resources]*. № 1 (312), 2020. pp. 41-47. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.05>
- [12] Ghosh, M., Remya Devi, P.S., Verma, R. et al. Sorption of niobium on colloidal silica and the effect of humic acid. *J Radioanal Nucl Chem*, 306, 2015, 147–153. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4055-z>
- [13] B. Tamhina, A. G. Ivsic, Extraction and Spectrophotometric Determination of Niobium by Tetraphenylarsonium and Phosphonium Chloride from a Hydrochloric Acid Solution // *Microchemical journal*, 1984, № 30, 178-185.