

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
SATBAYEV UNIVERSITY
МЕТАЛЛУРГИЯ ЖӘНЕ КЕН БАЙЫТУ ИНСТИТУТЫ

ISSN 2616-6445 (Online)
ISSN 2224-5243 (Print)
DOI 10.31643/2018/166445

**Минералдық
шикізаттарды
кешенді пайдалану**

—••••— **2 (317)** —••••—

**Комплексное
Использование
Минерального
Сырья**

**Complex
Use of
Mineral
Resources**

**СӘУІР - МАУСЫМ 2021
APRIL - JUNE 2021
АПРЕЛЬ - ИЮНЬ 2021**

**ЖЫЛЫНА 4 РЕТ ШЫҒАДЫ
QUARTERLY JOURNAL
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД**

**ЖУРНАЛ 1978 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ
JOURNAL HAS BEEN PUBLISHING SINCE 1978
ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1978 ГОДА**

АЛМАТЫ 2021

Б а с р е д а к т о р техника ғылымдарының докторы, профессор **Багдаулет КЕНЖАЛИЕВ**

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

Тех. ғыл. канд. **Ринат АБДУЛВАЛИЕВ**, Металлургия және Кен байыту институты, Қазақстан;
Ph.D, профессор **Ата АҚЧИЛ**, Сулейман Демирел университеті, Испарта, Түркия;
Ph.D, доцент **Рухола АШИРИ**, Исфахан технологиялық университеті, Исфахан, Иран;
ҚР ҰҒА академигі, профессор **Абдуали БАЕШОВ**, Қазақстан;
Тех. және физ.-мат. ғыл. др. **Валерий ВОЛОДИН**, Металлургия және Кен байыту институты, Қазақстан;
Тех. ғыл. др., доцент **Нурхадиянто ДИДИК**, Джокьякарта мемлекеттік университеті, Индонезия;
ҚР ҰҒА академигі, профессор **Мұрат ЖҰРЫНОВ**, Қазақстан;
Химия ғылымдарының докторы **Лариса ЗЕМСКОВА**, Химия институты, Владивосток, Ресей;
Химия ғылымдарының кандидаты **Александр КАСИКОВ**, Ресей ғылым академиясы, Апатити, Ресей;
Хим. ғыл. др. **Зулхаир МАНСУРОВ**, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан;
PhD, доцент **МД Азри Отхуман МИДИН**, Малайзия ғылым университеті, Гелугор, Малайзия;
Ph.D, профессор **Бражендра МИШРА**, Вустер Политехникалық институты, Вустер, АҚШ;
Ph.D, профессор **Эль-Сайед НЕГИМ**, Ұлттық зерттеу орталығы, Каир, Египет;
Ph.D, доцент, **Мухаммад НУРАЗЛАН**, Сұлтан Идрис атындағы білім беру университеті, Перак, Малайзия;
Тех. ғыл. др. **Анатолий НИКОЛАЕВ**, Наноматериалдарды зерттеу орталығы, Апатити, Ресей;
Ph.D, профессор **Димитар ПЕШЕВ**, Химиялық технология және металлургия университеті, София, Болгария;
Ph.D, профессор **Сергей ТАРАСОВ**, Күш физикасы және материалтану институты, Томск, Ресей;
RFA академигі, профессор **Валентин ЧАНТУРИЯ**, Мәскеу, Ресей;
Техника ғылымдарының докторы, профессор **Арман ШАХ**, Сұлтан Идрис білім беру университеті, Малайзия.

Ж а у а п т ы х а т ш ы

Гулжайна Касымова

Редакция мекен жайы:

Металлургия және кен байыту институты
050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.,
Шевченко к-сі, Уәлиханов к-нің қиылысы, 29/133,
Fax. +7 (727) 298-45-03, Tel. +7-(727) 298-45-02, +7 (727) 298-45-19
E mail: journal@kims-imio.kz, product-service@kims-imio.kz
www.kims-imio.kz

«Минералдық шикізаттарды кешенді пайдалану» журналы ғылыми жұмыстардың негізгі нәтижелерін жариялау үшін Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрілігінің Білім және ғылым саласындағы бақылау комитеті ұсынған ғылыми басылымдар тізіміне енгізілді.

Меншік иесі: «Металлургия және кен байыту институты» АҚ

Журнал Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникация министрлігінің Байланыс, ақпараттандыру және бұқаралық ақпарат құралдары саласындағы мемлекеттік бақылау комитетінде қайта тіркелген

2016 ж. 18 қазандағы № 16180-Ж Куәлігі

© «Металлургия және кен байыту институты» АҚ, 2021

Editor-in-chief Dr. Sci. Tech., professor **Bagdaulet KENZHALIYEV**

Editorial board:

Cand. of Tech. Sci. **Rinat ABDULVALIYEV**, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Kazakhstan;
Ph.D. **Ata AKÇİL**, Professor of Engineering Faculty, Isparta, Turkey;
Ph.D **Rouhollah ASHRI**, associate professor of Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran;
Academician of Kazakh Republic National Academy of Sciences **Abduali BAESHOV**, Kazakhstan;
Dr. Tech., Phys-math. Sci., professor **Valeryi VOLODIN**, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Kazakhstan;
Dr.Sci.Tech., **Nurhadiyanto DIDIK**, associate professor of Yogyakarta State University, Yogyakarta, Indonesia;
Academician of Kazakh Republic National Academy of Sciences **Murat ZHURINOV**, Kazakhstan;
Dr.Sci.Chem. **Larisa ZEMSKOVA**, Institute of Chemistry FEB RAS, Vladivostok, Russia;
Cand.Chem.Sci. **Alexander KASIKOV**, professor of Institute of Chemistry Kola Science Centre, Apatity, Russia;
Dr.Sci.Chem. **Zulhair MANSUROV**, professor of Al Farabi Kazakh National University, Kazakhstan;
Ph.D. **MD Azree Otuman MIDIN** associate professor of University Sains Malaysia, Penang, Malaysia;
Ph.D. **Brajendra MISHRA**, Professor of Metallurgical & Materials Engineering Department, Colorado, USA;
Ph.D. **El-sayed NEGIM**, Professor of National Research Centre, Cairo, Egypt;
Ph.D, **Muhammad NOORAZLAN**, associate professor of Sultan Idris Education University, Perak, Malaysia;
Dr. of Tech. Sci. **Anatoliy NIKOLAEV**, Nanomaterials Research Centre Kola Science Centre, Apatity, Russia;
Ph.D **Dimitar PESHEV**, professor of University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, Bulgaria;
Ph.D **Sergei TARASOV** professor of Institute of Strength Physics and Materials Science, Tomsk, Russia;
Academician of Russian Academy of Science **Valentin CHANTURIYA**, Moscow, Russia;
Dr.Sci.Tech. **Arman SHAH**, professor of Universiti Pendidikan Sultan Idris, Tanjong Malim, Malaysia.

Executive secretary

Gulzhaina Kassymova

Address:

Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation
29/133 Shevchenko Street, corner of Ch. Valikhanov Street,
Almaty, 050010, Kazakhstan
Fax. +7 (727) 298-45-03, Tel. +7-(727) 298-45-02, +7 (727) 298-45-19
E mail: journal@kims-imio.kz, product-service@kims-imio.kz
www.kims-imio.kz

The Journal has been included in the list of issues approved by the Control Committee in the Sphere of Education and Science of Republic Kazakhstan, Education and Science Ministry for publication of scientific research results (dissertations).

Owner: "Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation" JSC

The Journal was re-registered by the Committee for State Control in the Sphere of Communication, Information and Mass Media of the Ministry of Information and Communication of the Republic of Kazakhstan.

Certificate № 16180-Ж since October 18, 2016

Главный редактор доктор технических наук, профессор **Багдаулет КЕНЖАЛИЕВ**

Редакционная коллегия:

Кандидат химических наук **Ринат АБДУЛВАЛИЕВ**, Институт Metallургии и Обогащения, Казахстан;
Ph.D, профессор **Ата АКЧИЛ**, Университет Сулеймана Демиреля, Испарта, Турция;
Ph.D, доцент, **Рухола АШИРИ**, Исфаханский технологический университет, Исфахан, Иран;
Академик НАН РК, профессор **Абдуали БАЕШОВ**, Казахстан;
Доктор технических и физ.-мат. наук **Валерий ВОЛОДИН**, Институт Metallургии и Обогащения, Казахстан;
Др. тех. н., доцент **Нурхадиянто ДИДИК**, Джокьякартский государственный университет, Индонезия;
Академик НАН РК, профессор **Мурат ЖУРИНОВ**, Казахстан;
Др. хим. н. **Лариса ЗЕМСКОВА**, Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия;
Кан. хим. н. **Александр КАСИКОВ**, Институт химии имени Тананаева, Апатиты, Россия;
Др. хим. н., проф. **Зулхаир МАНСУРОВ**, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Казахстан;
PhD, доцент **МД Азри Отхуман МИДИН**, Научный Университет Малайзии, Гелугор, Малайзия;
Ph.D, профессор **Бражендра МИШРА**, Вустерский политехнический институт, Вустер, США;
Ph.D, профессор **Эль-Сайед НЕГИМ**, Национальный исследовательский центр, Каир, Египет;
Ph.D, доцент, **Мухаммад НУРАЗЛАН**, Образовательный университет Султана Идриса, Перак, Малайзия;
Др. тех. н. **Анатолий НИКОЛАЕВ**, Центр исследования наноматериалов, Апатиты, Россия;
Ph.D, профессор **Димитар ПЕШЕВ**, Университет химической технологии и металлургии, София, Болгария;
Ph.D, профессор **Сергей ТАРАСОВ**, Институт физики прочности и материаловедения, Томск, Россия;
Академик РАН, профессор **Валентин ЧАНТУРИЯ**, Москва, Россия;
Кан. хим. н., проф. **Арман ШАХ**, Педагогический университет Султана Идриса, Танджунг Малим, Малайзия.

Ответственный секретарь

Гулжайна Касымова

Адрес редакции:

Институт Metallургии и Обогащения
050010, Республика Казахстан, г. Алматы,
ул. Шевченко, уг. ул. Валиханова, 29/133,
Fax. +7 (727) 298-45-03, Tel. +7 (727) 298-45-02, +7 (727) 298-45-19
E mail: journal@kims-imio.kz, product-service@kims-imio.kz
www.kims-imio.kz

Журнал «Комплексное использование минерального сырья» включен в Перечень научных изданий, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (ККСОН МОН РК) для публикации основных результатов научной деятельности.

Собственник: АО «Институт металлургии и обогащения»

Журнал перерегистрирован в Комитете государственного контроля в област и связи,
информатизации и средств массовой информации
Министерства информации и коммуникации Республики Казахстан
Свидетельство № 16180-Ж от 18 октября 2016 г.



UDC 669.213

DOI: 10.31643/2021/6445.12



IRSTI 53.37.33/87.15.15

Arsenic in refractory gold ore processing

^{1*} Seitkan A.S., ² Redfren S.A.T.

¹ Astana International University, Nur-Sultan, Kazakhstan

² Nanyang Technological University, Singapore

* Corresponding author email: seitkanainur.77@mail.ru

Received: 02 March 2021
Peer reviewed: 15 April 2021
Accepted: 22 April 2021

ABSTRACT

With "easy" ores becoming diminished, extractive industries are now shifting towards difficult deposits. In the future, gold-arsenic-bearing refractory ores will represent a prime example of the type of ores that may become more typical source for global gold recovery operations. Mining and beneficiation of As-bearing ores inevitably produce As-bearing wastes, which exacerbate any natural As mobilization. The mobility of As is governed by the interplay of redox reactions, adsorption/desorption, ion exchange, precipitation/dissolution, and biotransformation. The dominant processes depend on local biogeochemical conditions of the media, such as pH, Eh, chemical composition, as well as the presence and intensity of biological activity. This article provides an overview of current research on arsenic contamination of the environment caused by mineralization, mining and extraction of gold on the example of specific gold deposits.

Keywords: refractory gold-bearing ores, arsenopyrite, gold recovery, arsenic, mobility.

Seitkan Ainur

Information about authors:

- candidate in technical sciences, associated professor of the Higher School of Natural Sciences. Astana International University, Nur-Sultan, Kazakhstan. ORCID ID: 0000-0001-9309-500X. Email: seitkanainur.77@mail.ru

Redfren Simon Anthony Turner

- Professor of Mineral Physics, Dean of College of Science, Nanyang Technological University, Singapore. ORCID ID: 0000-0001-9513-0147. Email: simon.redfern@ntu.edu.sg

Introduction

Historically, gold is a symbol of prosperity. Nowadays, gold is one of the major economic assets of nation states, and a significant means of international payment. About 60% of all the mined gold worldwide is in the hold of governments and central banks, therefore gold mining is one of the strategic motors of the economy [1].

The common causes for refractoriness in ores are physical or chemical binding of the gold and the presence of reactive gangue minerals. Over the past century, many methods have been developed to increase gold recovery rates and intensify gold leaching [2-4].

However, the main concern in mining and processing of the refractory As-bearing gold ores is As. The concentration of As in gold ores can vary from trace levels to more than 5000 mg/kg. Such gold is not extractable without significant ecological contamination from the associate arsenopyrite mineralisation. Arsenic poses economical risks by complicating the gold recovery process and affecting gold production costs, as well as creating ecological

risks associated with emission and disposal of As-containing wastes.

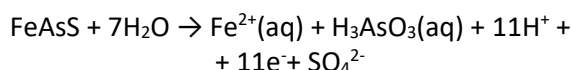
A number of papers have been published that attempt to elucidate sources or triggers of As in natural environments and industrially-contaminated areas, mechanisms of its attenuation, and controls. Here, we present an overview of current research and observations on arsenic contamination caused by gold mineralisation, mining, and extraction. We will do so by reviewing the case studies of particular mines.

Mokrsko-West gold deposit

The Mokrsko-West gold deposit (MWD) in the Czech Republic, containing an estimated 100 t of gold reserve [5], is a unique example of As contamination caused by a gold deposit which is unaffected by mining. The main constituents of the MWD ore are quartz, calcite, and silicate minerals. The main As-containing mineral is gold-bearing arsenopyrite, which is responsible for 95% of the As load into local soil. The remaining As input comes from loellingite, stibnite, and pyrite. Soils are generally pH neutral, but slightly lower pH in the

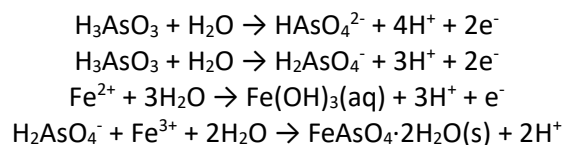
surface layers, due to presence of organic acids. The average precipitation in the region is 555 mm/year, with mean temperatures in July of 17°C, and -3 °C in January. Weathering of primary minerals generates secondary As-bearing minerals, such as arseniosiderite, ferrihydrite, goethite, hematite, pharmacosiderite, and scorodite. The concentrations of As in the soils have reached >200mg/kg nearby (at a distance of 1.12 km). As is found as arsenates and Fe oxyhydroxides (goethite and hematite) in soils, whereas in sediments As is associated mainly with Fe oxyhydroxides. The As content in the groundwater varies from 255 - 1690 µg/L, and around 50 - 340 µg/L in surface water. Waters are neutral to slightly alkaline, of Ca-HCO₃⁻ type. High As concentrations were detected in the redox transition zone of groundwaters, as a result of the reductive dissolution of scorodite, arseniosiderite, pharmacosiderite, and As-rich iron oxyhydroxides. Reducing conditions can occur due to groundwater elevation or/and intense microbial activity. In surface water, the highest As³⁺/As⁵⁺ ratio (>16) was detected in muddy areas rich in organic matter. A positive correlation between As³⁺/As⁵⁺ and DOC, recorded in all water samples, points to the important role of microbial processes in controlling the speciation and mobility of arsenic at the MWD.

Arsenic transformations occurring at the MWD site start from arsenopyrite oxidation in the environmentally-relevant pH range of 4-9, and the release of As³⁺ and Fe²⁺:

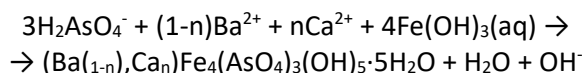
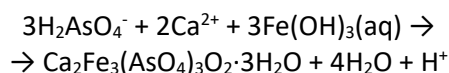


If dissolved As³⁺ is transported to a more reducing environment, such as sediments or shallow subsurface soils with elevated groundwater levels and high microbial activity, the main mechanism of As immobilisation is bonding to newly formed Fe and As sulfides by adsorption and co-precipitation. However, the most probable sequestering mineral is Fe sulfide, as the concentration of dissolved As³⁺ does not exceed the solubility of realgar and orpiment in the reducing sediments of MWD. This hypothesis is supported by the fact that, firstly, As sulfides can be formed at low pH, in reducing conditions, and at low Fe²⁺ concentrations. Secondly, thermodynamic calculations show that during the slow decrease of redox potential, Fe sulfides (pyrite and mackinawite) tend to oversaturate earlier than As³⁺ sulfides. Hence, the main control on As transport in reducing environments is the solubility of Fe sulfides.

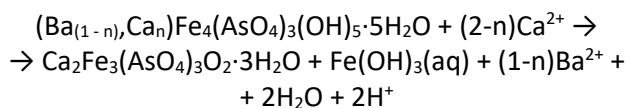
In contrast, under oxidising conditions As³⁺ oxidises to As⁵⁺, and Fe²⁺ to Fe³⁺. Below pH 3 in the oxidising zone of saprolite, high concentrations of As⁵⁺ may result in the formation of scorodite:



Dissolution of carbonate minerals releases Ca²⁺ and Ba²⁺ into solution, thus neutralising acidity. At circumneutral pH, arseniosiderite and Ba-pharmacosiderite can be formed from such alkaline earth cations.



Incongruent dissolution of Ba-pharmacosiderite can result in arseniosiderite:



Hence, in oxidising environments, As mobility is controlled by the solubility of arsenate minerals, as well as the degree of As adsorption onto Fe oxyhydroxides. The latter is the most important sink of As at the MWD, in some cases containing up to 16% As.

In the transition zone (the upper boundary of which lies just below groundwater level), the rate of sulfate reduction into sulfide is low, and the concentration of dissolved As is insufficient to induce As sulfide precipitation. Under these redox conditions, arsenates are relatively insoluble, however, in the presence of reductants, the concentration of arsenates may be substantially greater. It has been found, by sequential extraction, that As is mostly bound to a reducible fraction, confirming that the high As content is a result of reductive dissolution of arsenates and Fe oxyhydroxides.

Iron Quadrangle

Another example is The Iron Quadrangle (IQ) in Brazil. This is associated with a large As geochemical anomaly arising from gold mineralization and

amplified by gold mining operations [6]. Overall, 390 000 t of As has been discharged into the drainage system of the IQ region. The regional climate is temperate and tropical, sub-humid, with dry winters (April - October), in spite of a mean annual precipitation of 1500-1900 mm. Rain falls from November to January. High average temperatures and high precipitation induce intense weathering of sulfides, and this might be expected to result in AMD. However, the presence of carbonates in the ore neutralizes the waters, produced from sulfide mineral oxidation and dissolution, yielding $\text{pH} > 7.5$. The Eh of water is in the range of 128-220 mV.

High As in the groundwater of the IQ resulted from leaching of arsenopyrite oxidation products by fluctuations in the water table. Water running from a mineralised vein from the Passagem mine contained 2980 $\mu\text{g/L}$ As, for example [6]. The As content in water from an adit reached 800 $\mu\text{g/L}$. This water flows to the Carmo river, where the concentration of As in sediment samples close to the Passagem mine is found to be 4700 mg/kg. The concentration of As in water is found to be lower in winter. This is explained by less pronounced dilution in winter, and subsequent low water flow, allowing deposition of As-containing fine-grained material. Common minerals identified in the sediments are quartz, goethite, hematite, kaolinite, and illite. Sequential extraction demonstrates that the As is mostly bound to the iron oxyhydroxide fraction (goethite, hematite). Up to 300 $\mu\text{g/L}$ As is detected in surface water samples.

The speciation of dissolved As shows the presence of As^{3+} in water samples, contradicting the results of speciation calculations obtained by the PHREEQC geochemical code. This might be due to the slow kinetics of redox reactions, meaning that waters have not reached chemical equilibrium, or that As^{5+} has been sequestered by some solid phases. Oxidation of the primary ore leads to the formation of iron oxides and hydroxides as well as As^{5+} and As^{3+} oxyanions. As^{5+} may be partially consumed by precipitation of scorodite (together with Fe^{3+}) under oxidizing conditions and $\text{pH} < 4$ [7], and selective adsorption onto clay minerals and goethite compared to As^{3+} . This may be an explanation for the presence of As^{3+} , which contradicts PHREEQC speciation calculations. Precipitation of scorodite and goethite with up to 8% As has been observed in Passagem and Ouro Preto mines. At the Raposos gold deposit, As concentrations reached more than 10000 mg/kg in Fe-rich material. However, where the abundance of

carbonates promotes pH to rise above 4, incongruent dissolution of scorodite occurs with the formation of goethite, Fe-oxyhydroxide, and H_2AsO_4^- oxyanions, as well as possible As desorption from goethite and other Fe and Mn oxyhydroxides. TCLP-like tests resulted in leaching of 1-4 wt. % As (2-196 mg/kg) from river sediments and sediment from waste tailing. Other sources of As are ancient and modern tailings, containing As in the form of arsenolite, As-bearing Fe-oxyhydroxides, and amorphous iron arsenates. To summarize, two mechanisms of arsenic control have been identified in the IQ gold mining region: precipitation of scorodite and goethite, and adsorption of arsenic onto iron oxides and hydroxides.

Salanfe gold mine

The former As-bearing Salanfe gold mine, situated in Western Switzerland, is another example of arsenic contamination accelerated by mining operations [8]. 700 t of As has been discharged during the mining operations at the Salanfe. Waters above the mine area contained about 5 $\mu\text{g/L}$ background As. Despite the low gold production (only 55 kg), it has left behind dumps with elevated As content reaching up to 10 wt.%, and soils containing from 50 mg/kg to several wt.% of As. In the oxidising pH 8 waters percolating the mine and dump (Ca-Mg- HCO_3 - SO_4 -type), As concentrations varied in the range 60-4000 $\mu\text{g/L}$. This is explained by the mobility of As in alkaline conditions, induced by dissolution of carbonates. However, the concentration of As gradually decreases with distance from the mine adits and heap wastes, reaching 100-160 $\mu\text{g/L}$ in Lake Ottan located 200 m below the mine, though the type of water remained the same. Primary (arsenopyrite, loellingite, pyrite, hematite) as well as secondary As-containing minerals (goethite and amorphous iron oxyhydroxides) were found in fine-grained waste materials. Soil samples contained As in iron oxyhydroxide and Al-bearing fractions. The organic fraction appears to play an insignificant role in the retention of As, due to thin soil cover of less than 10 cm, and very rare reducing conditions. The climate of the region is relatively dry, continental, with a mean temperature of 3°C. The release of As resulted from weathering of exposed mine waste, and downhill creep of As-rich waters. Attenuation of As was more pronounced in sediments and soils, than in downstream water. This was attributed to the desorption of As from Al- and Fe-oxyhydroxides,

associated with the alkaline pH of waters resulting from carbonate buffering. As attenuation in water here results from dilution and circulation of surface and ground waters.

Lucky Shot Gold Mine

A further example is provided by Lucky Shot Gold Mine, one of thousands of abandoned sites of historical mining in Alaska, which produced nearly 7 t of gold. The primary source of As is mine adits, although tailing piles also make a contribution to the As load [9]. Surface and mine waters are of Ca-HCO₃⁻-type, circumneutral to mildly alkaline due to carbonate buffering, and well oxygenated. The water from the adits contains 700 µg/L dissolved As (differing <2% between filtered and unfiltered samples), almost entirely in trivalent form. The deviation from thermodynamic prediction has been attributed to the short residence time of As in the water, so As³⁺ does not completely transform to As⁵⁺. Downstream, rapid dilution lowers the As concentration (below 2 µg/L) as well as the As³⁺ proportion due to progressive oxidation.

The environmental impacts of both Lucky Shot and Salanfe Gold Mines are not significant, since the contaminated areas are limited in each case. It has been concluded that these mines do not pose a threat to local community health, although future mining may have impacts on the environment at the Lucky Shot Gold Mine.

East Otago Gold Mines

Moving to New Zealand, the primary source of As at the East Otago Gold Mines is arsenopyrite [10]. The annual precipitation in the area is 400-800 mm with a similar amount of evaporation. Abandoned mines show accelerated weathering of arsenopyrite, forming scorodite and pharmacosiderite in the oxidised zones. Waters from old mines have a pH around 6-7 with up to 4 ppm As, whilst the background concentration of As is 0.01 ppm. The concentration of As in pH 5 slurry of degraded old tailings reaches 33,000 ppm, mainly in the form of scorodite. The content of dissolved As is determined to be 0.75 ppm. This suggests that, in the old tailings, As release is controlled by scorodite precipitation.

At the active mining site, Macraes, pH 10 waters contain over 200 ppm As, which is explained by the low solubility of scorodite at this pH. The average As content of soil samples is around 200 ppm, whereas primary veins contain up to 10,000 ppm As.

Attenuation of As in soil is mainly mediated by adsorption onto iron oxyhydroxides and phyllosilicate minerals, and local temporary immobilisation by precipitation of scorodite. The As concentration in water is controlled by downstream dilution and by precipitation of scorodite in low pH waters.

Reefton gold field deposits

Mining and processing of As-containing gold ores in the Reefton gold field deposits (New Zealand) has also led to high As concentrations across the mine sites. Globe Progress Mine, Blackwater Mine, and Snowy River Battery Site have been studied to elucidate mechanisms of As dispersion and control [11]. The Blackwater ore contained mostly arsenopyrite with rare pyrite, whereas at Globe Progress Mine pyrite predominated over arsenopyrite. The principal source of As in Blackwater Mine is the Prohibition Mill Site, where roasting was employed to process the arsenopyrite-rich ore. This generated large amounts of arsenolite, crystals of which still can be found in the condenser tower of the roaster as well as in the surrounding area. Annual precipitation in the region is 2,300 mm, and the mean temperature is 12 °C. Site run-off is concentrated in a wetland, where As concentrations as high as 52 mg/L are detected in a Ca-AsO₄-type water as a result of arsenolite solubilisation. Oxidation of arsenites lowers the pH of wetland water to 4-5. The wetland water then percolates to a man-made dam with abundant exposed carbonate rocks, neutralising acidity to circumneutral pH. This dramatically decreases the As content to 2.4 mg/L.

Further downstream, attenuation of As in water, emanating from the dam, is a result of pure dilution by tributaries. 14 km from the Prohibition Mill site, Blackwater River still contains 0.003 mg/L As. Although it is well below the maximum contaminant level of As (MCL is the maximum concentration of a chemical that is allowed in public drinking water systems), this means that survival of 99% of aqueous species cannot be guaranteed according to ANZECC (2000) guidelines [12].

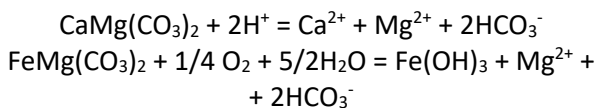
The point sources of As at the Snowy River Battery Site are a roaster system and a historic adit. Circumneutral run-off from the mine site flows into the Snowy River. Discharge from the adit inflows to the Snowy River 150 m upstream of the site. In contrast to the Prohibition Mill Site (with residues containing up to 40 wt.% As), all arsenolite has dissolved at the Snowy River Battery Site. The concentration of As at the Snowy River Battery Site

substrate is lower, 26 wt.%. Scorodite has been suggested to control the As concentration, since scorodite's solubility is two (at pH7) to five (at pH 4) orders of magnitude lower than that of arsenolite.

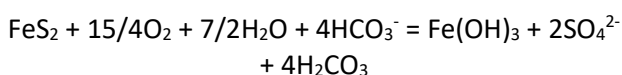
The Globe Progress Mine was functional from 1870 up to 1920, and reopened for mining in 2007. Arsenic is distributed to the environment through oxidation of arsenopyrite and As-bearing pyrite (up to 1 wt.% As). At the adit entrances, As is sequestered as a 4 cm thick layer of hydrous ferric oxides with up to 20 wt.% As, whilst the As content in discharge from the adits reached 59 mg/L. However, where discharge water joins a local creek the As concentration gradually decreases due mixing.

Arsenic chemistry in these mine sites has been determined by roasting technology and gas handling systems. Dissolution and oxidation of roaster-derived arsenolite resulted in high localised As⁵⁺ concentrations in discharged waters. Three mechanisms of As attenuation have been proposed by Haffert and Craw [9]: 1) precipitation of scorodite, 2) chemisorption to hydrous ferric oxides, and 3) downstream dilution with local catchment water.

In oxidising and acidic conditions, such as that at Prohibition site, scorodite precipitation occurs. Owing to substantial carbonate alteration at the Snowy River Site, dolomite and ankerite dissolve, thus increasing pH to circumneutral values according to the reactions:



In the non-pyritic ore of Blackwater, Fe from ankerite dissolution precipitates as hydrous ferric oxide (HFO), due to low solubility of Fe at circumneutral pH. When the amount of HFO is insufficient for As sequestration, As may persist at high concentrations, exceeding MCL, for up to 10 km downstream, until diluted by regional tributaries. The effectiveness of dilution depends on catchment morphology. In pyrite-rich mine sites, HFO is mainly generated by oxidation of pyrite:



Naturally formed HFO has high reactivity and surface area, and so immobilises dissolved As through chemisorption (adsorption, surface complexation, co-precipitation, and ion exchange). It has been concluded that there is no need for anthropogenic rehabilitation, and that the

mentioned natural mechanisms of As attenuation are sufficient to improve the quality of downstream water [11].

Giant Mine

Perhaps the most severe example of the adverse environmental impact of refractory gold mining and processing is the legacy of As contamination at Giant Mine in Canada, with a remediation cost of about 1 billion Canadian dollars [13]. Though full implementation of the remediation plan (designed for perpetuity) at Giant Mine will reduce As discharge to the environment from 900 to 610 kg/year, it will not be able to completely eliminate the As load.

After 50 years of prosperous gold mining by private companies the Giant Mine is now abandoned, and environmental liability belongs to the federal government and taxpayers. In the gold ore, arsenopyrite and pyrite accounted for 95% of the sulfides. The processing technology comprised ore roasting and cyanidation. During roasting, most of the arsenopyrite oxidised to As₂O₃, maghemite (predominantly γ-Fe₂O₃ [14]) and hematite.

The point sources of As at Giant Mine are roaster-derived As₂O₃, which was aerielly distributed and deposited in surface soil pockets across the mine site, As₂O₃ baghouse dust stored in underground chambers, and several mine tailings. Until the proper implementation of emission control in 1963, some 20,000 t of As₂O₃ (which is nearly 86% of all the As₂O₃ produced during the entire roasting operations) had been discharged into the air. Despite high solubility, particles of As₂O₃ have been found, unaffected, in soil downwind of the roaster. Scorodite rims have been observed on some As₂O₃ particles, which may have formed after the contact with acidic Fe-bearing solutions.

The total As concentration in soil samples reaches up to 5,760 mg/kg. By comparing Au, As, and Sb proportions in the soil and in the condensed historic dust, it has been suggested that most of the soil As was likely deposited before the emission control [15]. 237,000 t of As₂O₃ baghouse dust is still kept in underground chambers. Neutral seepage, collected from drill holes and fractures near the underground chambers, contains as much as 4,000 mg/L As, mostly in the trivalent form (70%) [16].

The As content in tailings fluctuates in the range of 1000-5000mg/kg. The high As concentration is a result of circumneutral pH conditions, buffered by carbonate-rich mineralogy, and the processing conditions. Due to the relatively low temperature of

roasting (500°C), carbonates remain unaffected and prevail in tailings over sulfides, precluding acid drainage. Weathering of tailings induced oxidation of unroasted remnant sulfide minerals, in the form of Fe oxyhydroxide rims on pyrite and arsenopyrite grains [14]. Aeolian and aqueous transport of tailings still poses a risk to human health. *In vitro* bioaccessibility tests of soil samples have shown that 40% of the As may be bioaccessible if ingested and 20% of the As would be bioaccessible if inhaled.

Discussion

The environmental impacts of operational and former gold mine sites is mainly associated with voluminous waste rocks and mine tailings. Tailings completely change landscape and topography, affect the quality of surface and groundwater.

One solution would be industrial use of tailings as bricks and tiles. However, despite their potential technical feasibility, most studies on the possible use of gold mill tailings have been proven to be futile or economically unviable [17]. The mineralogy of tailings is complex, depending on ore composition, the method of generation (ore beneficiation or metallurgical processing), climate, and maintenance conditions. In semi arid climates, inappropriately maintained tailings (uncovered, dried ponds) release fine particles into the air due to evaporation and wind erosion, thus posing risks of inhalation and incidental ingestion to local community.

Since As toxicity varies with oxidation state and chemical form, mine tailings certainly demand accurate determination of As speciation. Typical secondary minerals in mine wastes are in low abundance, microcrystalline, or nearly amorphous, often demanding identification at the micro- or even nanoscale, potentially using novel synchrotron-based techniques.

Studies demonstrate that at most mine sites, HFO phases play a crucial role in sequestering As via adsorption or co-precipitation [18]. Other mineral phases are also capable of immobilizing As, depending on the pH of media. At pH <2.5 As may substitute for sulphate in the crystal structure of jarosite $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ [16], while at higher pH ranges of 2.5-6, As can be adsorbed onto schwertmannite $Fe_8O_8(OH)_6SO_4$ [19].

Scorodite is rarely found [20], probably due to the low Fe content and neutral pH in some tailings.

Post-disposal variations in pH and Eh of mine tailings can change As speciation, compromising As stability and altering As partitioning between liquid and solid phases. Sometimes it is necessary to maintain certain Eh-pH conditions, which favour retention of particular As-bearing species.

For instance, mine tailings at the Giant Mine, mainly consisting of roaster-derived iron oxides, demand the maintenance of oxidising conditions to avoid reductive dissolution or desorption of As [16]. In sulfide-rich mill tailings, liming is often used as a common measure to reduce the acid-generating potential of wastes. However, liming may be inappropriate if the risk of exposure to As via inhalation of tailings' particles is high, as iron arsenates are altered to calcium-iron arsenates, which are highly bioaccessible in neutral pH fluids [21].

Conclusion

In summary, several factors control As flux into environment in refractory gold mining and extraction. Factors such as climate, hydrographic network, and ore mineralogy are beyond the control of miners.

The key human factor, controlling the negative impact of gold recovery from double refractory Au-As-bearing ores, is a choice of the optimal (ideally economically efficient and eco-friendly) method for gold extraction, that takes into account both ore mineralogy, and further safe disposal of As-bearing wastes in compliance with local environmental standards.

Tests of site-specific As speciation, combined with bioaccessibility are crucial in making such an important choice. Ultimately, this site-specific As knowledge will enable prioritisation of historical mine residues for better management and remediation, to predict the risks associated with exposure to As in future, thus to best understand how to eliminate or diminish As bioaccessibility for humans, and ultimately the environmental impact of gold mining in general.

Conflicts of interest. The authors certify that they have no affiliations with or involvement in any organization or entity with any financial interest or non-financial interest in the subject matter or materials discussed in this manuscript.

Қиын өңделетін алтынды кендерді өңдеуде қоршаған ортаның мышьякпен ластануы

¹ Сейітқан А. С., ² Редферн С. Э.Т.

¹ Астана халықаралық Университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

² Наньянг технологиялық университеті, Сингапур

* Автордың электрондық поштасы: seitkanainur.77@mail.ru

Мақала келді: 02 наурыз 2021
Рецензенттен өтті: 15 сәуір 2021
Қабылданды: 22 сәуір 2021

ТҮЙІНДЕМЕ

Бай және жеңіл өңделетін кендердің қоры азайған сайын, алтын өндіру саласы кедей және өңделуі қиын кен орындарына көп көңіл бөлуде. Келешекте алтын-мышьяқты қиын өңделетін кендер жаһандық алтын өндіру саласында қолданылатын әдеттегі кен түрі болатыны анық. Құрамында мышьяк бар алтынды кендерді өндіру және байыту сөзсіз мышьяқты қалдықтардың түзілуіне әкеледі, бұл мышьяқтың табиғи қозғалғыштығын одан сайын арттырады. Мышьяк қозғалғыштығы бірнеше факторлардың өзара әрекеттесуімен анықталады, олар: тотығу-тотықсыздану реакциялары, адсорбция/десорбция, иондық алмасу, тұнбаға түсу/еру және биотрансформация процестері. Басымдыққа ие процестер - рН, Eh, химиялық құрам, сонымен қатар биологиялық белсенділіктің болуы мен қарқындылығы сияқты жергілікті биогеохимиялық орта жағдайларына тәуелді. Бұл мақалада нақты алтынды кен орындарының мысалында қиын өңделетін алтынды кендерді өндіру және қайта өңдеу барысында түзілетін мышьяқтың қоршаған ортаны лаптауы бойынша қазіргі заманғы зерттеулерге шолу жасалды.

Түйін сөздер: қиын өңделетін алтынды кендер, арсенопирит, алтынды бөліп алу, мышьяк, қозғалғыштық.

Сейітқан Айнұр Сейітқанқызы

Авторлар туралы ақпарат:

– техника ғылымдарының кандидаты, Жаратылыстану жоғары мектебінің доценті, Астана халықаралық Университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан. ORCID ID: 0000-0001-9309-500X. Email: seitkanainur.77@mail.ru

Редферн Саймон Энтони Тернер

– минералды физика профессоры, Ғылым Колледжі деканы, Наньянг Технологиялық Университеті, Сингапур. ORCID ID: 0000-0001-9513-0147. Email: simon.redfern@ntu.edu.sg

Загрязнение окружающей среды мышьяком при переработке упорных золотосодержащих руд

¹ Сейткан А.С., ² Редферн С.Э.Т.

¹ Международный Университет Астана, Нур-Султан, Казахстан

² Наньянгский технологический университет, Сингапур

* Электронная почта автора: seitkanainur.77@mail.ru

Статья поступила: 02 марта 2021
Рецензирование: 15 апреля 2021
Принята в печать: 22 апреля 2021

АННОТАЦИЯ

С истощением запасов богатых и легкоперерабатываемых руд, золотодобывающая отрасль все больше переходит к разработке месторождений бедных и упорных руд. В будущем золото-мышьяксодержащие упорные руды будут представлять собой яркий пример типичных руд, используемых для извлечения золота. Добыча и обогащение мышьяксодержащих руд неизбежно приводит к образованию мышьяксодержащих отходов, которые усугубляют процесс естественной мобилизации мышьяка. Подвижность мышьяка определяется взаимодействием нескольких факторов: окислительно-восстановительных реакций, процессами адсорбции/десорбции, ионного обмена, осаждения/растворения и биотрансформации. Доминирующие процессы зависят от локальных биогеохимических условий среды, таких как рН, Eh, химический состав, а также наличие и интенсивность биологической активности. В данной статье представлен обзор современных исследований и наблюдений по загрязнению мышьяком окружающей среды, вызванном минерализацией, добычей и извлечением золота на примере конкретных золотосодержащих месторождений. **Ключевые слова:** упорные золотосодержащие руды, арсенопирит, извлечение золота, мышьяк, мобильность.

Сейткан Айнур Сейтканкызы	Информация об авторах: – кандидат технических наук, доцент Высшей школы естественных наук, Международный университет Астана, Нур-Султан, Казахстан. ORCID ID: 0000-0001-9309-500X. Email: seitkanainur.77@mail.ru
Редферн Саймон Энтони Тернер	– профессор минеральной физики, декан Колледжа науки, Наньянгский Технологический Университет, Сингапур. ORCID ID: 0000-0001-9513-0147. Email: simon.redfern@ntu.edu.sg

Reference

- [1] Gasparrini, C. *Gold and other precious metals: from ore to market*. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [2] Kenzhaliyev B.K., Koizhanova A.K., Magomedov D.R., Kamalov E.M., Erdenova M.B., Abdylдаev N.N. (2020). A study of the biohydrometallurgical method for extracting gold from flotation tailings. // *Metalurgija*, 59, 4, 477 - 480.
- [3] Yessengarayev Ye.K., Surimbayev B.N., Baimbetov B.S., Mamyachenkov S.V., Kanaly T.S. Ore treatment hydrogen peroxide during heap leaching of gold. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. 2021. №1(316), pp. 5-14. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.01>
- [4] Seitkan, A., Lampronti, G. I., Widmer, R. N., Casati, N. P., & Redfern, S. (2020). Thermal behavior of iron arsenides under non-oxidizing conditions. // *ACS Omega*, 5 (12), 6423-64287. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03928>.
- [5] Drahota, P., Rohovec, J., Filippi, M., Mihaljevic, M., Rychlovsky, P., Cervený, V. and Pertold, Z. (2009). Mineralogical and geochemical controls of arsenic speciation and mobility under different redox conditions in soil, sediment and water at the Mokrsko-West gold deposit, Czech Republic. // *Science of the Total Environment*, 10, 3372–3384.
- [6] Borba, R.P., Figueiredo, B.R., Rawlins, B., and Matschullat, J. (2003). Geochemical distribution of arsenic in waters, sediments and weathered gold mineralized rocks from Iron Quadrangle, Brazil. // *Environmental Geology*, 1, 39–52.
- [7] Dove, P.M. and Rimstidt, J.D. (1985). The solubility and stability of scorodite, FeAsO₄·H₂O. // *American Mineralogist*, 7-8, 838–844.
- [8] Pfeifer, H-R., Häussermann, A., Lavanchy, J-C. and Halter, W. (2007). Distribution and behavior of arsenic in soils and waters in the vicinity of the former gold-arsenic mine of Salanfè, Western Switzerland. // *Journal of Geochemical Exploration*, 3, 121–134.
- [9] Torrance, K., Keenan, H., Munk, L.A. and Hagedorn, B. (2012). Arsenic speciation and mobility in surface water at Lucky Shot Gold Mine, Alaska. // *Environmental Geochemistry and Health*, 6, 711–723.
- [10] Craw, D., Chappell, D., Reay, A., and Walls, D. (2000). Mobilisation and attenuation of arsenic around gold mines, East Otago, New Zealand. // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 43, 373–383.
- [11] Haffert, L. and Craw, D. (2008). Processes of attenuation of dissolved arsenic downstream from historic gold mine sites, New Zealand. // *Science of the Total Environment*, 405, 286–300.
- [12] ANZECC and ARM CANZ. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Volume 1. The guidelines, Australia and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, Canberra, Australia, 2000.
- [13] Indigenous and Northern Affairs Canada (2016), Giant Mine Remediation Project. Available from: <https://www.aadnc-aandc.gc.ca/eng/1100100027364/1100100027365>. Accessed 16 February 2016.
- [14] Walker, S.R., Jamieson, H.E., Lanzirrotti, A., Hall, G.E.M., and Peterson, R.C. (2015). The effect of ore roasting on arsenic oxidation state and solid phase speciation in gold mine tailings. // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4, 273–291.
- [15] Bromstad, M.J. *The characterization, persistence, and bioaccessibility of roaster-derived arsenic in surface soils at Giant Mine*, Yellowknife, NT. Master's thesis, Queen's University, Canada, 2011.
- [16] Jamieson, H.E. (2014). The legacy of arsenic contamination from mining and processing refractory gold ore at Giant Mine, Yellowknife, Northwest Territories, Canada. // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1, 533–551.
- [17] Subbaraman, J.V. (2001). The mill tailings of Kolar gold mines. // *Current science*, 6, 631–632.
- [18] Foster, A.L., Brown, G.E., Tingle, T.N. and Parks, G.A. 1998. Quantitative arsenic speciation in mine tailings using X-ray absorption spectroscopy. // *American Mineralogist*, 83, 553–568.
- [19] Fukushi, K., Sasaki, M., Sato, T., Yanase, N., Amano, H. and Ikeda, H. (2003). A natural attenuation of arsenic in drainage from an abandoned arsenic mine dump. // *Applied Geochemistry*, 8, 1267–1278.
- [20] DeSisto, S.L., Jamieson, H.E. and Parsons, M.B. (2011). Influence of hardpan layers on arsenic mobility in historical gold mine tailings. // *Applied Geochemistry*, 12, 2004–2018.
- [21] Meunier, L., Walker, S.R., Wragg, J., Parsons, M. B., Koch, I., Jamieson, H.E. and Reimer, K.J. (2010). Effects of soil composition and mineralogy on the bioaccessibility of arsenic from tailings and soil in gold mine districts of Nova Scotia. // *Environmental Science and Technology*, 7, 2667–2674.

Список литературы

- [1] Gasparrini, C. *Gold and other precious metals: from ore to market*. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2012. (In Eng.).
- [2] Kenzhaliyev B.K., Koizhanova A.K., Magomedov D.R., Kamalov E.M., Erdenova M.B., Abdyldaev N.N. (2020). A study of the biohydrometallurgical method for extracting gold from flotation tailings. // *Metallurgija*, 59, 4, 477 - 480. (In Eng.).
- [3] Yessengarayev Ye.K., Surimbayev B.N., Baimbetov B.S., Mamyachenkov S.V., Kanaly T.S. Ore treatment hydrogen peroxide during heap leaching of gold. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. 2021. №1(316), pp. 5-14. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.01> (In Eng.).
- [4] Seitkan, A., Lampronti, G. I., Widmer, R. N., Casati, N. P., & Redfern, S. (2020). Thermal behavior of iron arsenides under non-oxidizing conditions. // *ACS Omega*, 5 (12), 6423-64287. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03928>. (In Eng.).
- [5] Drahotka, P., Rohovec, J., Filipi, M., Mihaljevic, M., Rychlovsky, P., Cervený, V. and Pertold, Z. (2009). Mineralogical and geochemical controls of arsenic speciation and mobility under different redox conditions in soil, sediment and water at the Mokrsko-West gold deposit, Czech Republic. // *Science of the Total Environment*, 10, 3372–3384. (In Eng.).
- [6] Borba, R.P., Figueiredo, B.R., Rawlins, B., and Matschullat, J. (2003). Geochemical distribution of arsenic in waters, sediments and weathered gold mineralized rocks from Iron Quadrangle, Brazil. // *Environmental Geology*, 1, 39–52. (In Eng.).
- [7] Dove, P.M. and Rimstidt, J.D. (1985). The solubility and stability of scorodite, $\text{FeAsO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. // *American Mineralogist*, 7-8, 838–844. (In Eng.).
- [8] Pfeifer, H-R., Häussermann, A., Lavanchy, J-C. and Halter, W. (2007). Distribution and behavior of arsenic in soils and waters in the vicinity of the former gold-arsenic mine of Salanfe, Western Switzerland. // *Journal of Geochemical Exploration*, 3, 121–134. (In Eng.).
- [9] Torrance, K., Keenan, H., Munk, L.A. and Hagedorn, B. (2012). Arsenic speciation and mobility in surface water at Lucky Shot Gold Mine, Alaska. // *Environmental Geochemistry and Health*, 6, 711–723. (In Eng.).
- [10] Craw, D., Chappell, D., Reay, A., and Walls, D. (2000). Mobilisation and attenuation of arsenic around gold mines, East Otago, New Zealand. // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 43, 373–383. (In Eng.).
- [11] Haffert, L. and Craw, D. (2008). Processes of attenuation of dissolved arsenic downstream from historic gold mine sites, New Zealand. // *Science of the Total Environment*, 405, 286–300. (In Eng.).
- [12] ANZECC and ARMCANZ. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Volume 1. The guidelines, Australia and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, Canberra, Australia, 2000. (In Eng.).
- [13] Indigenous and Northern Affairs Canada (2016), Giant Mine Remediation Project. Available from: <https://www.aadnc-aandc.gc.ca/eng/1100100027364/1100100027365>. Accessed 16 February 2016. (In Eng.).
- [14] Walker, S.R., Jamieson, H.E., Lanzirrotti, A., Hall, G.E.M., and Peterson, R.C. (2015). The effect of ore roasting on arsenic oxidation state and solid phase speciation in gold mine tailings. // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4, 273–291. (In Eng.).
- [15] Bromstad, M.J. *The characterization, persistence, and bioaccessibility of roaster-derived arsenic in surface soils at Giant Mine*, Yellowknife, NT. Master's thesis, Queen's University, Canada, 2011. (In Eng.).
- [16] Jamieson, H.E. (2014). The legacy of arsenic contamination from mining and processing refractory gold ore at Giant Mine, Yellowknife, Northwest Territories, Canada. // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1, 533–551. (In Eng.).
- [17] Subbaraman, J.V. (2001). The mill tailings of Kolar gold mines. // *Current science*, 6, 631–632. (In Eng.).
- [18] Foster, A.L., Brown, G.E., Tingle, T.N. and Parks, G.A. 1998. Quantitative arsenic speciation in mine tailings using X-ray absorption spectroscopy. // *American Mineralogist*, 83, 553–568. (In Eng.).
- [19] Fukushi, K., Sasaki, M., Sato, T., Yanase, N., Amano, H. and Ikeda, H. (2003). A natural attenuation of arsenic in drainage from an abandoned arsenic mine dump. // *Applied Geochemistry*, 8, 1267–1278. (In Eng.).
- [20] DeSisto, S.L., Jamieson, H.E. and Parsons, M.B. (2011). Influence of hardpan layers on arsenic mobility in historical gold mine tailings. // *Applied Geochemistry*, 12, 2004–2018. (In Eng.).
- [21] Meunier, L., Walker, S.R., Wragg, J., Parsons, M. B., Koch, I., Jamieson, H.E. and Reimer, K.J. (2010). Effects of soil composition and mineralogy on the bioaccessibility of arsenic from tailings and soil in gold mine districts of Nova Scotia. // *Environmental Science and Technology*, 7, 2667–2674. (In Eng.).



UDC 622.323(574)

DOI: 10.31643/2021/6445.13



IRSTI 52.47.27

Hydrodynamic modeling of field development using enhanced oil recovery methods

^{1*} Moldabayeva G.Zh., ² Agzamov A.Kh., ¹ Suleimenova R.T., ¹ Elefteriadi D.K., ¹ Abileva S. Zh.,
¹ Baluanov B. A.

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

² Karshi Engineering and Economic Institute, Karshi, Uzbekistan

* Corresponding author email: g.moldabayeva@satbayev.university; moldabayeva@gmail.com

<p>Received: 23 February 2021 Peer reviewed: 10 March 2021 Accepted: 23 April 2021</p>	<p>ANNOTATION This article discusses a digital geological model, the transfer of borehole data to the geological grid, and the modeling of the technology of alternating steam and water injection. Alternating injection involves the cyclic injection of steam and water into an injection well in high-viscosity oil fields. The essence of this technology is that during the steam injection for 2-4 months, the formation warms up, leading to a decrease in viscosity and an increase in oil mobility. Then comes the period of water injection, during which the production of already warmed oil continues and the formation pressure is maintained. For digital geological modeling, the following data were collected, processed and prepared: a list of wells that open the object of modeling, coordinates of wellheads, well altitudinal data, inclinometry of well trajectories, GMS data on wells, analysis of wells drilled with core sampling, and digitized seismic data (structural surfaces on the roof of stratigraphic horizons, parameter maps, contact surfaces, faults, structural maps on the roof of target horizons with faults, isochron maps, velocity maps). Keywords: modeling, well, analysis, core sampling, hydrodynamic study.</p>
<p>Moldabayeva Gulnaz Zhaksylykovna</p>	<p>Information about authors: Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, 050013, Satpayev 22a, Almaty, Kazakhstan. E-mail: g.moldabayeva@satbayev.university; moldabayeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7331-1633.</p>
<p>Agzamov Avaz Khamidillaevich</p>	<p>Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Karshi Engineering and Economic Institute, 180100, Mustakillik Avenue, 225, Karshi, Uzbekistan.</p>
<p>Suleimenova Raikhan Taupikhovna</p>	<p>Doctoral student of the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, 050013, Satpayeva 22a, Almaty, Kazakhstan. E-mail: raika_83@mail.ru, 830809400443-D@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-7995-5560.</p>
<p>Elefteriadi Dmitriy Konstantinovich</p>	<p>Doctoral student of the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, 050013, Satpayeva 22a, Almaty, Kazakhstan. dimon636_91@mail.com</p>
<p>Abileva Saule Zhalgasbaykyzy</p>	<p>Doctoral student of the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, 050013, Satpayeva 22a, Almaty, Kazakhstan. E-mail: saulezh007@gmail.com.</p>
<p>Baluanov Bakytzhan Aytuarovich</p>	<p>Doctoral student of the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, 050013, Satpayeva 22a, Almaty, Kazakhstan. baluan101@gmail.com.</p>

Introduction

Evaluation work on alternating injection steam and water was carried out on the basis of geological and hydrodynamic modeling, by creating a thermal composite model of the selected site. A digital geological model of a field is a representation of productive formations and their host geological environment in the form of a set of digital data in a three-dimensional grid of cells.

The project of geological modeling of the sectors of the development objects of interest was created in the modeling program Petrel of Schlumberger, then the collected, processed and prepared data was loaded into it.

Experimental part

The geological model of the sector of the western section includes three productive horizons of the Lower Cretaceous deposits: A, B, and C. All deposits are oil [1].

The simulation consists of the following procedures:

1. Download all available data, including interpreted GMS, seismic, and sampling data;
2. Correlation and construction of a structural framework taking into account discharge violations;
3. Distribution of lithology and FCP [2].

A fragment of the horizontal correlation scheme is shown in Figure 1.

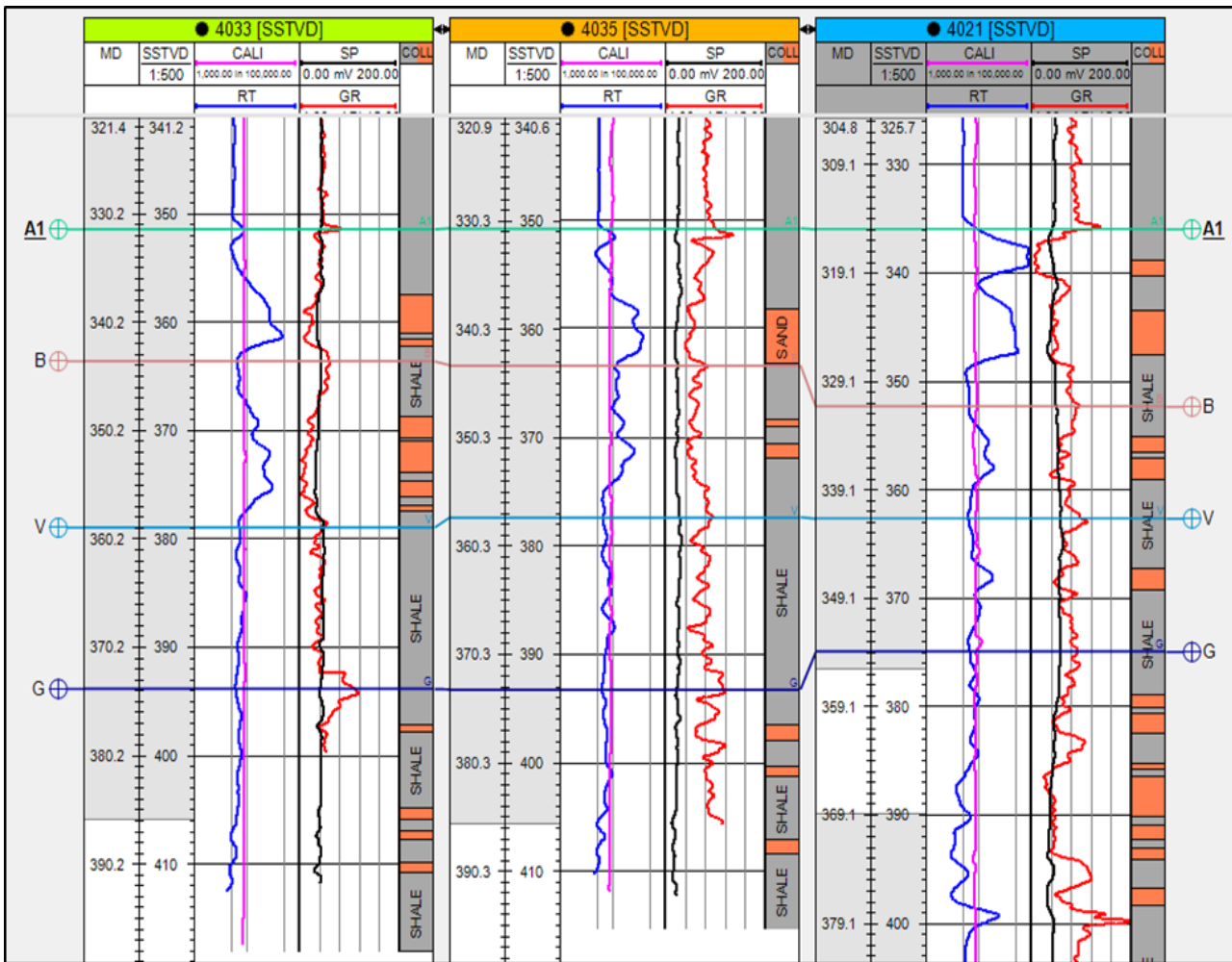


Figure 1 - Fragment of the correlation scheme for wells No. 4033, 4035, 4021

Structural modeling

The fundamental stage of geological modeling is the creation of a structural framework. Sequentially, the modeling process using a structural framework looks like this:

Construction of structural maps on the roof of horizons using stratigraphic chops (markers) on the roof of formations in wells.

Building a fault model. According to the available interpretation data, a fault model is constructed, in which each fault is represented by a surface, and these surfaces are correctly connected to each other in the intersection area.

The final stage of structural construction is the conversion of the structural framework into a 3D model consisting of cells of a given size, within which lithology and petrophysical properties can be distributed based on borehole data.

All structural maps were constructed using the Convergent Interpolation method with a grid size of 25m*25m, the rotation angle is -1080, which corresponds to the direction of the seismic cube [3].

Creating a three-dimensional geological grid. The main stage in modeling is the construction of a three-dimensional grid (a framework that consists of cells with a set of digital geological data).

A properly constructed three-dimensional grid is the basis for building a correct geological model.

The size of the grid cells in the plane during geological modeling is 30x30 meters for all horizons. The number of vertical cells was chosen in such a way that the cell size was on average about 0.6 meters [2]. Such grid sizes are most optimal when constructing geological models, since on the one hand they are more comparable to the sampling step of GMS curves, and on the other hand they provide an acceptable number of cells in terms of calculation time. Discontinuous faults were modeled based on the results of 3D seismic interpretation. To avoid cell curvature when modeling tectonic faults in a 3D grid, the zig-zag type faults method was chosen. The grid characteristics of the three-dimensional geological model are presented in Table 1.

Table 1 - Characteristics of the sector grid

Horizon	Number of cells on the axis			Cell size by axis			Total number of cells by model
	Nx	Ny	Nz	Dx,m	Dy,m	Dz average, m	
A ₁	42	55	25	30	30	0.6	57750
B	42	55	21	30	30	0.6	48510
B	42	55	22	30	30	0,6	50820
total	42	55	68	30	30	0.6	157080

Transfer of borehole data to the geological grid. In the future, the results of the GMS interpretation were transferred to the model cells located along the well trajectory. The correctness of their transfer was checked visually on the well section for each well. To create the average values of the lithology, the Coll curves were taken, for the PHIE porosity [2, 5].

Lithological modeling. To distribute the value of a continuous cube of facies in the inter-well space, we used the deterministic interpolation method Indicator kriging available in Petrel. In the constructed facies cube, the parameter values ranged from 0 to 1, dividing the volume of the simulated area into a collector and a non-collector.

Building a porosity cube. The porosity cubes were calculated after converting the GMS porosity to the grid cells for all wells within the permeable layers and conducting Data analisys. Further, the porosity was distributed using the stochastic Gaussian algorithm SGS (Sequential Gaussian Simulation).

To monitor the quality control of the porosity cube construction, histograms were used, which can be used to compare the results of common, averaged, and original GMS data [1, 2].

Construction of a sector hydrodynamic model of the Western section. The hydrodynamic sector is cut out of the geological model with the preservation of all structural structures and petrophysical properties. All vertical and horizontal geological heterogeneities are preserved.

The creation of a hydrodynamic model was carried out in the tNavigator software product of Rock Flow Dynamics using a composite core (e300) with the thermal option enabled, since steam-thermal treatment of wells (STTW) was carried out at this site and steam was pumped. Table 2 shows the parameters of the western sector.

Properties of fluids. In the sector model, a two-component PVT model was used, using the dependence of oil viscosity on temperature (Table 3).

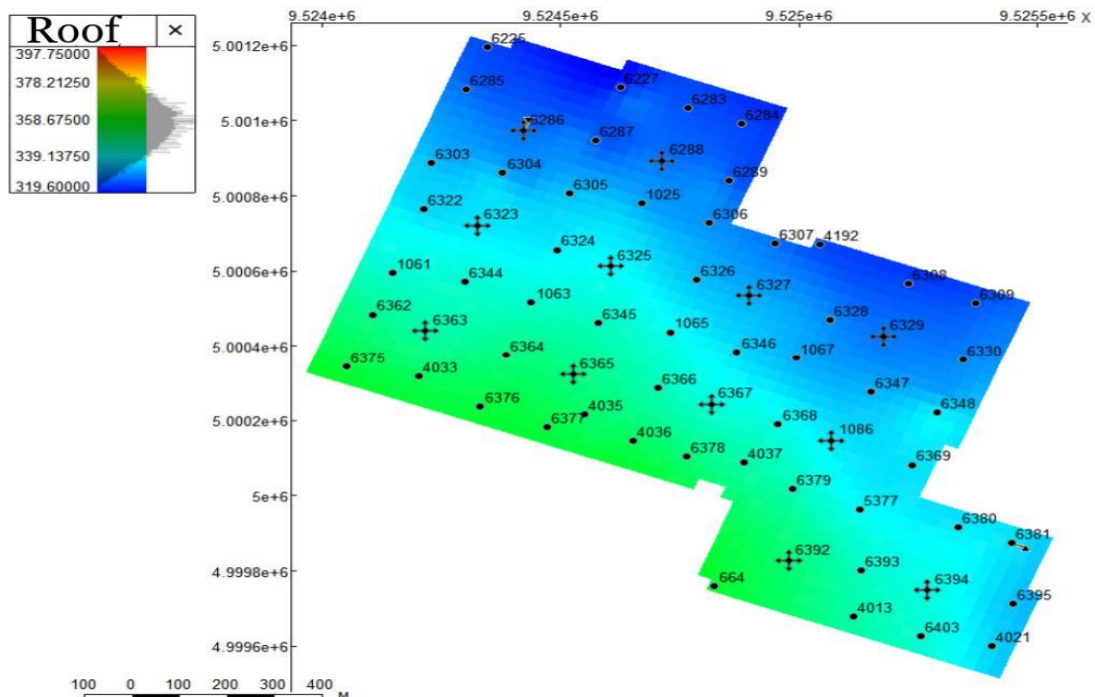


Figure 2 - Sector model of the western section

Table 2 - Sector parameters

<i>Dimension</i>	30x30x0.6
<i>Number of wells</i>	65
<i>Start date of development</i>	01.02.2001

Table 3 - Dependence of oil viscosity on temperature

<i>Temperature, C</i>	<i>Oil viscosity</i>
10	700
20	500
30	400
50	150
80	50
100	20
120	12
180	5
200	2
250	1
300	1

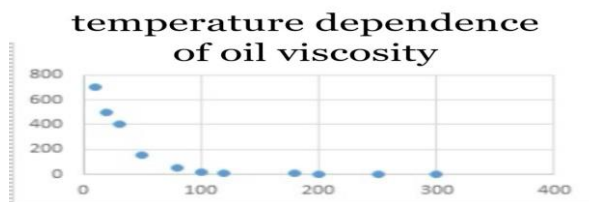


Figure 3. Dependence of oil viscosity on temperature

Table 4 - Results of determining RPP in the "oil-water" system on model № 1

<i>№ modes</i>	<i>Percentage of fluid in the flow, %</i>		<i>Saturation, fractions of units.</i>		<i>Phase permeability, μm²*10⁻³</i>		<i>Relative phase permeability, fractions of units.</i>	
	<i>oil</i>	<i>water</i>	<i>oil</i>	<i>water</i>	<i>oil</i>	<i>water</i>	<i>oil</i>	<i>water</i>
1	0	100	0	1	0	3021,38		
2	100	0	0,769	0,231	2818,45	0	1	0
3	75	25	0,694	0,306	2209,7	14,092	0,784	0,005
4	50	50	0,645	0,355	1739,01	31	0,617	0,011
5	25	75	0,592	0,408	1319,1	70,46	0,468	0,025
6	10	90	0,526	0,474	808,91	129,65	0,287	0,046
7	5	95	0,477	0,523	532,7	183,2	0,189	0,065
8	0	100	0,367	0,633	0	763,81	0	0,271

The boundary value of porosity for Cretaceous and Jurassic sediments is determined by the intersection of the boundary value of permeability with the trend of the dependence of the permeability coefficient on the porosity coefficient, respectively, equal to 20.6% and 18.2% (Fig. 4) [6-12].

Relative phase permeabilities and capillary pressures. Figure 5 shows the relative phase permeabilities used in the model.

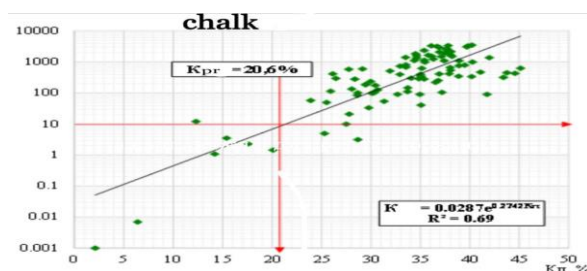


Figure 4 - Dependence of the coefficient of permeability and porosity (chalk)

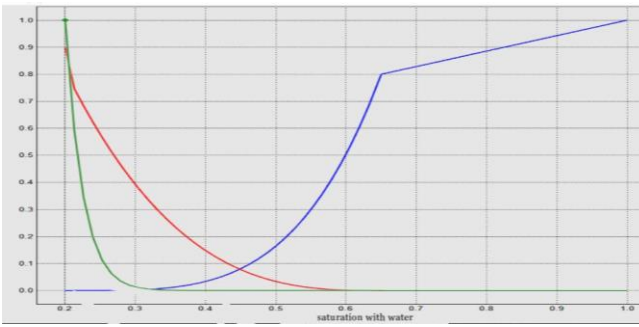


Figure 5 - Relative phase permeability curves for the western section

Permeability

When constructing the permeability cubes, the dependences obtained during laboratory core studies were used. But during the adaptation, the permeability multipliers were used for individual regions of wells, in which the operation was carried out using the technology of non – limiting sand removal to the bottom of the well (CHOPS-the technology of cold production of heavy oil with sand extraction). During the extraction of sand, long channels with increased permeability (wormholes) are formed, which grow from the well into the oil reservoir at distances of 200 m or more.

Modeling of thermal properties. Cubes of specific heat capacity and thermal conductivity were used to model the thermal properties of the rock. Since there are no initial data on these properties, the parameters were selected by reproducing oil production in the areas using steam injection.

In all sections, the values were used: specific heat capacity (HEATCR) in sandstones of 1200 kJ/m³/K and in clays of 1600 kJ/m³/K; specific heat conductivity (THCONR) in sandstones of 1800 kJ/m/day/C and in clays of 3000 kJ/m/day/C.

Adaptation to the development history. Since the purpose of building a hydrodynamic model is to be able to plan development and predict the results of drilling wells and GTE, the model should adequately describe the development process. The results of the hydrodynamic calculations generated by the simulator should be close to the actual development history. Due to the fact that this model belongs to the category of the most complex – thermal-compositional, there are inconsistencies in the downhole adaptation. This is also due to the fact that the model is a sector, which accordingly requires the connection of side aquifers. The results of the adaptation are shown in Figures 7-8.

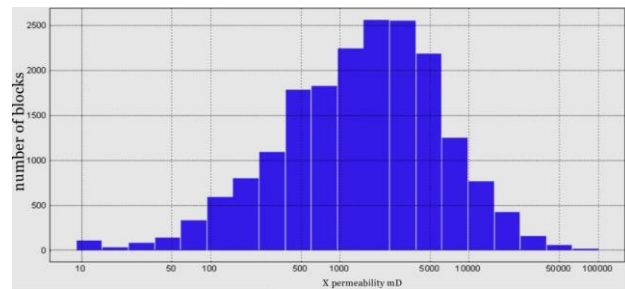


Figure 6 - Histogram of the distribution of the permeability cube in the model

Calculation of forecast indicators for options. After preparing the model and carrying out the adaptation, forecasts of the main technological indicators of the development were made for different schemes of alternating steam-water injection, and different volumes of steam and water. 2 schemes of steam and water injection were modeled, steam with parameters-240C and 40% dryness, water-20C, injection period 3-3 and 1 scheme basic version: a total of 10 options (Table 5).

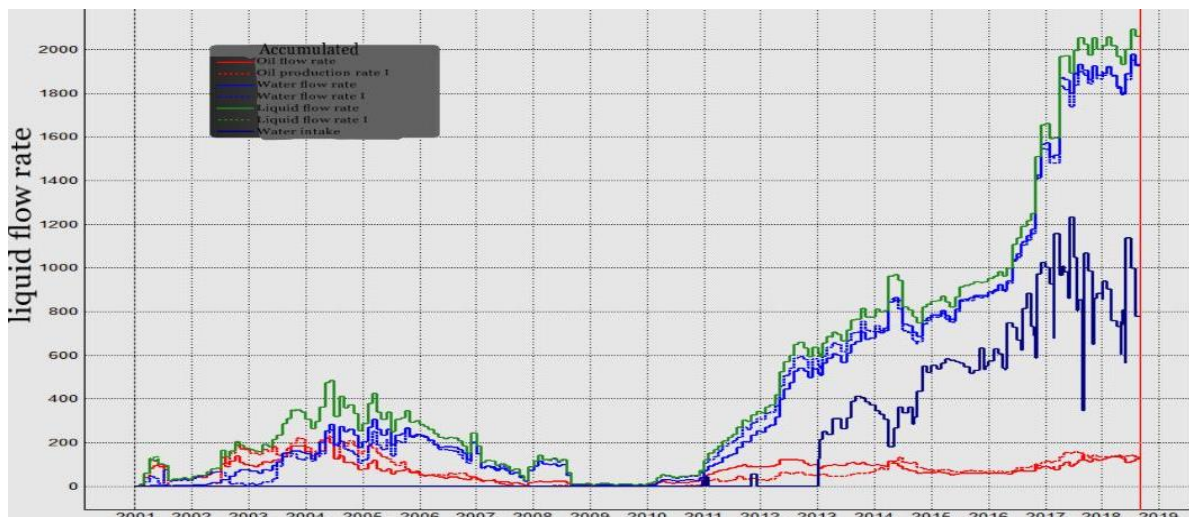


Figure 7 - Results of adaptation by dynamic indicators

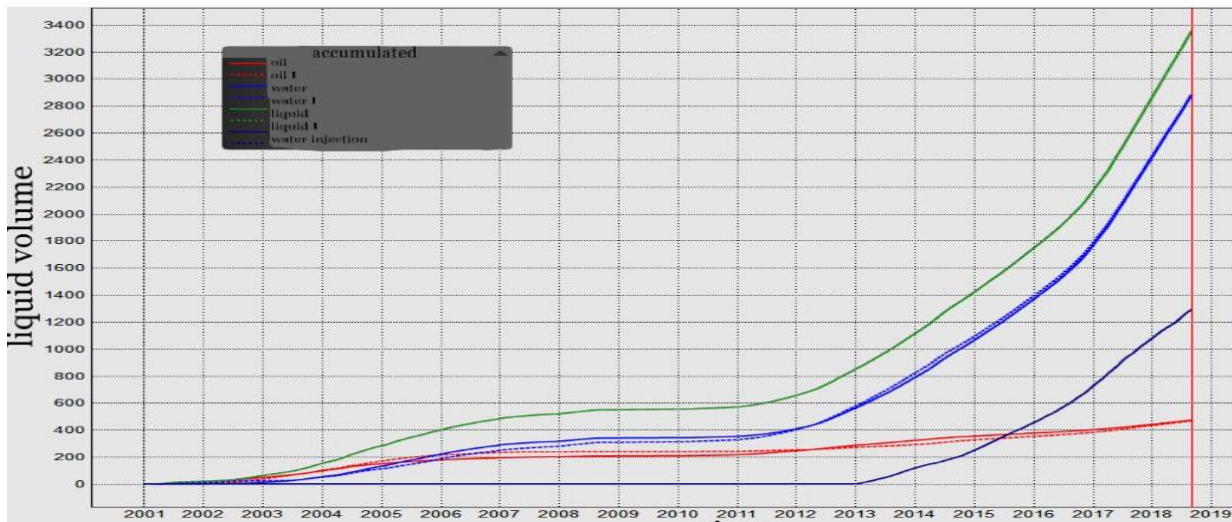


Figure 8 - Adaptation results for accumulated indicators

Table 5 - Forecast by options

Varian ts	Loading System	Loading period	Steam injection volume	Steam generators	Number of injection wells	Water injection volume
1	Basic					
2	<i>Situational</i>	3/3	11 t/h	2	3	50% - 100%
3	<i>Chessboard</i>		11 t/h	2	3	50%
4	<i>Chessboard</i>		11 t/h	2	3	100%
5	<i>Chessboard</i>		22 t/h	2	3	50%
6	<i>Chessboard</i>		22 t/h	2	3	100%
7	<i>G shaped</i>		11 t/h	2	3	50%
8	<i>G shaped</i>		11 t/h	2	3	100%
9	<i>G shaped</i>		22 t/h	2	3	50%
10	<i>G shaped</i>		22 t/h	2	3	100%



Figure 9 - Dynamics of project oil production and ORF

The results of the forecasts for 10 variants were plotted on the graph (Fig. 9) for the convenience of visual analysis

As can be seen from the dynamics of project oil production and ORF, the highest accumulated production is demonstrated by option 5.

Conclusions

The technology of alternating steam and water injection is aimed at increasing the displacement coefficient in poorly drained zones of the reservoir saturated with high-viscosity oil. This

technology was considered both as a replacement for traditional water flooding, and as a replacement for steam injection.

The interim results of the PILOT TESTS on the use of this technology were mixed. In some areas, a significant effect was obtained. For example, in the western section of the first facility, significant increases in production rates and additional oil production were obtained. At the same time, in some areas, a significant effect is not observed.

Thus, from the point of view of technological efficiency, option 5 is preferred - a staggered system of steam and water injection, the injection period is 3-3, the volume of steam and water injection is 22 t/h for 3 injection wells, the volume of water injection is 50% of steam for 3 injection wells, since it provides the highest ORF value (34.1% in 2034).

Conflict of interest. On behalf of all authors, the corresponding author declares that there is no conflict of interest.

Cite this article as: Moldabayeva G.Zh., Agzamov A.Kh., Suleimenova R.T., Elefteriadi D.K., Abileva S. Zh., Baluanov B. A. Hydrodynamic modeling of field development using enhanced oil recovery methods. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* 2021. № 2 (317), pp. 14-22. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.13>

Қабаттың мұнай бергіштігін күшейтетін әдістерді қолдана отырып кен орнын игеруді гидродинамикалық модельдеу

^{1*} Молдабаева Г.Ж. , ² Агзамов А.Х., ¹Сүлейменова Р. Т. , ¹ Елефтериadi Д.К., ¹Абилева С. Ж.,
¹Балуанов Б. А.

¹ Satbayev University, Алматы, Қазақстан

² Карши инженерлік-экономикалық институты, Карши, Өзбекстан

* Corresponding author email: g.moldabayeva@satbayev.university; moldabayeva@gmail.com

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақалада цифрлық геологиялық модельдеу, ұңғымалар туралы мәліметтерді геологиялық торға орналастыру, бу мен суды кезекпен айдау технологиясын модельдеу туралы айтылады. Кезекпен айдау - тұтқырлығы жоғары мұнай кен орындарындағы айдау ұңғымасына бу мен судың циклдік айдалуын қамтиды. Бұл технологияның мәні - 2-4 ай бойы буды айдау кезінде қабат қызады, нәтижесінде мұнайдың тұтқырлығы төмендейді және қозғалғыштығы артады. Содан кейін су айдау кезеңі басталады, бұл кезде қабаттағы қыздырылған мұнай өндірісі жалғаса береді және қабат қысымы сақталады. Сандық геологиялық модельдеу үшін келесі мәліметтер жинақталып, өңделіп дайындалды: модельдеу объектісіндегі ұңғымалар тізімі, ұңғыма сағаларының координаттары, ұңғыма альтитудасы, ұңғыма траекторияларының инклинометриясы, ұңғымаларды есепке алу деректері, жынысөзек алынып бұрғыланған ұңғымаларды талдау және цифрлық сейсмикалық мәліметтер, олар (стратиграфиялық горизонттардың жоғарғы жағындағы құрылымдық беттер, параметрлердің карталары, жанасу беттері, жер қыртысының жарылған жерлері, мақсатты горизонттардың жоғарғы жағындағы құрылымдық карталар, изохрондық карталар, жылдамдық карталары).

Түйін сөздер: модельдеу, ұңғыма, талдау, жынысөзек алу, гидродинамикалық зерттеу.

Авторлар туралы ақпарат:

Техника ғылымдарының докторы, Satbayev University, «Мұнай инженерия» кафедрасының профессоры. 050013, Сампаев 22а, Алматы, Қазақстан. Электрондық пошта: g.moldabayeva@satbayev.university; moldabayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7331-1633>.

Мақала келді: 23 ақпан 2021
Рецензенттен өтті: 10 наурыз 2021
Қабылданды: 23 сәуір 2021

Молдабаева Гульназ Жаксылыковна

Агзамов Аваз Хамидиллаевич

Сүлейменова Райхан Тауиповна

Елефтериadi Дмитрий Константинович

Абилева Сәуле Жалғасбайқызы

Балуанов Бақытжан Айтуарұлы

Техника ғылымдарының докторы, Карши инженерлік-экономикалық институты, Мұнай және газ кен орындарын игеру және пайдалану кафедрасының профессоры, 180100, Mustakillik даңғылы, 225, Карши, Өзбекстан.

«Мұнай инженерия» кафедрасының докторанты, Satbayev University, 050013, Сампаева 22а, Алматы, Қазақстан. Электрондық пошта: raika_83@mail.ru, 830809400443-D@stud.satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-7995-5560>.

«Мұнай инженерия» кафедрасының докторанты, Satbayev University, 050013, Сампаева 22а, Алматы, Қазақстан. dimon636_91@mail.com

«Мұнай инженерия» кафедрасының докторанты, Satbayev University, 050013, Сампаева 22а, Алматы, Қазақстан. Электрондық пошта: saulezh007@gmail.com.

«Мұнай инженерия» кафедрасының докторанты, Satbayev University, 050013, Сампаева 22а, Алматы, Қазақстан. baluan101@gmail.com.

Гидродинамическое моделирование разработки месторождения с применением методов повышения нефтеотдачи пластов

^{1*} Молдабаева Г.Ж., ² Агзамов А.Х., ¹ Сулейменова Р. Т., ¹ Елефтериادي Д.К., ¹Абилева С. Ж.,
¹Балуанов Б. А.

¹ Satbayev University, Алматы, Казахстан

² Каршинский инженерно-экономический институт, г.Карши, Узбекистан

* Электронная почта автора: g.moldabayeva@satbayev.university; moldabayeva@gmail.com

<p>Статья поступила: 23 февраля 2021 Рецензирование: 10 марта 2021 Принята в печать: 23 апреля 2021</p>	<p>АННОТАЦИЯ В данной статье рассматривается цифровая геологическая модель, перенос скважинных данных на геологическую сетку, моделирование технологии чередующейся закачки пара и воды. Чередующая закачка подразумевает циклическую закачку пара и воды в нагнетательную скважину на месторождениях высоковязких нефтей. Суть данной технологии заключается в том, что во время закачки пара на протяжении 2–4 мес. происходит прогрев пласта, приводящий к снижению вязкости и увеличению мобильности нефти. Далее наступает период закачки воды, во время которого продолжается выработка уже прогретой нефти и поддержка пластового давления. Для цифрового геологического моделирования проводился сбор, обработка и подготовка следующих данных: список скважин, вскрывающих объект моделирования, координаты устьев скважин, альтитуда скважин, инклинометрия траекторий скважин, данные ГИС по скважинам, анализ скважин, пробуренных с отбором керна и оцифрованные сейсмические данные (структурные поверхности по кровле стратиграфических горизонтов, карты параметров, поверхности контактов, разломы, структурные карты по кровле целевых горизонтов с разломами, карты изохрон, карты скоростей). Ключевые слова: моделирование, скважина, анализ, отбора керна, гидродинамическое исследование.</p>
<p>Молдабаева Гульназ Жаксылыковна</p>	<p>Информация об авторах: Доктор технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Нефтяная Инженерия», Satbayev University, 050013, Сатпаева 22а, Алматы, Казахстан. https://orcid.org/0000-0001-7331-1633. E-mail: g.moldabayeva@satbayev.university; moldabayeva@gmail.com</p>
<p>Агзамов Аваз Хамидиллаевич</p>	<p>Доктор технических наук, профессор кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» Каршинский инженерно-экономического институт, 180100, проспект Мустакиллик, 225, г.Карши, Узбекистан.</p>
<p>Сулейменова Райхан Таупиховна</p>	<p>Докторант кафедры «Нефтяная Инженерия», Satbayev University, 050013, Сатпаева 22а, Алматы, Казахстан. https://orcid.org/0000-0001-7995-5560. E-mail: raika_83@mail.ru, 830809400443-D@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-7995-5560.</p>
<p>Елефтериادي Дмитрий Константинович</p>	<p>Докторант кафедры «Нефтяная Инженерия», Satbayev University, 050013, Сатпаева 22а, Алматы, Казахстан. E-mail: dimon636_91@mail.com</p>
<p>Абилева Сауле Жалгасбайқызы</p>	<p>Докторант кафедры «Нефтяная Инженерия», Satbayev University, 050013, Сатпаева 22а, Алматы, Казахстан. E-mail: saulezh007@gmail.com.</p>
<p>Балуанов Бакытжан Айтуарович</p>	<p>Докторант кафедры «Нефтяная Инженерия», Satbayev University, 050013, Сатпаева 22а, Алматы, Казахстан. baluan101@gmail.com.</p>

Reference

- [1] Lysenko V.D. Dizayn razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy [Designing the development of oil fields]. Moskva, Nedra, 1987 g. (in Russ).
- [2] Proyeckt Probnaya ekspluatatsiya mestorozhdeniya Karazhanbas Severnyy [Trial operation of the Karazhanbas Severny field]. TOO KazNIGRI. Atyrau, 2004 g. (in Russ).
- [3] Dopolneniye k Proyecktu Probnaya ekspluatatsiya mestorozhdeniya Karazhanbas Severnyy [rial Operation of the Karazhanbas Severny Field]. TOO KazNIGRI. Atyrau, 2004 g. (in Russ).
- [4] Gimatudinov SH.K. Spravochnaya kniga po dobyche nefti [Reference book on oil production]. Moskva, Nedra, 1974 (in Russ).
- [5] Kiinov L.K. Razrabotka mestorozhdeniy parafinistykh i vyazkikh neftey v zapadnom Kazakhstane [Development of deposits of paraffinic and viscous oils in western Kazakhstan]. Moskva, VNIIOENG, 1996 g. (in Russ).
- [6] Moldabayeva G.Zh., Suleimenova R.T., “Scientific and Technical Substantiation of Reducing Oil Viscosity”, International Journal of Engineering Research and Technology, (ISSN 0974-3154) 2020, 13(5), с. 967-972 (in Eng).
- [7] Eric Delamaide. Polymer flooding of heavy oil – from screening to full-field extension. SPE-171105-MS, 2014. (in Eng).
- [8] James J. Sheng, Bernd Leonhardt, Nasser Azri. Status of polymer-flooding technology, SPE 174541, 2015. (in Eng).
- [9] Wassmuth F.R., Green K., Hodgins L., Turta A.T. Polymer Flood technology for heavy oil recovery, PAPER 2007-182 Canadian International petroleum conference, 2007. (in Eng).

- [10] Moldabayeva G.Zh., Suleimenova R.T., Abileva S. Zh., Baluanov B. A. Karimova A.S. Effektivnost' primeneniya fizicheskogo vozdeystviya na produktivnyy plast dlya snizheniya вязкости i uvelicheniya nefteotdachi plastov [The effectiveness of the use of physical impact on the reservoir to reduce the viscosity and increase oil recovery]. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. 2021. № 1 (316), pp. 53-61. (In Rus.). <https://doi.org/10.31643/2021/6445.07>
- [11] Beisembetov, I. K., Nusupov, K. K., Beisenkhanov, N. B., Zharikov, S. K., Kenzhaliev, B. K., Akhmetov, T. K., & Seitov, B. Z. (2015). Synthesis of SiC thin films on Si substrates by ion-beam sputtering. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 9(2), 392–399. <https://doi.org/10.1134/s1027451015010267> (in Eng).
- [12] Bekibayev, T. T., Zhapbasbayev, U. K., Ramazanova, G. I., Minghat, A. D., ... Bosinov, D. Z. (2021). Simulation of oil pipeline shutdown and restart modes. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo syr'â/Complex Use of Mineral Resources/Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*, 316(1), 15–23. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.02> (in Eng).

Литература

- [1] Лысенко В.Д. «Проектирование разработки нефтяных месторождений». Москва, «Недра», 1987
- [2] Проект «Пробная эксплуатация месторождения Каражанбас Северный». ТОО «КазНИГРИ». Атырау, 2004
- [3] Дополнение к Проекту «Пробная эксплуатация месторождения Каражанбас Северный». ТОО «КазНИГРИ». Атырау, 2004
- [4] Гиматулинов Ш.К. «Справочная книга по добыче нефти». Москва, «Недра», 1974
- [5] Кишинов Л.К. «Разработка месторождений парафинистых и вязких нефтей в западном Казахстане». Москва, «ВНИИОЭНГ», 1996
- [6] Moldabayeva G.Zh., Suleimenova R.T., “Scientific and Technical Substantiation of Reducing Oil Viscosity”, *International Journal of Engineering Research and Technology*, (ISSN 0974-3154) 2020, 13(5), с. 967-972
- [7] Eric Delamaide. Polymer flooding of heavy oil – from screening to full-field extension. SPE-171105-MS, 2014.
- [8] James J. Sheng, Bernd Leonhardt, Nasser Azri. Status of polymer-flooding technology, SPE 174541, 2015.
- [9] Wassmuth F.R., Green K., Hodgins L., Turta A.T. Polymer Flood technology for heavy oil recovery, PAPER 2007-182 Canadian International petroleum conference, 2007.
- [10] Молдабаева Г.Ж., Сүлейменова Р. Т., Агзамов А. Х., Абилева С. Ж., Балуанов Б. А. Каримова А. С. Эффективность применения физического воздействия на продуктивный пласт для снижения вязкости и увеличения нефтеотдачи пластов // *Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. 2021. №1 (316), стр. 53-61. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.07>
- [11] Beisembetov, I. K., Nusupov, K. K., Beisenkhanov, N. B., Zharikov, S. K., Kenzhaliev, B. K., Akhmetov, T. K., & Seitov, B. Z. (2015). Synthesis of SiC thin films on Si substrates by ion-beam sputtering. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 9(2), 392–399. <https://doi.org/10.1134/s1027451015010267>
- [12] Bekibayev, T. T., Zhapbasbayev, U. K., Ramazanova, G. I., Minghat, A. D., ... Bosinov, D. Z. (2021). Simulation of oil pipeline shutdown and restart modes. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo syr'â/Complex Use of Mineral Resources/Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*, 316(1), 15–23. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.02>



UDC 669.1.017

DOI: 10.31643/2021/6445.14



IRSTI 53.49.13

Comparative analysis of the structure of solid and hollow steel cast billets

^{1*}Zhakupova A.T., ²Salina V.A.

^{1*} D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

² Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

* Corresponding author email: aray_zhakupova86@mail.ru

ANNOTATION

This paper presents the research results of solid structure and hollow steel billets obtained by continuous casting. To substantiate the feasibility of using a hollow billet as an initial one in the production of seamless hot-rolled pipes, a comparative analysis of the distribution of non-metallic inclusions, macro- and microstructure, as well as segregation by structural zones was carried out. When analyzing the macrostructure of a hollow billet, two distinct zones were revealed: equiaxed small and columnar crystals, which distinguishes it, compared with a solid billet, by the absence of a zone of misoriented crystals. This, in turn, helps to eliminate defects such as axial porosity and segregation. The improved quality of the macrostructure during casting of a hollow billet is explained by more favourable conditions for heat removal and a higher rate of solid-phase advance due to bilateral cooling, and less shrinkage of the melt due to its cross-sectional geometry. The distribution of nonmetallic inclusions, consisting of oxide, sulfide and oxysulfide compounds, and liquidation elements, showed that they are concentrated mainly at the boundaries of crystalline zones, and for a solid billet and in the central part. This fact is caused by the development of a zone of intense heat removal. When research the microstructures of solid and hollow workpieces, a ferrite-pearlite mixture is observed in both cases. The microstructure of the hollow billet is more dispersed, which is confirmed by durometric measurements.

Keywords: continuous casting, liquation, macrostructure, non-metallic inclusions.

Received: 28 February 2021
Peer reviewed: 10 March 2021
Accepted: 04 May 2021

Information about authors:

Zhakupova Aray Tolepbergenovna

PhD student at the School of Metallurgy and Mineral Processing, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan. Email: aray_zhakupova86@mail.ru, orcid id: <https://orcid.org/0000-0002-7392-1172>

Salina Valentina Alekseevna

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. Email: valentina_salina@mail.ru, orcid id: <https://orcid.org/0000-0003-4340-5430>

Introduction

The increasing requirements of the oil and gas industry to the level of pipe products properties requires intensification of work to improve the technological properties and quality indicators of continuously cast billets. To solve these problems, pipe manufacturers are introducing modern production technologies and modernizing equipment [1-6].

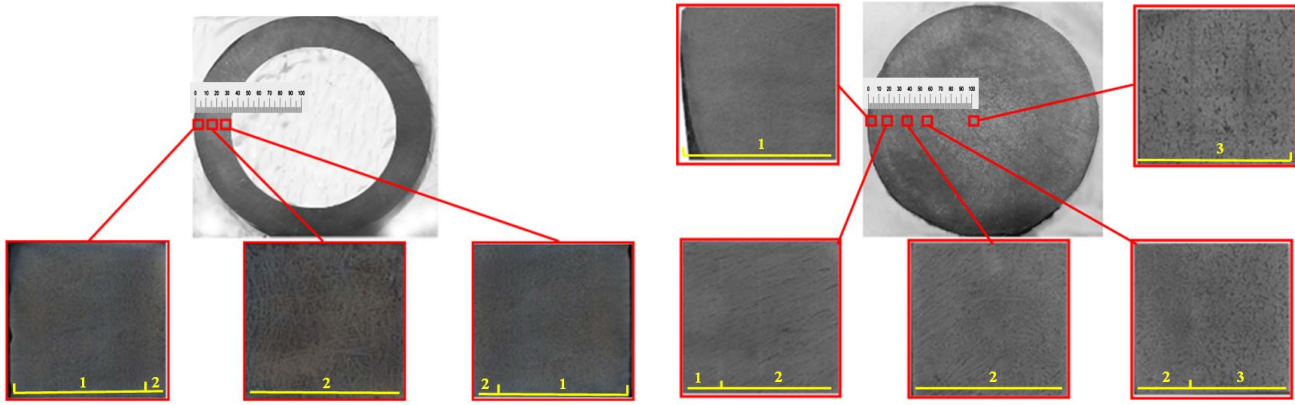
One of the effective methods for improving the quality of pipe products is using a hollow billet as an initial one. This will improve the quality, in particular, almost wholly eliminate axial porosity and segregation. Also, due to the presence of a cavity in the billet, it is possible to use double-sided

cooling, which promotes better conditions for the crystallization of the melt and an increase in the productivity of continuous casting machines [6-13].

In connection with the above, the purpose of this work was to research the formation of the macro- and microstructure of hollow and solid billets and analyze the distribution of non-metallic inclusions and liquidation elements.

Material and research methods

The research object is billets from steel 09G2S: solid \varnothing 210 mm and hollow \varnothing 210×140 mm. The billets under research were cast into sand molds 250 mm high to exclude the effect of end cooling, in one of which a rod was used to form an internal cavity. After casting, templates were cut from the



1 – zone of equiaxed small crystals; 2 – zone of columnar crystals; 3 – zone of misoriented crystals

Figure 1 – Macrostructure of solid and hollow billets

billets at a distance of 100 mm from the end to analyze the structure and chemical composition.

The macrostructure and the degree of development of internal defects were determined according to GOST 10243-75 “Steel. Test methods and evaluation of macrostructure” after etching in 50% HCl solution at a temperature of 60° C for 40 minutes. Microstructures were researched by GOST 8233-86 “Steel. Microstructure Standards”. Preparation of thin sections for work on a microscope was carried out according to a technique that included surface polishing, etching of thin sections in a 20% aqueous solution of HNO₃. The microstructure was revealed by etching in a 4% HNO₃ solution. The study of the microstructure was carried out using an Olympus BX53M microscope by optical metallography.

To assess the liquation, the chemical composition was determined on an optical emission spectrometer SPECTROMAXx by the spectral method according to GOST R 54153 “Steel. Method of atomic emission spectral analysis”.

Determination of contamination and identification of nonmetallic inclusions was carried out on microsections sampled over the billets section using optical microscopy on Olympus BX53M and X-ray spectrometry using a multichannel spectrometer CPM 25. Contamination of the microsections was assessed separately for oxide, sulfide and oxysulfide inclusions. The calculation of contamination with non-metallic inclusions was carried out by GOST 1778-70 “Metallographic methods for the determination of non-metallic inclusions” (method L).

Durometric research of microstructures were carried out using a PMT-3 microhardness tester with a load of 20-100 g.

Research results and discussion

Macrostructure. The main structural zones characterize the macrostructure of the templates under research (Figure 1): the cortical zone, the zone of columnar crystals, and for a solid billet, there is also a zone of misoriented crystals.

The zone of small equiaxed crystals consists of crystallites with a short length, a solid billet 18 mm, and a hollow billet 8-9 mm. An increase in the thickness of the solidifying layer, due to the formation of a developed cortical zone, leads to a decrease in the solid phase advance intensity. Simultaneously, the value of the temperature gradient remains sufficiently high, which leads to the formation of elongated columnar crystals. The lengths of columnar crystals zones for solid and hollow blanks are 30 mm and 22 mm, respectively.

The absence of a pronounced zone with misoriented crystals in a hollow billet indicates an improvement in the cooling effect's efficiency on the surface of continuously cast billets during casting in comparison with a solid billet.

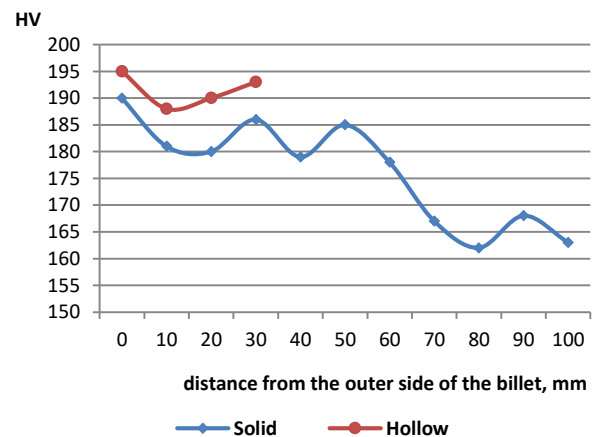


Figure 2 – Microhardness of billets

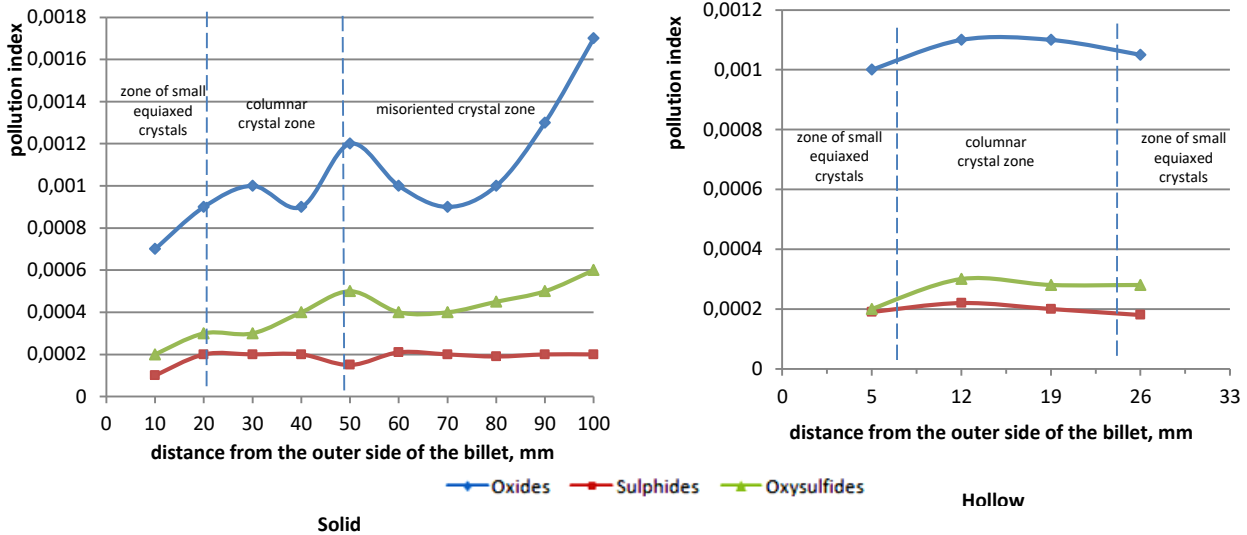


Figure 3 – Distribution of non-metallic inclusions over the section of the billet

The obtained macrostructures during casting of a hollow billet confirm more favourable conditions for heat removal, a greater intensity of solid-phase advance, and a more homogeneous steel structure.

Durometric studies were carried out to assess the homogeneity of the structure of templates of solid and hollow blanks. Figure 2 shows the measurement results.

The microhardness values at a load of 25 g confirm a more homogeneous structure for the hollow blank.

Non-metallic inclusions. Analysis of non-metallic inclusions identified by X-ray spectrometry showed the presence of oxide (Al_2O_3), sulfide (CaS) and oxysulfide ($Al_2O_3 \cdot CaS$) compounds, the cause of which is the use of deoxidizers (Al) and modifying additives (Ca).

The distribution of non-metallic inclusions over the billet section is shown in Figure 3.

Analysis of the distribution of nonmetallic inclusions over the cross-section of a solid billet showed that the distribution is of a hopping pattern associated with the conditions for changing heat removal and changing crystalline zones.

The results, in Figure 3, show that the content of inclusions increases when approaching the centre of the billet, but this increase is not monotonic. At a distance of 45-50 mm from the edge of the solid billet, corresponding to the columnar crystals zone's boundary, the content of oxide and oxysulfide inclusions increases, then, as the billet axis approaches, the range of inclusions reaches its maximum value. The uneven distribution of non-metallic inclusions is due to the solidification features of the misoriented crystals zone. A decrease in the temperature gradient due to a reduction in the solid phase advance intensity causes the intensive development of liquation.

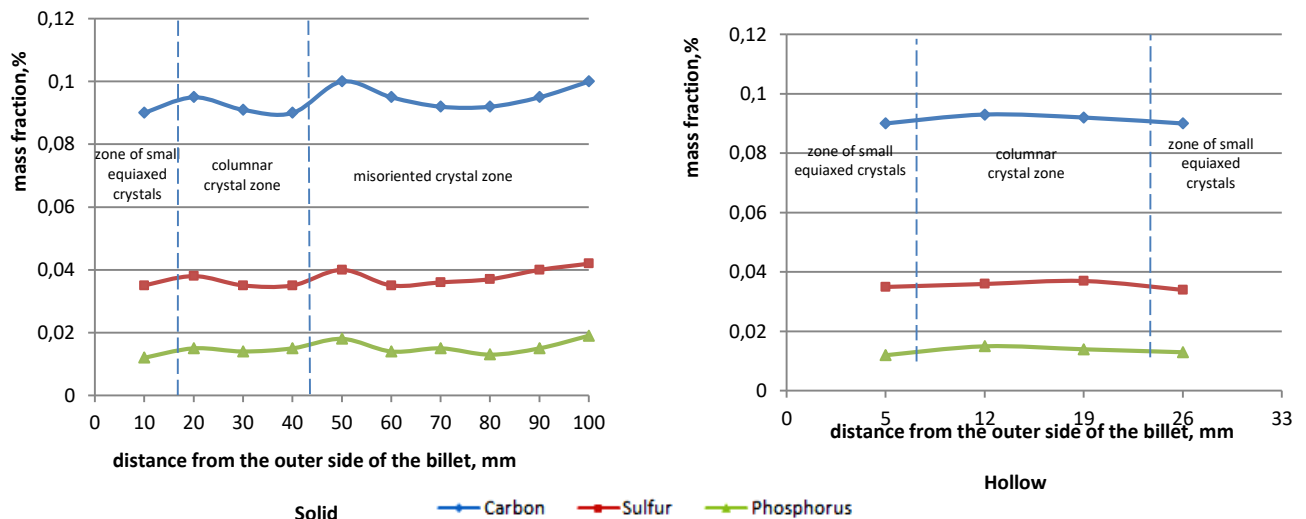


Figure 4 – Distribution of liquation elements over the section of the billet

Analyzing the hollow billet structure, it can be noted that there is a uniform distribution of all types of non-metallic inclusions. This indicates a higher rate of solid-phase advance due to double-sided cooling and lower billet section values.

Chemical heterogeneity. To research the processes of segregation of continuously cast billets, spectral chemical analysis was carried out with a given distance of at least 12 mm, taking into account the burnout diameter of 10 mm. Figure 4 shows the results of spectrometric analysis.

Surface layers of continuously cast billets, solidified under intensive solid-phase advance conditions, have a more uniform distribution of elements and a low degree of segregation. A change in the chemical composition of liquidating impurities is observed in the case of a solid billet when passing through the boundaries of crystalline zones.

In the central part of the solid billet, an increase in all elements' concentration was recorded. An

increase in chemical inhomogeneity in the axial part of continuously cast billets is explained by a change in the conditions of heat removal and the formation of equiaxed crystals zone, which solidifies under conditions of a minimum temperature gradient and maximum concentration overcooling.

Regarding the change in the content of liquidating elements over the hollow billet section, it should be noted that liquation appears insignificantly due to the significant development of the intense heat removal zone.

Microstructure. The research of hollow and solid billets microstructures showed a ferrite-pearlite structure (Figure 5).

A solid billet, ferrite (F), and pearlite (P) grains have an irregular shape with sharp corners. An increase in the size of ferrite and pearlite grains is observed along the section of the billet. The phase components' shape changes from more equiaxed in the cortical zone to elongated in the dendrite zone and polygonal in the axial part of the billet.

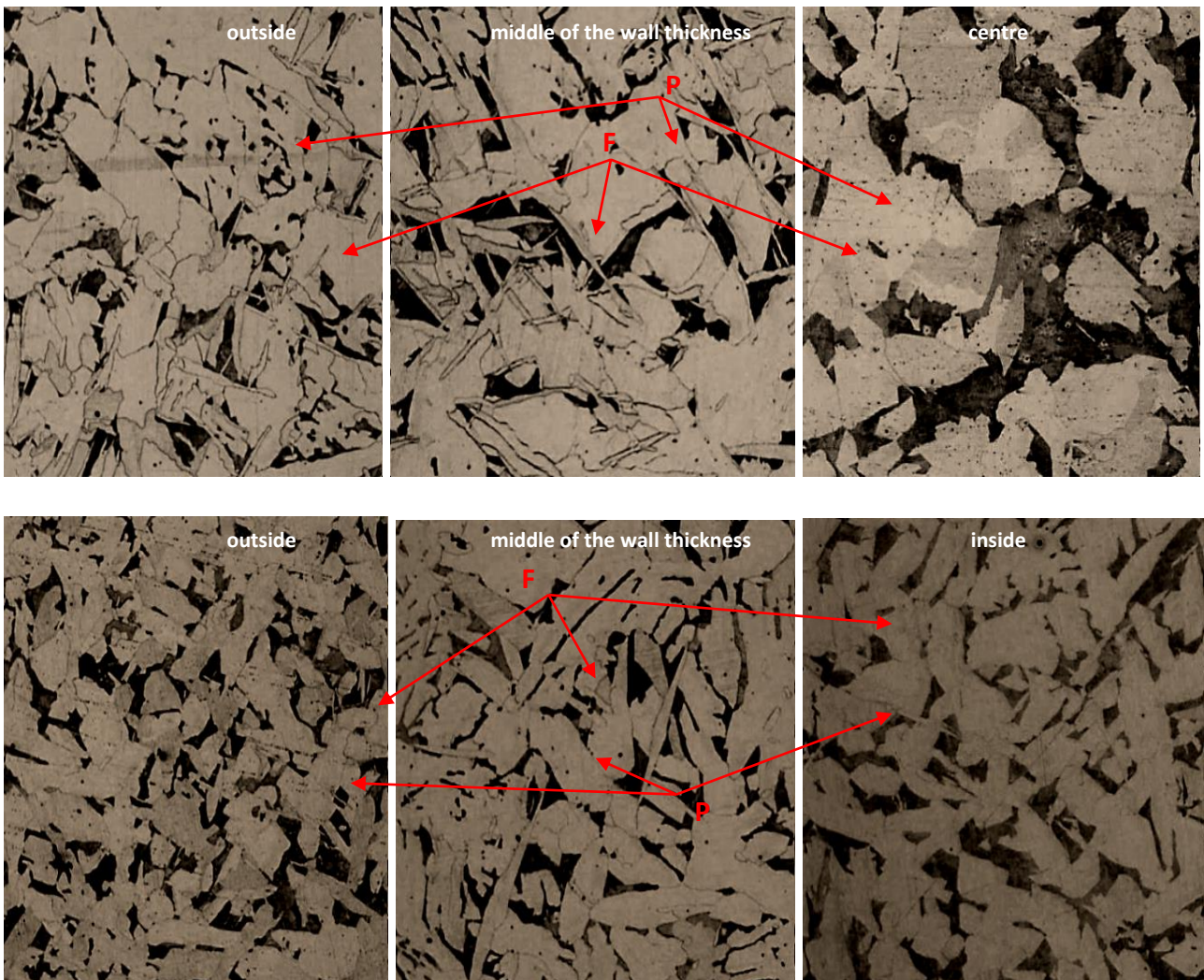


Figure 5 – Microstructures of billets (×100)

Both cases are characterized by acicular ferrite in the form of Widmanstätten ferrite, which is formed with a significant degree of liquid metal overcooling and differing in the degree of ferrite dispersion. The cast billets' obtained microstructures confirm the change in the values of the previously presented microhardness results.

Conclusion

The research results confirmed the improvement in the structure of the hollow billet after casting in comparison with the solid one. Simultaneously, the absence of the billet central

part allows avoiding the occurrence of such defects as axial porosity and segregation. Microstructure analysis showed a more dispersed structure in the hollow billet due to better cooling conditions. A more favourable distribution of non-metallic inclusions and liquidation elements is also observed in the hollow billet. Thus, the purpose of the research was achieved and the feasibility of using a hollow billet for the production of seamless oil and gas pipes was confirmed.

Conflict of interest. On behalf of all authors, the corresponding author declares that there is no conflict of interest.

Cite this article as: Zhakupova A.T., Salina V.A. Comparative analysis of the structure of solid and hollow steel cast billets. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* 2021. №2 (317), pp. 23-29. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.14>

Тұтас және қуыс болат құймалар дайындамаларының құрылымын салыстырмалы талдау

^{1*} Жакупова А.Т., ² Салина В.А.

¹ Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан
² Металлургия институты, Ресей Ғылым Академиясының Орал бөлімшесі, Екатеринбург, Ресей

* Автордың электрондық поштасы: aray_zhakupova86@mail.ru

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыста үздіксіз құю нәтижесінде алынған тұтас және қуыс болат дайындамалардың құрылымын зерттеу нәтижелері келтірілген. Жіксіз ыстықтай прокатталған құбырлар өндірісінде қуыс дайындаманы бастапқы ретінде пайдалану орындылығын негіздеу үшін бейметалл кірінділердің, макро- және микроқұрылымдардың таралуына, сондай-ақ құрылымдық аймақтар бойынша ликвацияға салыстырмалы талдау жүргізілді. Қуыс дайындаманың макроқұрылымын талдау кезінде екі айқын аймақ анықталды: тең осьті ұсақ және бағаналы кристалдар, бұл оны қатты дайындамамен салыстырғанда, бағытталған кристалдар аймағының болмауымен ерекшелендіреді. Бұл өз кезегінде осьтік кеуектілік пен ликвация сияқты ақауларды жоюға көмектеседі. Қуыс дайындаманы құю кезінде макроқұрылымның жақсартылған сапасы жылу берудің неғұрлым қолайлы жағдайларымен және екі жақты салқындату және балқыманың көлденең қимасының геометриясына байланысты аз шөгуге есебінен қатты фазаның жылжу қарқындылығымен түсіндіріледі. Оксидті, сульфидті және оксисульфидті қосылыстардан тұратын бейметалл кірінділердің, сондай-ақ ликвацияланатын элементтердің таралуы олардың негізінен кристалды аймақтардың шекараларында, ал тұтас дайындама үшін және орталық бөлігінде шоғырланғанын көрсетті. Бұл факт қарқынды жылу шығару аймағының дамуына байланысты. Тұтас және қуыс дайындамалардың микроқұрылымдарын зерттеу кезінде екі жағдайда да феррит-перлит қоспасы байқалады. Қуыс дайындаманың микроқұрылымы үлкен дисперсиямен сипатталады, бұл дюрметриялық өлшемдермен расталады.
Түйін сөздер: үздіксіз құю, ликвация, макроқұрылым, бейметалл кірінділер.

Мақала келді: 28 ақпан 2021
Рецензенттен өтті: 10 наурыз 2021
Қабылданды: 04 мамыр 2021

Авторлар туралы ақпарат:

Жакупова Арай Толепбергеновна

металлургия және пайдалы қазбаларды байыту мектебінің докторанты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан. *orcid id:* <https://orcid.org/0000-0002-7392-1172>. Email: aray_zhakupova86@mail.ru

Салина Валентина Алексеевна

техника ғылымдарының кандидаты, аға ғылыми қызметкер, Металлургия институты, Ресей Ғылым Академиясының Орал бөлімшесі, Екатеринбург, Ресей. Email: valentina_salina@mail.ru, *orcid id:* <https://orcid.org/0000-0003-4340-5430>

Сравнительный анализ структуры сплошных и полых стальных литых заготовок

^{1*} Жакупова А.Т., ² Салина В.А.

¹ Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

² Институт металлургии, Уральское отделение Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

* Электронная почта автора: aray_zhakupova86@mail.ru

<p>Статья поступила: 28 февраля 2021 Рецензирование: 10 марта 2021 Принята в печать: 04 мая 2021</p>	<p>АННОТАЦИЯ</p> <p>В данной работе приведены результаты исследования структуры сплошных и полых стальных заготовок, полученных непрерывной разливкой. Для обоснования целесообразности применения в качестве исходной, при производстве бесшовных горячекатаных труб, полой заготовки, проведен сравнительный анализ распределения неметаллических включений, макро- и микроструктуры, а также ликвации по структурным зонам. При анализе макроструктуры полой заготовки выявлено две ярко выраженных зон: равноосных мелких и столбчатых кристаллов, что отличает ее, в сравнении со сплошной заготовкой, отсутствием зоны разориентированных кристаллов. Это, в свою очередь, способствует исключению таких дефектов, как осевая пористость и ликвация. Улучшенное качество макроструктуры при разливке полой заготовки объясняется более благоприятными условиями теплоотвода и большей интенсивностью продвижения твердой фазы за счет двустороннего охлаждения и меньшей усадки расплава ввиду ее геометрии поперечного сечения. Распределение неметаллических включений, состоящих из оксидных, сульфидных и оксисульфидных соединений, а также ликвирующих элементов, показало, что они концентрируются в основном на границах кристаллических зон, а для сплошной заготовки и в центральной части. Данный факт вызван развитием зоны интенсивного теплоотвода. При исследовании микроструктур сплошной и полой заготовок в обоих случаях наблюдается ферритно-перлитная смесь. Микроструктура полой заготовки отличается большей дисперсностью, что подтверждено дюрOMETрическими измерениями.</p> <p>Ключевые слова: непрерывная разливка, ликвация, макроструктура, неметаллические включения.</p>
<p>Жакупова Арай Толепбергеновна</p>	<p>Информация об авторах: докторант Школы металлургии и обогащение полезных ископаемых, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, Павлодар, Казахстан. Email: aray_zhakupova86@mail.ru, orcid id: https://orcid.org/0000-0002-7392-1172</p>
<p>Салина Валентина Алексеевна</p>	<p>кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт металлургии, Уральское отделение Российской академии наук, Екатеринбург, Россия. Email: valentina_salina@mail.ru, orcid id: https://orcid.org/0000-0003-4340-5430</p>

Reference

- [1] Bykov P. O. (2011). Snijenie centralnoi poristosti neprerivnolitogo slitka za schet kompleksnogo vozdeistviya na process kristallizacii [Reduction of the central porosity of a continuously cast ingot due to a complex effect on the crystallization process] // *Nauka i tehnika Kazahstana [Science and technology of Kazakhstan]*, (3–4). 7–10 (in Russ).
- [2] Bogomolov, A. V., Zhakupov, A. N., Kanayev, A. T., Sikach, I. A., Tugumov, K. K. (2016). Comparative Structural Strength Research of Hardened Carbon Steel and Hot-Rolled Alloy Steel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 142(1). 012076 (In Eng.). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/142/1/012076>.
- [3] Kotelnikov, A. B., Vopneruk, A. A., Makarov, A. V., Korobov, Yu. S., Kirichkov, A. A., Dagman, A. I., Shifrin, I. N. (2018). Novie materialy i tehnologii suschestvennogo povisheniya iznosostoikosti rabochei poverhnosti metallurgicheskogo oborudovaniya [New materials and technologies for a significant increase in the wear resistance of the working surface of metallurgical equipment] // *Tyazelo mashinostroenie [Heavy engineering]*, (9). 14–20 (in Russ).
- [4] Botnikov, S. A., Ryapolov, A. G., (2015). Tehnicheskie resheniya dlya proizvodstva kachestvennoi neprerivnolitoi zagotovki iz trubnoi, sortovoi i kolesnoi stalei [Technical solutions for the production of high-quality continuous cast billets from pipe, bar and wheel steels] // *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informacii [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information]*, 3. 42–46 (in Russ).
- [5] Beisembetov, I.K., Nusupov, K.K., Beisenkhanov, N.B. et al. Synthesis of SiC thin films on Si substrates by ion-beam sputtering. *J. Synch. Investig.* 9, 392–399 (2015). (In Eng.). <https://doi.org/10.1134/S1027451015010267>
- [6] Chen, X., Jiang, Z., Liu, F., Yu, J., Chen, K. (2017) Effect of Melt Rate on Surface Quality and Solidification Structure of Mn18Cr18N Hollow Ingot during Electroslag Remelting Process // *Steel Research International*, 88(2), 188–196 (In Eng.). <https://doi.org/10.1002/srin.201600186>.
- [7] Churkin, B. S., Ushenin, V. V., Panchuk, A. G., Gofman, E. B. (1996). Issledovanie formirovaniya usadochnoi rakovini v

- krupnoi poloi cilindricheskoi otlivke [Research of the shrinkage cavity formation in a large hollow cylindrical casting] // *Povishenie kachestva otlivok [Improving the quality of castings]*. 26–27 (in Russ).
- [8] Stulov, V.V. (2011). Modelirovanie ohlajdeniya stali v kristallizatorah [Modeling of steel cooling in molds] // *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of mechanical engineering and reliability of machines]*, (1). 73-77 (in Russ).
- [9] Kenzhaliev B.K., Kvyatkovsky S. A., Kozhakhmetov S. M., Sokolovskaya L. V., Semenova A. S. (2018). Depletion of waste slag of balkhash copper smelter. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo syr'â*. 306 (3), 45–53 (In Rus.). <https://doi.org/10.31643/2018/6445.16>
- [10] Zhakupova, A. T., Bogomolov, A. V., Zhakupov, A. N. (2020) The Influence of the Initial Billet on the Mechanical Properties of Pipes // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 969(1), 012033 (In Eng.). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/969/1/012033>.
- [11] Levkov, L. Y., Kissel'man, M. A., Shurygin, D. A. (2018) Current State, New Solutions and Prospects for Production of ESR Hollow Ingots in Russia // *Metallurgist*, 62(7-8). 738–752 (In Eng.). <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0716-9>.
- [12] Parshin, V. M., Smolyakov, A. S., Khrebin, V. N., Zhikharev, P. Y. (2012) Production of hollow continuous-cast billet for seamless pipe // *Steel in Translation*. 42(12). 825–829 (In Eng.). <https://doi.org/10.3103/s0967091212120091>.
- [13] Panichkin A.V., Kenzhaliyev B.K., Kenzhegulov A.K., Imbarova A.T., Karboz Zh.A., Shah A. The effect of the catalytic layer composition on the hydrogen permeability of assymetric tantalum-based membranes]. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Pidalanu*. 2020. № 4 (315), pp. 82-95. (In Eng.). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.40>

Литература

- [1] Быков, П. О. (2011). Снижение центральной пористости непрерывнолитого слитка за счет комплексного воздействия на процесс кристаллизации // *Наука и техника Казахстана*, (3–4). 7–10.
- [2] Bogomolov, A. V., Zhakupov, A. N., Kanayev, A. T., Sikach, I. A., Tugumov, K. K. (2016). Comparative Structural Strength Research of Hardened Carbon Steel and Hot-Rolled Alloy Steel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 142(1). 012076. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/142/1/012076>.
- [3] Котельников, А. Б., Вопнерук, А. А., Макаров, А. В., Коробов, Ю. С., Киричков, А. А., Дагман, А. И., Шифрин, И. Н. (2018). Новые материалы и технологии существенного повышения износостойкости рабочей поверхности металлургического оборудования // *Тяжелое машиностроение*, (9), 14-20.
- [4] Ботников, С. А., Ряполов А. Г. (2015) Технические решения для производства качественной непрерывнолитой заготовки из трубной, сортовой и колесной сталей // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*, 3. 42–46.
- [5] Beisembetov, I.K., Nusupov, K.K., Beisenkhanov, N.B. et al. Synthesis of SiC thin films on Si substrates by ion-beam sputtering. *J. Synch. Investig.* 9, 392–399 (2015). <https://doi.org/10.1134/S1027451015010267>
- [6] Chen, X., Jiang, Z., Liu, F., Yu, J., Chen, K. (2017) Effect of Melt Rate on Surface Quality and Solidification Structure of Mn18Cr18N Hollow Ingot during Electroslag Remelting Process // *Steel Research International*, 88(2), 188–196. <https://doi.org/10.1002/srin.201600186>.
- [7] Чуркин, Б. С., Ушенин, В. В., Панчук, А. Г., & Гофман, Э. Б. (1996). Исследование формирования усадочной раковины в крупной полой цилиндрической отливке // *Повышение качества отливок*. 26–27.
- [8] Стулов, В. В. (2011). Моделирование охлаждения стали в кристаллизаторах // *Проблемы машиностроения и надежности машин*, (1). 73-77.
- [9] Кенжалиев Б. К., Квятковский С. А., Кожухметов С. М., Соколовская Л. В., Семенова А. С. (2018). Обеднение отвальных шлаков балхашского медеплавильного завода. Комплексное использование минерального сырья. (Complex Use of Mineral Resources). 306 (3), 45–53. <https://doi.org/10.31643/2018/6445.16>
- [10] Zhakupova, A. T., Bogomolov, A. V., Zhakupov, A. N. (2020) The Influence of the Initial Billet on the Mechanical Properties of Pipes // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 969(1), 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/969/1/012033>.
- [11] Levkov, L. Y., Kissel'man, M. A., Shurygin, D. A. (2018) Current State, New Solutions and Prospects for Production of ESR Hollow Ingots in Russia // *Metallurgist*, 62(7-8). 738–752. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0716-9>.
- [12] Parshin, V. M., Smolyakov, A. S., Khrebin, V. N., Zhikharev, P. Y. (2012) Production of hollow continuous-cast billet for seamless pipe // *Steel in Translation*. 42(12). 825–829. <https://doi.org/10.3103/s0967091212120091>.
- [13] Panichkin A.V., Kenzhaliyev B.K., Kenzhegulov A.K., Imbarova A.T., Karboz Zh.A., Shah A. The effect of the catalytic layer composition on the hydrogen permeability of assymetric tantalum-based membranes]. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Pidalanu*. 2020. № 4 (315), pp. 82-95. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.40>



УДК 622.349.5:621.039.007
DOI: 10.31643/2021/6445.15



MPHTI 52.13

Influence of the "pumping wells" technology on the indicators of in situ leaching of uranium

¹ Aliev S. B., ^{2*} Omarbekov Ye.U.

¹ IPKON, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

* Corresponding author email: 13s_yernur88@mail.ru; y.omarbekov@stud.satbayev.university

<p>Received: 07 March 2021 Peer reviewed: 17 April 2021 Accepted: 06 May 2021</p>	<p>ABSTRACT</p> <p>This paper presents the results of experimental research applications "pumping wells" when the mining of uranium deposits by the method of In-Situ Leach Mining ISL in mine "Karatau". Analyzed the experience results of uranium deposits development in the conditions of high-pressure nature of groundwater. The experimental works have been conducted using proposed "pumping wells" technology. The implementation of the proposed "pumping well" technology did not affect the Me and pH values in comparison with the actual technology, but it did reduce the production cost. It is proved that by using the proposed technology and schemes in conditions of high-pressure nature of groundwater reduces the cost of procurement of cables, significantly reducing the cost of acquisition of submersible pumps, savings in the end cap.</p> <p>Keywords: Drillhole in situ leaching, high-pressure character, pumping wells, pH factor, Me urangehalt, wellhead process piping.</p>
<p>Aliev Samat Bikitaevich</p>	<p>Information about authors: Doctor of Technical Sciences, Professor, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3699-8322, Email: alsamat@gmail.com</p>
<p>Omarbekov Yernur Urazgalievich</p>	<p>PhD student of Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; https://orcid.org/0000-0003-1317-1303, Email: 13s_yernur88@mail.ru; y.omarbekov@stud.satbayev.university</p>

Влияние «насосных скважин» на показатели выщелачивания урана

¹ Алиев С.Б., ^{2*} Омарбеков Е.У.

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук ИПКОН РАН, Москва, Россия

² Satbayev University, Алматы, Казахстан

* Электронная почта автора: 13s_yernur88@mail.ru; y.omarbekov@stud.satbayev.university

<p>Статья поступила: 07 марта 2021 Рецензирование: 17 апреля 2021 Принята в печать: 06 мая 2021</p>	<p>АННОТАЦИЯ</p> <p>В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований применения «насосных скважин» при отработке месторождений урана методом подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) на руднике «Каратау». Проанализирован опыт разработки уранового месторождения в условиях высоконапорного характера подземных вод и предложена технология «насосных скважин». Внедрения технологии «насосных скважин» позволяет снизить себестоимость добычи, а содержание урана в продуктивном растворе (ПР) и величина pH не изменяется. Доказана, что при использовании предлагаемой технологии и схемы обвязки технологического блока в условиях высоконапорного характера</p>
---	---

подземных вод уменьшаются затраты на закупку кабельной продукции, погружных насосов, экономятся средства на монтаж оголовников.

Ключевые слова: ПСВ – подземное скважинное выщелачивание, высоконапорный характер, «насосные скважины», рН- показатель ионов водорода, Me – содержание урана, обвязка скважин.

Информация об авторах:

Алиев Самат Бикитаевич

- Доктор технических наук, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова, Российской академии наук, Москва, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-3699-8322>, Email: alsamat@gmail.com

Омарбеков Ернур Уразгалиевич

- PhD докторант Satbayev University, Алматы, Казахстан; <https://orcid.org/0000-0003-1317-1303>, Email: 13s_yernur88@mail.ru; y.omarbekov@stud.satbayev.university

Введение

Глобальный мировой кризис усилил изменение мировых энергетических ориентиров в сторону ядерного топлива. Сегодня уран превратился в стратегический продукт глобальной экономики, на долю которого приходится выработка более 15% электроэнергии в мире [1].

Казахстан является самым большим мировым производителем урана, представляющим примерно 22% мировой добычи урана в 2018 году. Казатомпром производит уран, используя свои дочерние предприятия, совместные предприятия. 26 рудников объединены в 13 добывающие предприятия, все они расположены в Казахстане и осуществляют добычу методом подземное скважинное выщелачивание (ПСВ). Урановые месторождения в Казахстане разрабатываются на глубине до 750 метров с использованием экологически безопасного и экономически оправданного метода подземного скважинного выщелачивания [2].

Подземное скважинное выщелачивание является способом отработки рудных месторождений пластово-инфильтрационного типа без поднятия руды на поверхность, путем избирательного перевода ионов природного урана в продуктивный раствор непосредственно в недрах [3].

Экспериментальная часть

Экспериментальный блок находится на руднике «Каратау». На экспериментальном блоке 30 закачных скважин, 14 откачных

скважин, расстояние между закачной и откачной скважинами 30 м. Принята рядная схема вскрытия. Для проведения экспериментальных работ была предложена усовершенствованная схема обвязки технологических скважин (рисунок 1), суть которой заключается в сооружении откачных скважин в формате закачных; вблизи от трансформаторных подстанций глубиной 50-100 м сооружаются «насосные скважины», оборудованные глухой безфильтровой колонной, в них располагаются погружные насосы. Суммарная мощность насосов равна - оптимальной при традиционной схеме обвязки [4].

Насосные скважины с откачными соединены шлангами и представляют собой систему сообщающихся сосудов. Видимо, необходимым условием при этом должен быть - положительный напор подземных вод над дневной поверхностью и расположение насоса ниже динамического уровня. Минимальное число таких «насосных скважин» – одна на технологический блок [5].

Для правильного ведения процесса подземного выщелачивания, соблюдения технологического режима, анализа работы полигона, планирования добычи урана и расхода реагентов необходимо выполнять расчеты ряда геотехнологических параметров.

Показатели геотехнологического процесса – к основным геотехнологическим показателям относятся: степень извлечения полезного компонента, величина жидкое на твердое (Ж/Т), удельный расход реагента. Остальные технологические показатели (концентрация извлекаемого компонента в растворе, время выщелачивания и т.п.) являются производными [6].

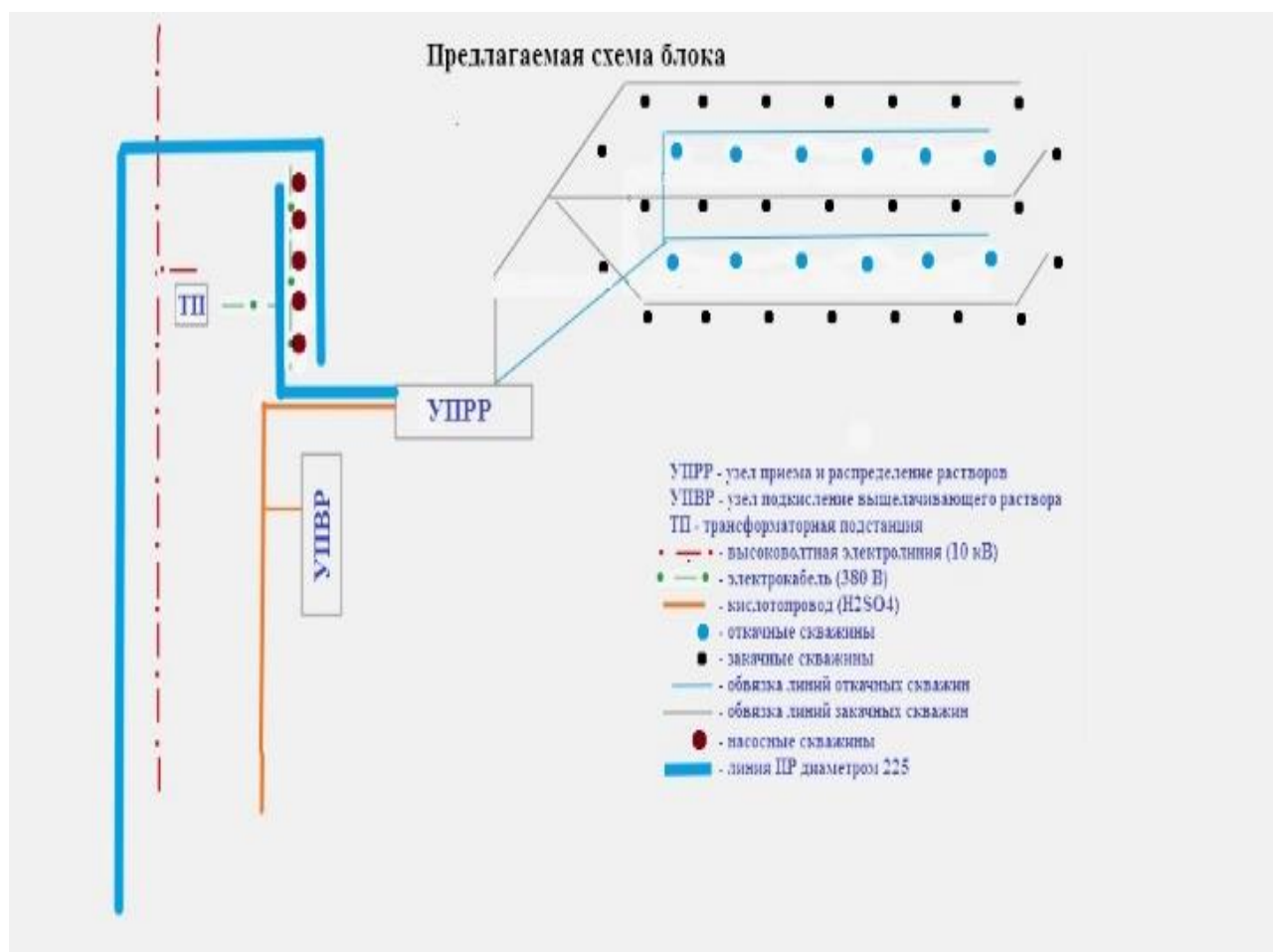


Рисунок 1 - Схема обвязки исследуемого блока в условиях высоконапорного характера подземных вод

Показатель pH имеет особое значение при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания. Для эффективного выщелачивания нужно добиться pH в диапазоне 1,5 – 2, в этой среде природный уран значительно лучше растворяется, но не всегда удаётся добиться одновременного или постепенного снижения pH показателя во всех скважинах [7].

При изучении материалов на исследуемом месторождении для выбора изучения процесса подземного скважинного выщелачивания основными показателями были приняты содержание урана в продуктивном растворе (Me) и водородный показатель (pH) [8]

Результаты и их обсуждения

В ходе исследования были собраны все данные технологических этапов на экспериментальном блоке №32 и практикуемой блоке №33 на руднике «Каратау» (таблица 1) [9].

Обработкой данных таблиц были получены зависимости содержания урана к водородному показателю за отработанные этапы (рисунок 2).

Как показано на рисунке 2 изменения pH-1 и pH-2 от 4,5 до 3 содержание урана Me-1 и Me-2 в продуктивном растворе соответственно повышается с 20 мг/л до 50 мг/л, а при снижении показатели pH-1 и pH-2 от 3 до 2 содержание урана в обоих случаях резко повышается до максимального значения 200 мг/л и 350 мг/л соответственно. В экспериментальном блоке содержание урана в продуктивном растворе постепенно снижается от 200 мг/л до 120 мг/л при pH=1,7-1,8, а в практикуемом блоке также содержание урана в продуктивном растворе постепенно снижается от 350 мг/л до 200-230 мг/л при pH=1,8-2. Необходимо отметить, что содержание урана прямо пропорционально к запасу урана, и поэтому содержание урана экспериментального блока меньше, чем в практикуемом блоке. Известно, что активное выщелачивание при ПСВ начинается при pH≤2 и содержание урана будет постепенно падать до минимального значения, потому что извлечение урана будет расти до 70% и дальше начнется стадия довыщелачивания [10, 11].

Таблица 1 - Основные показатели практикуемого и экспериментального блока

Показатели практикуемого блока			Показатели экспериментального блока		
Время выщелачивание, сутки	pH-2 – водородный показатель	Me-2 – содержание урана	Время выщелачивание, сутки	pH-1 – водородный показатель	Me-1 – содержание урана
1	3,31	26	1	4,64	4
2	3,00	23	2	4,38	4
3	3,15	22	3	3,73	4
4	3,16	25	4	3,34	5
5	2,05	21	5	3,18	6
...
40	2,02	346	40	2,05	109
41	2,04	349	41	2,03	111
42	2,07	345	42	1,87	129
43	1,93	350	43	1,90	139
44	2,14	351	44	1,82	145
45	2,02	352	45	1,89	148
46	2,02	355	46	1,84	153
47	2,04	354	47	1,87	158
48	2,00	356	48	2,01	162
49	1,96	352	49	1,81	165
50	1,98	361	50	1,87	175
...
187	1,93	235	187	1,62	120
188	1,94	241	188	1,61	121
189	2,04	233	189	1,70	124
190	2,01	231	190	1,73	118
191	1,96	235	191	1,70	118
192	2,01	236	192	172	119

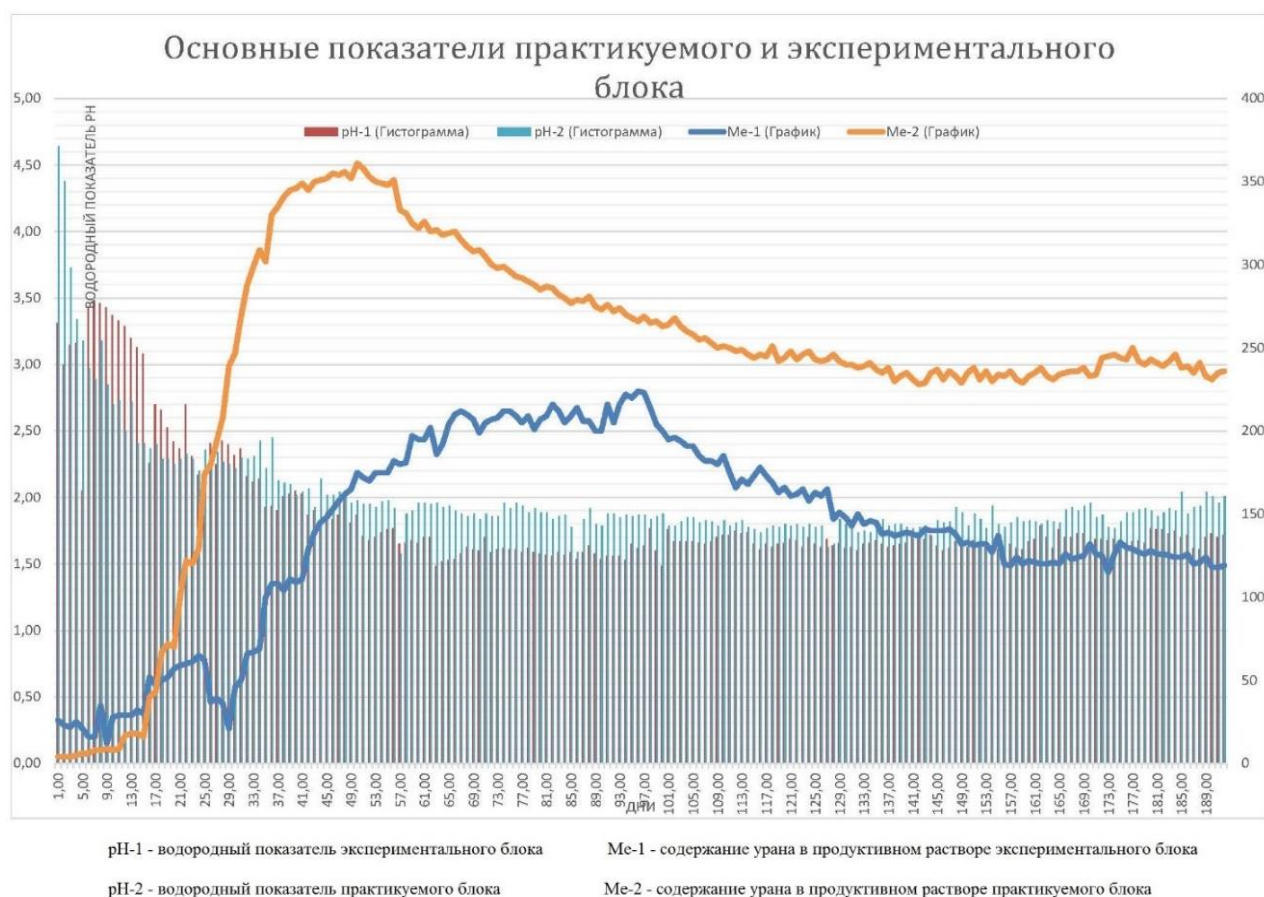


Рисунок 2 - Основные показатели практикуемого и экспериментального блока

Выводы

Предложенная усовершенствованная схема обвязки технологических скважин, суть которой заключается в сооружении откачных скважин в формате закачных позволяет снизить затраты на горно-подготовительные работы и соблюсти рациональный режим работы скважин. Проведенными опытными работами

установлено, что при применении технологии «насосных скважин» основные показатели подземного скважинного выщелачивания урана, такие как содержание урана в продуктивном растворе и водородный показатель остаются такими же, как и при базовой технологии.

Конфликт интересов. От имени всех авторов корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Ссылка на данную статью: Алиев С.Б., Омарбеков Е.У. Влияние «насосных скважин» на показатели выщелачивания урана // *Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* -2021. №2(317), pp.30-36. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.15>

Cite this article as: Aliev S. B., Omarbekov Ye.U. Vliyanie «nasosnih skvajin» na pokazateli vischelachvaniya urana [Influence of the "pumping wells" technology on the indicators of in situ leaching of uranium] // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* - 2021. № 2 (317), pp. 30-36. (In Rus.). <https://doi.org/10.31643/2021/6445.15>

«Сорғыш ұңғымалары» технологиясының уранды ерітінділеу жылдамдығына әсері

¹ Алиев С.Б., ^{2*} Омарбеков Е.У.

¹ Академик Н.В.Мельников атындағы Жер қойнауын кешенді игеру мәселелері институты, Ресей ғылым академиясы РФА, Мәскеу, Ресей

² Satbayev University, Алматы, Қазақстан

* Автордың электрондық поштасы: 13s_yernur88@mail.ru; y.omarbekov@stud.satbayev.university

Мақала келді: 07 наурыз 2021
Рецензенттен өтті: 17 сәуір 2021
Қабылданды: 06 мамыр 2021

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл жұмыста Қаратау кенішінде жерасты ерітінділеу әдісімен уран кенорындарын игеру кезінде «сорғыш ұңғымалары» технологиясын қолданудың тәжірибелік зерттеу нәтижелері келтірілген. Жер асты суларының жоғары қысымды сипаттағы жағдайында уран кен орнын игеру тәжірибесі талданып, «сорғыш ұңғымалар» технологиясы ұсынылған. «Сорғыш ұңғымалар» технологиясын енгізу өндіріс құнын төмендетуге мүмкіндік береді, ал уранның өнімдік ерітіндісіндегі (ӨЕ) уран мөлшері және рН мәні өзгермейді. Ұсынылған технологияны және технологиялық қондырғының құбырлар схемасын жер асты суларының жоғары қысымды сипаттағы жағдайында қолданған кезде кабель өнімдерін, суасты сорғыларын сатып алуға шығындар азаятындығы, ұңғымалардың бастарын монтаждауға жұмсалатын қаражат үнемделетіндігі дәлелденді.

Түйін сөздер: жерасты ұңғымамен ерітінділеу (ҰЖЕ), жоғары қысымды сипат, «сорғыш ұңғымалары», рН-сутегі иондарының көрсеткіші, Ме – уранның мөлшері, ұңғымаларды жалғау.

Авторлар туралы ақпарат:

Алиев Самат Бикитаевич

- Техника ғылымдарының докторы, Н.В.Мельникова атындағы жер қойнауын кешенді игеру проблемалар институты Ресей ғылым академиясы, Мәскеу, Ресей.; <https://orcid.org/0000-0002-3699-8322>, Email: alsamat@gmail.com

Омарбеков Ернур Уразғалиевич

- Satbayev University PhD докторанты, Алматы, Қазақстан; <https://orcid.org/0000-0003-1317-1303>, Email: 13s_yernur88@mail.ru; y.omarbekov@stud.satbayev.university

Литература

- [1] Суходолов А.П. Мировые запасы урана: перспективы сырьевого обеспечения атомной энергетики // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2010. № 4(72) С.166-169
- [2] Boytsov A. Worldwide ISL Uranium Mining Outlook: presentation//Proceedings of the International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014),23-27 June 2014.-Vienna: IAEA, 2014. P.1-23
- [3] Носков М.Д. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания, Учебное пособие Северск 2010
- [4] Kenzhaliyev, B. K., Surkova, T. Y., & Yessimova, D. M. (2019). Concentration of rare-earth elements by sorption from sulphate solutions. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo syr'â/Complex Use of Mineral Resources/Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*, 3(310), 5–9. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.22>
- [5] Юсупов Х. А., Алиев С.Б., Джакупов Д.А., Ельжанов Е.А. Исследование применения бифторида аммония для химической обработки скважин. Горный журнал, Москва (Россия), №4, 2017, с.57-60. DOI 10/17580/gzh.2017.04.11
- [6] Алиев С.Б., Захаров В.Н., Кенжин Б.М., Смирнов Ю.М. Адаптивный метод вибрационно-сейсмического воздействия на повышение эффективности подземного выщелачивания металлов// «Уголь», № 2, 2019 г. С. 76-80. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-2-76-80.
- [7] MANUAL OF ACID IN SITU LEACH URANIUM MINING TECHNOLOGY. - IAEA, VIENNA, 2001, IAEA-TECDOC-1239, ISSN 1011–4289, © IAEA, 2001 // Printed by the IAEA in Austria, August 2001
- [8] Omarbekov Ye., Yusupov Kh. Improving the technology of uranium mining under the conditions of high groundwater pressure. *Mining of Mineral Deposits*, 14(3), 112-118, 2020
- [9] Юсупов Х. А., Омарбеков Е. У. Влияние технологии «насосных скважин» на дебит откачных скважин // Комплексное использование минерального сырья. -2020. -№2 (313). -С.14-18. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.12>
- [10] Omarbekov Ye.U. Application of leach ing techn ology at the uranium deposits sites with sig nificant static leve ls of underground water. *Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference (April 1–3, 2020, Ivano-Frankivsk)*, Volume 2.
- [11] Abdikerim B.E., Kenzhaliyev B.K., Surkova T.Yu., Didik N., Berkinbayeva A.N., Dosymbayeva Z.D., Umirbekova N.S. Uranium

extraction with modified sorbents. Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu. 2020. № 3 (314), pp. 84-90. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.30>

Reference

- [1] Sukhodolov A.P. Mirovyeye zapasy urana: Perspektivy syr'yevogo obespecheniya atomnoy energetiki (World Uranium Reserves: Prospects for nuclear power raw materials). Izvestiya IGEA = Proceedings of the ISEA. **2010**. 4(72), 166-169 (in Russ.).
- [2] Boytsov A. Worldwide ISL Uranium Mining Outlook: presentation//Proceedings of the International Symposium on Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues (URAM-2014), 23-27 June 2014.-Vienna: IAEA, 2014. P.1-23
- [3] Noskov M.D. Dobicha urana metodom skvazhinnogo podjemnogo vshelacivnya, Uchebnoe posobie Sebersk 2010
- [4] Kenzhaliyev, B. K., Surkova, T. Y., & Yessimova, D. M. (2019). Concentration of rare-earth elements by sorption from sulphate solutions. Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo syr'â/Complex Use of Mineral Resources/Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu, 3(310), 5–9. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.22>
- [5] Yusupov Kh.A., Aliyev S.B., Djakupov D.A., Yelzhanov Ye. A. Issledovanie primeneniya biftorida ammoniya dlya khimisheskoi obrabotki skvajin. Gorniy journal, Moskva (Rossiya), №4, 2017, p. 57-60. DOI 10/17580/gzh.2017.04.11
- [6] Aliyev S.B., Zakharov B.N., Kenjin B.M., Smirnov Yu.M. Adaptivniy metod vibracionno-seismicheskogo vozdeistviya na povisheniye effektivnosti podzemnogo vychelashivaniya metallov// «Ugol», №2, 2019 g. p. 76-80. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-2-76-80.
- [7] MANUAL OF ACID IN SITU LEACH URANIUM MINING TECHNOLOGY. - IAEA, VIENNA, 2001, IAEA-TECDOC-1239, ISSN 1011–4289, © IAEA, 2001 // Printed by the IAEA in Austria, August 2001
- [8] Omarbekov Ye., Yusupov Kh. Improving the technology of uranium mining under the conditions of high groundwater pressure. Mining of Mineral Deposits, 14(3), 112-118, 2020
- [9] Yusupov Kh. A., Omarbekov E. U. Vliyaniye tekhnologii «nasosnykh skvazhin» na debit otkachnykh skvazhin [The effect of «pumping wells» procedure on the flow rate of extraction wells] // Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources. - 2020. - No. 2 (313). - S. 14-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.12>
- [10] Omarbekov Ye.U. Application of leach ing techn ology at the uranium deposits sites with sig nificant static leve ls of underground water. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference (April 1–3, 2020, Ivano-Frankivsk), Volume 2.
- [11] Abdikerim B.E., Kenzhaliyev B.K., Surkova T.Yu., Didik N., Berkinbayeva A.N., Dosymbayeva Z.D., Umirbekova N.S. Uranium extraction with modified sorbents. Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu. 2020. № 3 (314), pp. 84-90. (In Eng.). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.30>



UDC 669-1

DOI: 10.31643/2021/6445.16



IRSTI 53.37.15

State and prospects of processing tin-containing raw materials in Kazakhstan

¹ Sapinov R.V., ¹ Kulenova N.A., ^{1*} Sadenova M.A., ² Varbanov P.S., ² Klemeš J.J.

¹ D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

² Sustainable Process Integration Laboratory - SPIL, NETME Centre, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology - VUT BRNO, Brno, Czech Republic

*Corresponding author email: MSadenova@ektu.kz

ABSTRACT

The article discusses the current state-of-the-art in the tin industry and the prospects of the Republic of Kazakhstan. The evaluation is performed in terms of the development of domestic tin production for the growing global demand and the development of the domestic high-tech industry. The study includes the main domestic sources of the raw material base of the tin, which includes mineral raw materials, anthropogenic and secondary waste. Since the most important for the contemporary tin industry are mineral raw materials, the possibility of complex processing of ore from the Syrymbet deposit was studied. Based on the results of the studies performed, it was found that the mineral tin-containing raw materials of the Syrymbet deposit, in addition to cassiterite, also contain acid-soluble tin-containing minerals (stannin, etc.). At the stage of gravity concentration, the most efficient extraction performance of tin into concentrate was found for the gravity separator – amounting to 34.2%. At the leaching stage, the most efficient extraction of tin (1,543 µg/L) showed an aqueous solution of sulfuric acid with a concentration of 100 g/L, at a temperature of 45 °C.

Keywords: tin, Syrymbet deposit, gravity concentration, leaching, sulfuric acid, cassiterite, stannin.

Received: 17 March 2021

Peer-reviewed: 26 March 2021

Accepted: 11 May 2021

Information about authors:

Sapinov Ruslan Viktorovich

– Doctoral student PhD 3 course, specialty "metallurgy" of the East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaeva, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9334-5806> Email: S000096504@ektu.kz

Kulenova Natalya Anatolyevna

– Candidate of Technical Sciences, Ass. Professor, Head of the Center for Advanced Development "VERITAS", East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaeva, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7063-4899> Email: NKulenova@ektu.kz

Sadenova Marzhan Anuarbekovna

– Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher of the Center for Advanced Development "VERITAS" of the East Kazakhstan Technical University. D. Serikbaeva, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2870-6668> Email: MSadenova@ektu.kz

Varbanov Petar Sabev

– Dr Habil, Sustainable Process Integration Laboratory—SPIL, NETME Centre, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology—VUT BRNO, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Czech Republic, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5261-1645>; Email: varbanov@fme.vutbr.cz

Klemeš Jiří Jaromír

– Prof, Dr, DSc, Sustainable Process Integration Laboratory—SPIL, NETME Centre, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology—VUT BRNO, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Czech Republic, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7450-7029>; Email: jiri.klemes@vutbr.cz

Introduction

Tin has been one of the metals determining the development of mankind for a long time. So in an alloy of tin with copper, bronze was obtained, which made it possible to make a breakthrough in the development of civilization [1]. In the current time, tin has not lost its importance in the least. The electronic

industry, which is an indicator of the level of technological development, consumes up to 47% of all tin produced, which is used for the manufacture of various solders. In addition, tin is used for the production of tinplate, storage batteries and is used in the chemical industry [2]. Recently, in connection with the COVID-19 pandemic, electronic communication devices have become increasingly important, which are integral parts of the distance learning and work system.

Their production and, accordingly, the consumption of tin will only increase [3]. The price of tin in February 2021 was 23,435 \$/t [4]. Up to 300 kt/y of tin are produced currently [5]. Since the world mineral reserves of tin, which are economically profitable for mining, amount to 4.7 Mt [5], to eliminate economic risks, it is necessary to expand the material base of the tin industry. To do this, it is necessary to involve technogenic and secondary tin-containing waste in recycling. The development of environmentally and economically attractive comprehensive methods for processing tin-containing raw materials is a priority.

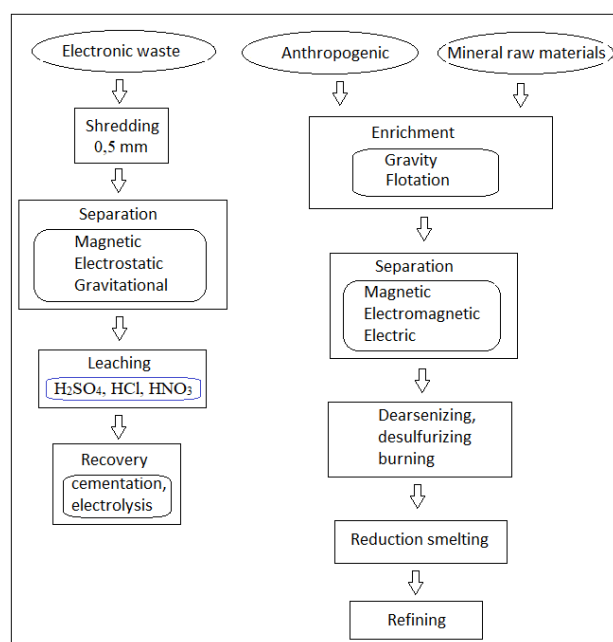


Figure 1 - Typical schemes for the processing of tin-containing raw materials

Typical schemes for processing tin-containing raw materials are shown in Figure 1. The method of processing any given tin-containing raw material depends on the form in which it is contained in the material. So in electronic waste, tin is in a metallic form, within the composition of an alloy (solder) with lead and other elements [6]. The melting point of the solder is from 180 °C. Therefore, often to remove the solder, electronic boards are heated to the melting temperature of the solder, or they are burned in furnaces with electric or fuel heating [6]. In this case, harmful substances are released as a result of the decomposition of the plastic. Also, the increased consumption of electricity is associated with additional CO₂ emissions into the atmosphere [7]. Therefore, the most efficient from the point of view of energy consumption and environmental protection are the hydrometallurgical methods of

processing electronic secondary raw materials using various reagents [8]. Anthropogenic waste materials, such as tailings of polymetallic ore concentration, contain tin in the form of minerals - cassiterite, stannine, etc. The schemes for their processing are close to the scheme for processing mineral raw materials.

In the direction of developing various approaches to the processing of technogenic and secondary tin-containing raw materials, constant work is underway, hydrometallurgical [9], pyrometallurgical and combined processing methods are being developed [10].

In addition to involving tin-containing waste in recycling, it is also necessary to increase the efficiency of processing mineral raw materials.

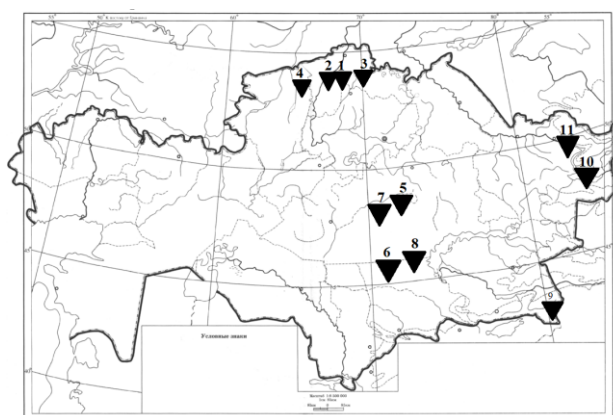


Figure 2 - The largest tin deposits in Kazakhstan Syrymbet -1, Sarybulak -2, Donetskoe - 3, Usken - 4, South Atasu - 5, Maykol - 6, Karaoba - 7, Bis - 8, Karagaily-Aktas-9, Karasu -10, Kalay tapkan – 11

The state balance sheet in Kazakhstan includes tin reserves at the following deposits: Akhmetkino, Bakennoye, Belogorskoye, Verkhnebaimurzinskoye, Yubileinoye, Medvedka, Kalai-Tapkan, Zhalanash, Karaoba, Syrymbet and others. The largest of them are shown in Figure 2. The ores are characterized by a relatively high content of tin, but as shown by technical and economic calculations, they require pre-enrichment in the process of mining [11]. Northern Kazakhstan is represented by the Syrymbet and Sarybulak (Syrymbet ore field), Donetskoye and Usken deposits. Central Kazakhstan is represented by the Karaoba and Maikol deposits. South Kazakhstan is represented by the Karagayly - Aktas and Biye fields. East Kazakhstan is represented by the Karasu and Belogorskoye fields. The most promising project is the development of the Syrymbet deposit, which ranks first in importance among 15 undeveloped tin deposits in the world. According to the

International Tin Association (ITA), Kazakhstan has tin reserves in the amount of 351 kt [12]. The Syrymbet field development project provides for the extraction of 90.4 kt of tin in concentrate [13].

Placer and bedrock ores are the most important mineral sources for tin production. The main mineral of tin mining is cassiterite (SnO_2) [14]. Due to its high specific gravity, it is usually enriched by gravity methods [15]. However, only relatively large cassiterite particles can be separated by gravity methods. This is usually in the order of 50-60% of the tin content in the ore. Therefore, to increase the efficiency of extracting tin from mineral raw materials, gravity methods are combined with flotation methods [16]. The most profitable are the ores of alluvial deposits. Placer tin ores are enriched by gravity, bedrock - by magnetic separation and combined gravity-flotation methods. In addition to cassiterite, tin in ores can also be found in the form of stannine (Cu_2FeSn_4). In this case, the content of tin in the frame of the total amount can reach up to 70% [17]. At present, the ores of tin deposits have a low content of tin, a lot of impurities, which makes such ores difficult to concentrate by traditional methods. In the case of gravitational enrichment, part of the tin can go into the tailings [18]. Cassiterite goes into tailings because of its small size and stannine because of its lower density compared to cassiterite. To extract tin from tailings and poor ores, various methods are used, the essence of which is the distillation of tin in the form of chlorides, sulfides and oxides. The processes of stripping tin in the form of oxides and sulfides are used at many enterprises [19], but these processes take place at high temperatures, which requires significant fuel costs and complex hardware design. In the presence of acid-soluble forms of tin-containing raw materials, hydrometallurgical methods of tin extraction are the most effective from the point of view of reducing energy and material costs. Sulphuric acid is a typical reagent for hydrometallurgical methods [20]. It would be logical to assume that tin can be extracted from stannine by leaching since, unlike cassiterite, it is soluble in acids.

As can be seen from the state-of-the-art review, hydrometallurgical methods have not been well developed or applied for tin extraction. This outlines a gap in the current knowledge and practice. The purpose of this work is to study the chemical and phase composition of mineral raw materials - ore from the Syrymbet deposit, to study

the possibility of enriching raw materials and complex extraction of valuable components from it using hydrometallurgical methods.

Experimental part

Ore samples were selected for completing necessary analyses. One of the goals was to study the chemical and phase composition of the ore of the Syrymbet deposit, and the other was to study the possibility of enriching raw materials and extracting valuable components from them. To average the composition, the mineral raw materials were mixed, and the raw material was taken by the quartering method. All experiments were carried out in the laboratory at the premises of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. Samples with a total weight of 1 kg were dried in a drying oven for 48 h, at a temperature of 80 °C. An ICP-MS 7500cx inductively coupled plasma mass spectrometer from Agilent Technologies (USA) was used to study the chemical composition of raw materials by the spectral method. An X'Pert PRO X-ray diffractometer manufactured by PANalytical (Netherlands) was used for the identification of the phase composition. The raw materials were divided into size classes to study the distribution of tin by size classes. Each fraction was weighed on a balance and prepared for further analysis. Also, samples of raw materials were prepared for analysis on a JSM-6390LV scanning microscope manufactured by JEOL Ltd. (Japan). To study the morphology of raw materials (Fig. 3), a BX-51 microscope (Olympus, Japan) was used.

A concentration table (SKO-2) and a gravity separator (ITOMAK 2K) were used to evaluate the possibility of enriching raw materials and extracting valuable components from them. When enriching raw materials through a concentration table - (CKO-2), the following parameters were used: vibration frequency - 310 /min, stroke length - 12 mm, S/L = 2/8. When enrichment through a centrifugal separator (Itomak – 2K), the following parameters were used: water pressure - 0.1 atm., rotation speed - 240 rpm. To determine the chemical composition of raw materials by the spectral method after gravitational enrichment, we used an ICP-MS 7500cx inductively coupled plasma mass spectrometer (Agilent Technologies, USA). To study the phase composition, an X'Pert PRO X-ray diffractometer was used.

To carry out the leaching, the tailings of the gravity concentration of the ITOMAK centrifugal

separator were used. An aqueous solution of sulfuric acid (H_2SO_4) was used as a reagent. The density of H_2SO_4 is 1.84 g/mL. To study the effect of concentration on the extraction of tin from the test material, aqueous solutions of sulfuric acid with a concentration of 20 g/L, 40 g/L, 60 g/L, 80 g/L, 100 g/L, 120 g/L, 140 g/L were used. S/L ratio = 1/3 (50 g / 150 g). Process temperature - 45 °C. Leaching was carried out in a heat-resistant laboratory glassware with stirring on a magnetic stirrer. To determine the chemical composition of raw materials by the spectral method after leaching, an ICP-MS 7500 cx inductively coupled plasma mass spectrometer (Agilent Technologies, USA) was used.

The discussion of the results

Figure 3 shows the topography and microstructure of the ore surface from the Syrymbet deposit.

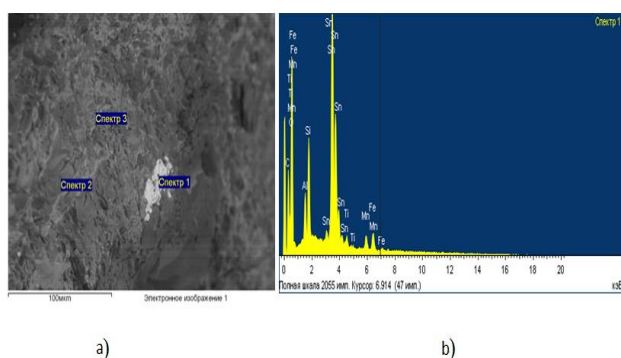


Figure 3 - Topography, the microstructure of the surface of an ore sample from the Syrymbet deposit - a, and profiles of the distribution of elements – b

The profiles of the distribution of elements in the selected area, made using a scanning microscope JSM-6390LV manufactured by JEOL Ltd. (Japan), can be seen there. Figure 4 shows an image of the surface morphology of the sample taken using a BX-51 microscope (Olympus, Japan).

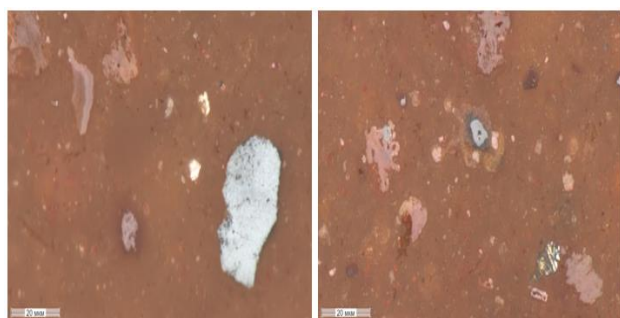


Figure 4 - Surface morphology of an ore sample from the Syrymbet deposit

After the classification of raw materials, the distribution of tin was determined according to eight standard-size classes. The results are presented in Table 1. According to the results of the analysis of the distribution of tin in eight standard size classes, it can be concluded that tin is mainly found in the fraction $(-3 + 2) = 36\%$, and in the classes $(-1.5 + 1)$, $(-1 + 0.63)$, $(-0.63 + 0.5)$, $(0.5 + 0.31)$, $(-0.31 + 0.05)$, tin is distributed almost evenly.

Table 1 - Distribution of tin by eight standard size grades and in the initial mineral raw materials

Size, mm	Output (g)	Content Sn (ppm.)	Distribution, Sn %
-3+2	317	2,757	36
-2+1.5	85.3	1,040	3
-1.5+1	99.7	3,392	11.3
-1+0.63	114.4	2,857	11.2
-0.63+0.5	69.6	3,962	9.7
-0.5+0.31	207.6	4,912	12
-0.31+0.05	93	3,940	13
-0.05	3.2	3,535	3.9
Raw material		2,861	

The results of gravity concentration are shown in Table 2. The lowest tin content was found in the classes $(-2 + 1.5)$ and (-0.05) . The Itomak 2K gravity separator proved to be the most efficient in terms of the extraction of tin by the gravity method. The result of studying the phase composition of the concentrate showed that all the tin in the concentrate is in the form of cassiterite. It is likely that acid-soluble tin minerals (stannine) are found in the tailings. However, due to the fact that the sensitivity of the X-ray diffractometer makes it possible to analyze the substance at a content of $>1\%$, it was not possible to establish the presence of acid-soluble tin-containing minerals in the tails. As a result of the leaching of the tailings of mineral processing at the ITOMAK unit, it was found that tin is extracted into the productive solution. Therefore, acid-soluble forms of tin are present in the tailings. In this case, the concentration of sulfuric acid has a significant effect on the extraction of tin (Fig. 5). The most effective extraction of tin ($1,543 \mu\text{g/L}$) was shown by an aqueous solution of sulfuric acid

Table 2 - Results of the performed gravity separation

Equipment	Output, (%)			Content Sn, %			Extraction Sn, %
	Concentrate	Tailings	Intermediate	Concentrate	Tailings	Intermediate	
SKO-2	0.012	93.7	6.288	4.75	0.135	0.16	19.9
ITOMAK 2K	0.008	99.92	-	12	0.016		34.2

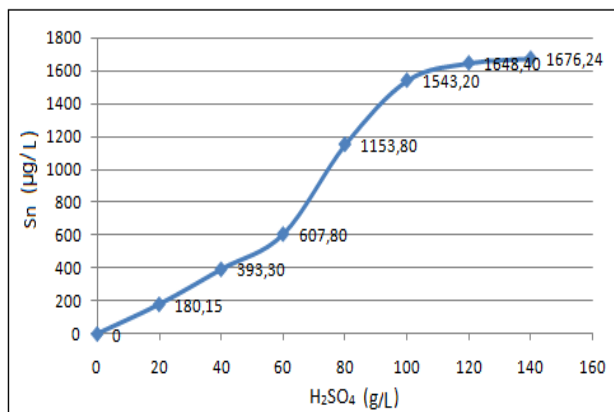


Figure 5 - Dependence of tin extraction depending on concentration

with a concentration of 100 g/L at a temperature of 45 °C. A further increase in the acid concentration showed only a slight increase. At an acid concentration of 120 g / L, the extraction of tin into the productive solution was 1648.4 µg / L, and at 140 g / L - 1676.24 µg / L. Thus, this method can be used for the comprehensive extraction of tin.

Conclusion

As a result of the work carried out, it was found that the extraction of the tin using a concentration table (SKO-2) was 19.9%. The most effective extraction by gravity methods is possible with the use of the gravity separator ITOMAK – 2K. The extraction of tin was 34.2%. In both cases, a significant portion of the tin remained in the tailings. Obviously, it is necessary to continue the work with the aim of greater extraction of tin into

concentrate, as well as extraction of tin from the tailings. The leaching carried out with an aqueous solution of sulfuric acid showed that, in addition to cassiterite, the ore contains acid-soluble forms of tin-containing mineral raw materials, which are effectively leached. At the same time, an increase in the concentration of sulfuric acid significantly increased the extraction of tin into the productive solution. This direction of work is promising, and further study of the effect of temperature and concentration of sulfuric acid will allow choosing the most economical regimes for leaching acid-soluble forms of tin-containing mineral raw materials. Summarizing the possibilities of expanding the base of tin-containing raw materials, it can be stated that Kazakhstan has all the prerequisites for development in this direction. The most promising in this regard are e-waste and anthropogenic raw materials. However, mineral raw materials are by far the main resource for the tin industry.

Conflict of interest. On behalf of all authors, the corresponding author declares that there is no conflict of interest.

Acknowledgments. We would like to express our gratitude to **Nurlan Bektasovich Ryspanov** - Doctor of Technical Sciences, President of the National Academy of Mining Sciences, Honorary Member of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan for the assistance provided.

Cite this article as: Sapinov R.V., Kulenova N.A., Sadenova M.A., Varbanov P.S., Klemeš J.J. State and prospects of processing tin-containing raw materials in Kazakhstan. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paldalanu.* 2021. №2 (317), pp. 37-45. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.16>

Қазақстанда құрамында қалайы бар шикізатты өңдеудің жай-күйі мен болашағы

¹ Сапинов Р. В., ¹ Куленова Н. А., ^{1*} Саденова М. А., ² Върбанов П. С., ² Клемеш Й. Я.

¹ Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті қ, Қазақстан

² Процестерді тұрақты интеграциялау зертханасы - SPIL, NETME орталығы, машина жасау факультеті, Брно технологиялық университеті - VUT BRNO, Брно, Чех Республикасы

* Автордың тиісті электрондық поштасы: MSadenova@ektu.kz

	ТҮЙІНДЕМЕ
<p>Мақала келді: 17 наурыз 2021 Рецензенттен өтті: 26 наурыз 2021 Қабылданды: 11 мамыр 2021</p>	<p>Мақалада Қазақстан Республикасындағы қалайы өнеркәсібінің қазіргі жағдайы мен болашағы қарастырылған. Бағалау өсіп келе жатқан әлемдік сұранысты және отандық жоғары технологиялық саланың дамуын ескере отырып, қалайының отандық өндірісін дамыту тұрғысынан жүргізілген. Зерттеуде минералдық шикізат, техногендік және қайталама қалдықтар кіретін қалайы шикізат базасының негізгі отандық көздері қарастырылады. Қазіргі қалайы өнеркәсібі үшін минералдық шикізат маңызды болып табылатындықтан, Сырымбет кен орнының кенін кешенді өңдеу мүмкіндігі зерттелді. Жүргізілген зерттеулердің нәтижелері бойынша Сырымбет кен орнының қалайы бар минералды шикізатының құрамында касситериттен басқа, қышқылда еритін қалайы бар минералдар (станнин және т.б.) бар екені анықталды. Гравитациялық байыту кезеңінде концентратқа қалайының ең тиімді бөлінуі гравитациялық сепараторда болатынын көрсетті - 34,2%. Ерітінділеу кезеңінде қалайының ең тиімді бөлінуі 45 ° C температурада 100 грамм / литр концентрациясы бар күкірт қышқылының сулы ерітіндісінде болады (1543 мкг / л).</p> <p>Түйін сөздер: қалайы, Сырымбет кен орны, гравитациялық байыту, ерітінділеу, күкірт қышқылы, касситерит, станнин.</p>
Сапинов Руслан Викторович	<p>Авторлар туралы ақпарат: – Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «металлургия» мамандығының 3 курс докторанты, Өскемен, Қазақстан Республикасы. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9334-5806 Email: S000096504@ektu.kz</p>
Куленова Наталья Анатольевна	<p>– т.ғ.к., доцент, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «VERITAS» озық даму орталығының жетекшісі, Өскемен, Қазақстан Республикасы. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7063-4899 Email: NKulenova@ektu.kz</p>
Саденова Маржан Ануарбековна	<p>– х.ғ.к., Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «VERITAS» жетілдіру орталығының жетекші ғылыми қызметкері, Өскемен, Қазақстан Республикасы. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2870-6668 E-mail: MSadenova@ektu.kz</p>
Върбанов Петър Събев	<p>– т.ғ.д., процестерді тұрақты интеграциялау зертханасы - SPIL, NETME орталығы, машина жасау факультеті, Брно технологиялық университеті - VUT BRNO, Брно, Чех Республикасы. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5261-1645; Email: varbanov@fme.vutbr.cz</p>
Клемеш Иржи Яромір	<p>– Профессор, т.ғ.д., процестерді тұрақты интеграциялау зертханасы - SPIL, NETME орталығы, машина жасау факультеті, Брно технологиялық университеті - VUT BRNO, Брно, Чех Республикасы. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7450-7029; Email: jiri.klemes@vutbr.cz</p>

Состояние и перспективы переработки оловосодержащего сырья в Казахстане

¹ Сапинов Р. В., ¹ Куленова Н. А., ^{1*} Саденова М. А., ² Върбанов П. С., ² Клемеш Й. Я.

¹ Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

² Лаборатория устойчивой интеграции процессов - SPIL, Центр NETME, факультет машиностроения, Технологический университет Брно - VUT BRNO, Брно, Чешская Республика

*Электронная почта автора: MSadenova@ektu.kz

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается современное состояние и перспективы оловянной отрасли Республики Казахстан. Оценка проводится с точки зрения развития отечественного производства олова с учетом растущего мирового спроса и развития отечественной высокотехнологичной отрасли. В исследование включены основные отечественные источники сырьевой базы олова, в которую

Статья поступила: 17 марта 2021
 Рецензирование: 26 марта 2021
 Принята в печать: 11 мая 2021

входят минеральное сырье, техногенные и вторичные отходы. Поскольку важнейшим для современной оловянной промышленности является минеральное сырье, изучалась возможность комплексной переработки руды месторождения Сырымбет. По результатам проведенных исследований установлено, что минеральное оловосодержащее сырье месторождения Сырымбет помимо касситерита содержит также кислоторастворимые оловосодержащие минералы (станнин и др.). На стадии гравитационного обогащения наиболее эффективное извлечение олова в концентрат показал гравитационный сепаратор - 34,2%. На стадии выщелачивания наиболее эффективное извлечение олова (1543 мкг / л) показал водный раствор серной кислоты с концентрацией 100 г / л при температуре 45 ° С.

Ключевые слова: олово, месторождение Сырымбет, гравитационное обогащение, выщелачивание, серная кислота, касситерит, станнин.

	Информация об авторах:
Сапинов Руслан Викторович	- докторант PhD 3 курса специальности «металлургия» Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9334-5806 Email: S000096504@ektu.kz
Куленова Наталья Анатольевна	- к.т.н., ас. профессор, руководитель центра опережающего развития «VERITAS» Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7063-4899 Email: NKulnova@ektu.kz
Саденова Маржан Ануарбековна	- к.х.н., ведущий научный сотрудник центра опережающего развития «VERITAS» Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2870-6668 Email: MSadenova@ektu.kz
Върбанов Петър Събев	- д.т.н., лаборатория устойчивой интеграции процессов - SPII, Центр NETME, факультет машиностроения, Технологический университет Брно - VUT BRNO, Брно, Чешская Республика. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5261-1645 ; Email: varbanov@fme.vutbr.cz
Клемеш Иржи Яромир	- Профессор, д.т.н., лаборатория устойчивой интеграции процессов - SPII, Центр NETME, факультет машиностроения, Технологический университет Брно - VUT BRNO, Брно, Чешская Республика. ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7450-7029 ; Email: jiri.klemes@vutbr.cz

Литература

- [1] Radivojević, M., Roberts, B.W., Pernicka, E. The Provenance, Use, and Circulation of Metals in the European Bronze Age: The State of Debate. // J Archaeol Res. — 2019. — V. 27. P. 131–185. <https://doi.org/10.1007/s10814-018-9123-9>
- [2] Официальный сайт международной ассоциации олова (ITA) Tin users see weaker markets - International Tin Association. [Электрон. ресурс] — 2019. — URL: <https://www.internationaltin.org/tin-users-see-weaker-markets/#:~:text=Solder%20accounts%20for%20by%20far,the%20US%2DChina%20trade%20war.> (дата обращения: 12.01.2021).
- [3] Официальный сайт исследовательской компании «Trend Force». [Электрон. ресурс] — 2020. — URL: <https://www.trendforce.com/presscenter/news/20201202-10576.html> (дата обращения: 12.01.2021).
- [4] Официальный сайт информационно аналитического журнала «Металл. бюллетень». [Электрон. ресурс] — 2021. — URL: <https://www.metalbulletin.ru/news/color/10156255/> (дата обращения: 15.02.2021).
- [5] Официальный сайт геологической службы США U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2020. [Электрон. ресурс] — 2020. — URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-tin.pdf> (дата обращения: 12.01.2021).
- [6] Yang C., Tan Q., Liu L., Dong Q., Li J. Recycling Tin from Electronic Waste: A Problem That Needs More Attention. // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. — 2017. — V.5. — P. 9586–9598. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02903>
- [7] Диханбаев Б. И., Диханбаев А. Б. К проблеме утилизации диоксида углерода отходящих газов котлов электростанций при сжигании высокозольных углей. // Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu. — 2020. — №4(315), стр. 33–41. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.34>
- [8] Moosakazemi F., Ghassa S., Mohammadi M.R.T. Environmentally friendly hydrometallurgical recovery of tin and lead from waste printed circuit boards: Thermodynamic and kinetics studies. // Journal of Cleaner Production — 2019. — V.228. — P. 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.024>
- [9] Sapinov R.V., Sadenova M.A., Kulenova N.A., Oleinikova N.V. Improving Hydrometallurgical Methods for Processing Tin containing Electronic Waste. // CET. — 2020 — V. 81. — 1021. <https://doi.org/10.3303/CET2081171>
- [10] López F.A., García-Díaz I., Rodríguez Largo O., Polonio F.G., Llorens T. Recovery and Purification of Tin from Tailings from the Penouta Sn–Ta–Nb Deposit. // Minerals. — 2018. — V.8(1). — 20. <https://doi.org/10.3390/min8010020>
- [11] Ужкенова Б.С., Бекжанова Г.Р., Иванова Л.Б. Редкие металлы и редкие земли Казахстана. — Алматы. 2011. — 277 с.
- [12] Официальный сайт международной ассоциации олова (ITA). Global Resources Reserves 2020. [Электрон. ресурс] —

2020. – URL: <https://www.internationaltin.org/wp-content/uploads/2020/02/Global-Resources-Reserves-2020-Update.pdf> (дата обращения: 12.01.2021).
- [13] Официальный сайт разработчика месторождения «Сырымбет» АО «Tin One Mining». [Электрон. ресурс] – 2020. – URL: <https://www.tinone.kz/> (дата обращения: 12.01.2021).
- [14] Cheng Y., Spandler C., Kemp A., Mao J., Rusk B., Hu Y., Blake K. Controls on cassiterite (SnO₂) crystallization: Evidence from cathodoluminescence, trace-element chemistry, and geochronology at the Gejiu Tin District. // *American Mineralogist*. — 2019. — V.104 (1). P. 118–129. <https://doi.org/10.2138/am-2019-6466>
- [15] Angadi S.I., Eswaraiyah C., Jeon H.S., Mishra B.K., Miller J.D. Selection of Gravity Separators for the Beneficiation of the Uljin Tin Ore. // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. — 2016. — V.38(1). — P. 54–61. <https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1262856>
- [16] Angadi S.I., Sreenivas T., Jeon H.S., Baek S.H., & Mishra B.K. A review of cassiterite beneficiation fundamentals and plant practices. // *Minerals Engineering*. — 2015. — V.70, P. 178–200. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.009>
- [17] Лебедев И.С. Комплексная металлургия олова / И.С. Лебедев, В.Е. Дьяков, А.Н. Теребинин // Новосибирск: ИД «Новосибирский писатель», 2004.– 548 с.
- [18] Su Z., Zhang Y., Chen J., Liu B., Li G., Jiang T. Selective separation and recovery of iron and tin from high calcium type tin-, iron-bearing tailings using magnetizing roasting followed by magnetic separation. // *Sep. Sci. Technol.* — 2016. — V.51. — P.1900–1912. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1178292>
- [19] Su Z., Tu Y., Chen X. A value-added multistage utilization process for the gradient-recovery tin, iron and preparing composite phase change materials (C-PCMs) from tailings. // *Sci Rep.* — 2019. — V9. — P.14097. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50536-y>
- [20] Khabiyev A. T., Baigenzhenov O. S., Yulussov S. B., Akbarov M. S., Sydykanov M. M. Study of leaching processes of sintered black shale ore. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* - 2020. № 4 (315), pp. 5-10. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.31>

References

- [1] Radivojević, M., Roberts, B.W., Pernicka, E. (2019). The Provenance, Use, and Circulation of Metals in the European Bronze Age: The State of Debate. *J Archaeol Res*. № 27, p. 131–185. <https://doi.org/10.1007/s10814-018-9123-9> (in Eng.)
- [2] Official website of the International Tin Association (ITA) Tin users see weaker markets - International Tin Association. [Electron. resource] 2019. URL: <https://www.internationaltin.org/tin-users-see-weaker> (date of appeal: 12.01.2021).
- [3] «Trend Force» research company official website. [Electron. resource] 2020. URL: <https://www.trendforce.com/presscenter/news/20201202-10576.html> (date of appeal: 12.01.2021).
- [4] The official site of the information and analytical magazine “Metal. bulletin”. [Electron. resource] 2021. URL: <https://www.metalbulletin.ru/news/color/10156255/> (date of appeal: 15.02.2021).
- [5] Official website of the United States Geological Survey U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2020. [Electron. resource] 2020. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-tin.pdf> (date of appeal: 12.01.2021).
- [6] Yang C., Tan Q., Liu L., Dong Q., Li J. (2017). Recycling Tin from Electronic Waste: A Problem That Needs More Attention. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. № 5, p. 9586–9598. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02903> (in Eng.).
- [7] Dikhanbaev B. I., Dikhanbaev A. B. K probleme utilizatsii dioksida ugleroda otkhodyashchikh gazov kotlov elektrostantsiy pri szhiganii vysokozol'nykh ugley [On the problem of utilization of carbon dioxide in waste gases of power plant boilers when burning high-ash coals]. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* - 2020. № 4 (315), pp. 33-41. (In Rus.). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.34M>
- [8] oosakazemi F., Ghassa S., Mohammadi M.R.T. (2019). Environmentally friendly hydrometallurgical recovery of tin and lead from waste printed circuit boards: Thermodynamic and kinetics studies. *Journal of Cleaner Production*. № 228, p. 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.024> (in Eng.).
- [9] Sapinov R.V., Sadenova M.A., Kulenova N.A., Oleinikova N.V. (2020). Improving Hydrometallurgical Methods for Processing Tin containing Electronic Waste. *CET*. № 81, p.1021. <https://doi.org/10.3303/CET2081171> (in Eng.).
- [10] López F.A., García-Díaz I., Rodríguez Largo O., Polonio F.G., Llorens T. (2018). Recovery and Purification of Tin from Tailings from the Penouta Sn–Ta–Nb Deposit. *Minerals*. № 8(1), p. 20. <https://doi.org/10.3390/min8010020> (in Eng.).
- [11] Uzhkenova B.S., Bekzhanova G.R., Ivanova L.B. Redkiye metally i redkiye zemli Kazakhstana [Rare metals and rare earths of Kazakhstan]. *Almaty*. 2011. 277. (In Rus.).
- [12] Official website of the International Tin Association (ITA). Global Resources Reserves 2020. [Electron. resource] 2020. URL: <https://www.internationaltin.org/wp-content/uploads/2020/02/Global-Resources-Reserves-2020-Update.pdf> (date of appeal: 12.01.2021).

- [13] Official site of the developer of the "Syrymbet" field «Tin One Mining» [Electron. resource] 2020. URL: <https://www.tinone.kz/> (date of appeal: 12.01.2021).
- [14] Cheng Y., Spandler C., Kemp A., Mao J., Rusk B., Hu Y., Blake K. (2019) Controls on cassiterite (SnO₂) crystallization: Evidence from cathodoluminescence, trace-element chemistry, and geochronology at the Gejiu Tin District. *American Mineralogist*. № 104 (1). p. 118–129. <https://doi.org/10.2138/am-2019-6466> (in Eng.).
- [15] Angadi S.I., Eswaraiah C., Jeon H.S., Mishra B.K., Miller J.D. (2016) Selection of Gravity Separators for the Beneficiation of the Uljin Tin Ore. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. №38(1). p. 54–61. <https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1262856> (in Eng.).
- [16] Angadi S.I., Sreenivas T., Jeon H.S., Baek S.H., & Mishra B.K. (2015). A review of cassiterite beneficiation fundamentals and plant practices. *Minerals Engineering*. № 70. p. 178–200. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.009> (in Eng.).
- [17] Lebedev I.S., Diakov V.E., Terebenin A.N. *Integrated tin metallurgy [Integrated tin metallurgy]*. Novosibirsk: PH «Novosibirskiy pisatel». 2004. 548. (In Rus.).
- [18] Su Z., Zhang Y., Chen J., Liu B., Li G., Jiang T. (2016). Selective separation and recovery of iron and tin from high calcium type tin-, iron-bearing tailings using magnetizing roasting followed by magnetic separation. *Sep. Sci. Technol.* № 51. p. 1900–1912. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1178292> (in Eng.).
- [19] Su Z., Tu Y., Chen X. (2019). A value-added multistage utilization process for the gradient-recovery tin, iron and preparing composite phase change materials (C-PCMs) from tailings. *Sci Rep.* № 9. p. 14097. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50536-y> (in Eng.).
- [20] Khabiyev A. T., Baigenzhenov O. S., Yulussov S. B., Akbarov M. S., Sydykanov M. M. (2020) Study of leaching processes of sintered black shale ore. *Complex Use of Mineral Resources*. № 4 (315), p. 5-10. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.31> (in Eng.).



UDC 622.691

DOI: 10.31643/2021/6445.17



IRSTI 52.47.27

Features of planning and implementation of energy-saving measures at compressor stations of main gas pipelines

^{1*} Moldabayeva G. Zh., ¹ Suleimenova R. T., ² Sadvakassov M.A., ³ Jalalov G.E.

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

² Beineu-Shymkent Gas Pipeline LLP, Almaty, Kazakhstan

³ Head of the Laboratory of "Hydro-gas Dynamics of Reservoir Systems" of the Oil and Gas Institute, National Academy of Sciences of Azerbaijan

* Corresponding author email: moldabayeva@gmail.com, 830809400443-D@stud.satbayev.university

<p>Received: 14 March 2021 Peer reviewed: 15 April 2021 Accepted: 13 May 2021</p>	<p>Abstract Currently, the National gas supply operator in Kazakhstan pays special attention to the rational use of natural gas for its own and technological needs, while maintaining the optimal management of the gas transportation system, taking into account the specific technical situation of the equipment. Energy efficient management of gas pipelines is one of the priority directions for optimizing gas costs. The use of innovative methods of energy-saving technologies during the operation of the gas transmission system, an increase in the efficiency of gas-pumping units, as well as the implementation of automated energy saving control systems, will significantly increase the efficiency of gas transportation.</p> <p>Keywords: Pipeline, natural gas, gas-pumping unit, operation, compressor stations.</p>
<p>Moldabayeva Gulnaz Zhaksylykovna</p>	<p>Information about authors: Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, 050013, Satpayev 22a, Almaty, Kazakhstan. E-mail: moldabayeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7331-1633.</p>
<p>Suleimenova Raikhan Taupikhovna</p>	<p>Doctoral student of the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, 050013, Satpayeva 22a, Almaty, Kazakhstan. E-mail: 830809400443-D@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-7995-5560.</p>
<p>Sadvakasov Mukan</p>	<p>Deputy General Director for Operation, Beineu-Shymkent Gas Pipeline LLP. Almaty, Kazakhstan. m.sadvakasov@bsgp.kz</p>
<p>Jalalov Garyb Esakovich</p>	<p>Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of ANAS, Head of the Laboratory of "Hydro-gas Dynamics of Reservoir Systems" of the Oil and Gas Institute, National Academy of Sciences of Azerbaijan</p>

Introduction

Comprimation of gas at compressor stations (COP) is the most energy-intensive thermal power process in the gas industry, therefore the problem of reducing energy costs will first of all be aimed at improving the efficiency of compressor stations as basic consumers of fuel and energy resources. This task is largely enhanced, if we take into account that the efficiency of gas turbine installations operated on gas pipelines (GTU), the total capacity of which is over 80% of the power of all other specified species

of the energy receipt, in some cases, is at the level of 20 -22%.

The energy efficient mode of operation of the compressor station is the mode in which the necessary technological indicators of the main gas pipeline is provided (performance, working pressure and temperature) at a minimum of electricity costs (for COP with electric parking lot gas-pumping units (GPU)) and minimum fuel gas costs (for COP with gas turbine Park GPU).

One of the priority activities of the Operator is to improve the efficiency of the use of fuel and

energy resources (FER) - natural gas, electricity and thermal energy.

Methods

In the conditions of using different types of equipment at compressor stations with individual characteristics, the task of developing methods for modeling the analytical dependencies of the equipment, taking into account the actual technical condition, is relevant. Optimization of the technological modes of natural gas transportation will increase the energy efficiency of the compressor stations of the main gas pipeline.

Research

To effectively manage, control, calculate and optimize the operation of gas pumping units (GPU) of a compressor station (COP), it is necessary to adapt mathematical models describing the

relationship between technological parameters, taking into account the technical condition [4, 7].

The GPU consists of a natural gas supercharger, a discharge drive, suction and exhaust devices (in the case of a gas turbine drive), automation systems, oil-systems, fuel-air and oil communications and auxiliary equipment.

GPU on the type of forcing distinguish between reciprocating gas compressors (gas engine compressors) and GPU with centrifugal superchargers; type of drive - GPU with a gas internal combustion engine (gas engines), with gas turbine drive and electric.

GPU with a gas turbine drive, in turn, are divided into units with a stationary gas turbine installation and a drive for aircraft and gas turbine engines [1, 2, 3].

A reciprocating gas engine compressor is a GPU consisting of a two - or four-stroke gas engine (or electric motor) and a horizontal reciprocating compressor connected directly to it. They are divided into low, medium and high pressure units.

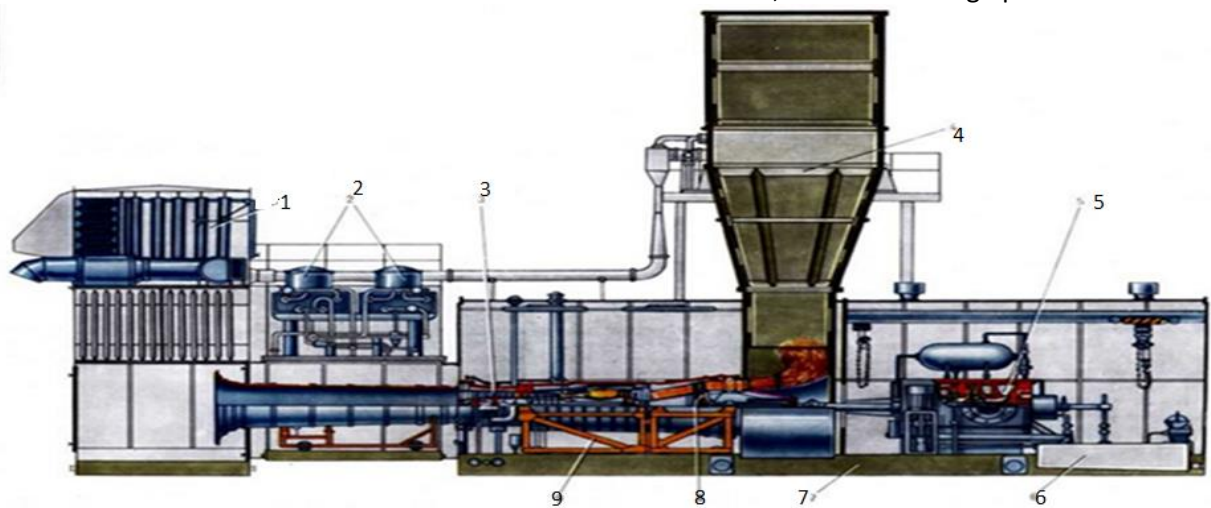


Figure 1 - Gas-pumping block-container unit GPU-C-16 with air drive: 1-inlet air purifier; 2-oil radiators; 3-aircraft drive NK-16 KT; 4-exhaust device with noise silencer; 5-natural gas supercharger; 6-oil tank of the unit; 7-base metal frame of the unit; 8-power turbine of the unit; 9-under-engine frame of the air drive

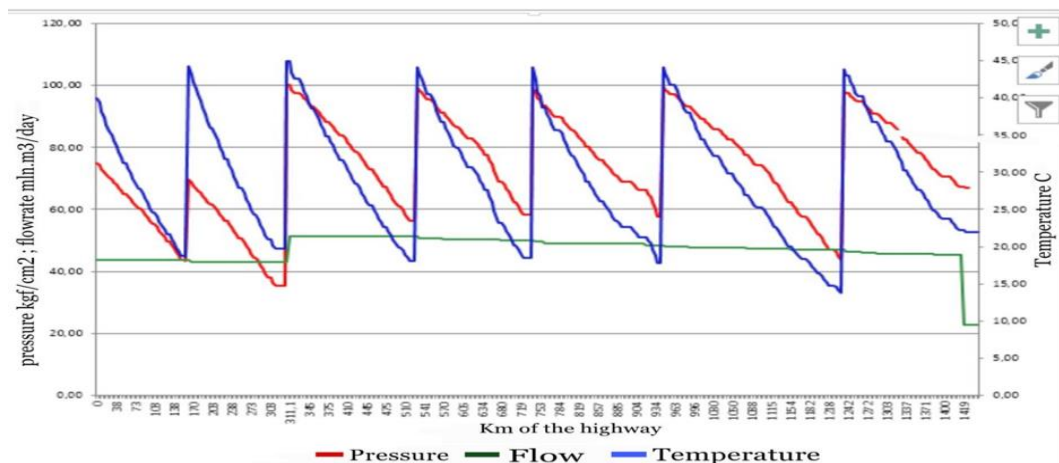


Figure 2 - Pressure and temperature changes along the MG Beineu-Akarys highway

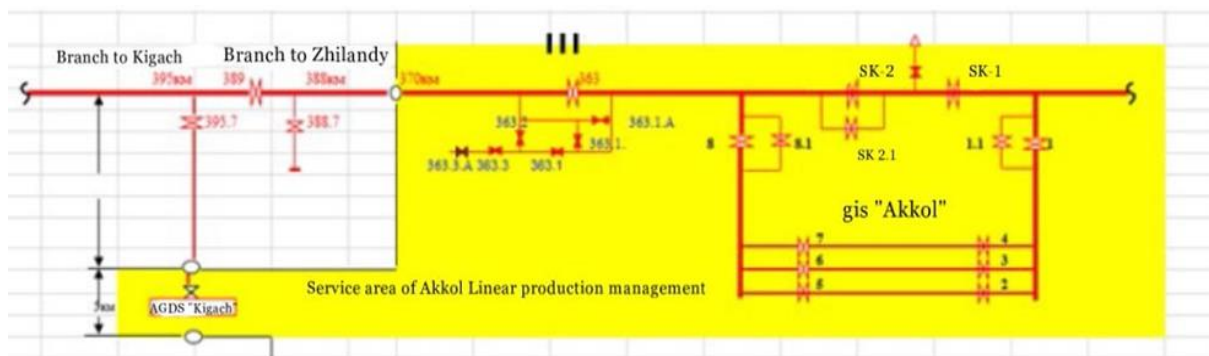


Figure 3- Technological scheme of the section of the MG "Makat-North Caucasus" with 362-370 km

Medium-pressure compressors (2-5 MPa) operate mainly at intermediate compressor stations to increase the throughput of gas pipelines. High-pressure units (9.8-12 MPa) are installed at compressor stations for pumping gas to underground storage facilities.

Gas motor compressors are highly efficient in conditions of variable capacities and compression ratios above 1.3. The main advantages of these GPU are: reliability in operation; long service life; the ability to operate in a wide range of pressures; the ability to regulate performance by changing the speed of the units, as well as the ability to create high pressures in them. The efficiency of modern gas engine compressors is up to 45%.1.

Table 1 - Pipe and gas parameters of Makat-North Caucasus gas Station

Pipe and gas parameters		
Outer diameter	mm	1067
Wall thickness	mm	12,1
The inner diameter of the pipe	mm	1042,8
Pipe roughness coefficient-t	mm	0,03
Gas density	kg/m ³	
Air density at 293 K and 0.1013 MPa	kg/m ³	1,205
Density by air		0,586
Coefficient of unevenness		0,941
Dynamic viscosity	kg power sec/m ²	0,0000012 706
Efficiency coefficient		0.95

There are single-stage (incomplete-pressure) centrifugal superchargers with a compression ratio of 1.23-1.25 and two-stage (full-pressure) - 1.45-1.7. Centrifugal superchargers are characterized by a

significantly higher capacity than that of reciprocating compressors (12-40 million m³ / day).

The disadvantage of partial pressure centrifugal blowers is that to achieve a gas compression ratio of 1.45-1.5, it is necessary to start 2 series-connected units. This leads to an increase in fuel consumption in the GPU. The efficiency of units with centrifugal fans is up to 29%, thermoregulators - up to 35%. The GPU is controlled by a gas turbine unit or an electric motor [4, 5, 6].

Gas turbine units of aircraft and ship types (stationary) are characterized by small dimensions and weight, which allows them to be modified on the production site and delivered to the compressor stations in a ready-made form. Gas-pumping units controlled by aircraft units are made in the form of block containers. It is delivered to compressor stations with fire and explosion protection systems. In the GPU, asynchronous motors with a capacity of 4500 kW and synchronous motors from 4000 to 12,500 kW are used as electric drives. The maximum efficiency of the gas pumping unit with an electric drive is achieved when the compressor stations are located at a distance of 300 km from the power line.

Automation systems have been created for all types of GPU, providing automatic start-up and operation of the unit, protection in emergency modes, fault signaling and protective actions, and monitoring of volume indicators. fan, automatic maintenance of the set temperature and oil pressure in case of emergency shutdown of the unit, etc.

Each type of compressor has its own design and functional characteristics. Therefore, when choosing a compressor or accelerator for your graphics processor, it is important to fully consider its operating conditions and performance requirements [5]. The following parameters are considered important:

- the volume of the pumped gas and the pressure and temperature of the gas inlet/outlet;

- chemical composition and humidity of the injected gas;

Characteristics of the GPU installation site (maximum and minimum air temperature, altitude above sea level); type of disk used;

- annual working time;
- performance class (explosion, earthquake, etc.);
- permissible amount of oil in the exhaust gas;
- type of automation (electric or pneumatic).

Certain types of compressors are best used in the following conditions:

Piston compressor - high degrees of pressure increase and high absolute pressures, variable modes, relatively small flows and capacities (up to 6 MW).

Screw compressor - high degrees of pressure increase at low absolute pressures and small pressure drops, variable modes, relatively small flows and capacities (up to 2000 kW) [1, 2, 7].

Centrifugal compressor - large flows and capacities, preferably small degrees of pressure increase and low absolute pressures, constant modes.

It can be noted that the issue of energy saving should be solved using an integrated approach and considered from the point of view of the operation of the entire gas transmission system as a whole. When calculating the operating modes of the Gas transmission system, the actual gas-dynamic characteristics of the COP equipment, obtained on the basis of the passport characteristics of the equipment, should be used.

In accordance with the Concept of Energy Saving, one of the directions of implementing the energy saving and energy efficiency policy is to improve the efficiency of energy saving management, including improving its organizational structure, monitoring the level of energy saving and energy efficiency, and developing the regulatory framework for energy saving. Currently, energy

saving in the industry is implemented in accordance with regulatory documents.

To plan and implement energy-saving measures in gas transmission Companies, energy-saving programs are drawn up for a certain period of time.

In the energy saving program, they form:

- energy saving targets;
- energy efficiency targets;
- integral results of the assessment of the economic efficiency of the implementation of energy-saving results and projects based on the implementation of the best achieved technologies;
- a set of organizational and technical measures to improve energy efficiency in the field of energy saving, including measures based on the results of energy surveys of technological facilities for all types of activities;
- the speed of rotation of the rotor of centrifugal superchargers.

The efficiency of gas transport depends on both operating modes and on the technical condition of the equipment of compressor stations. The efficiency of the COP is determined by the type and state of the GPU. Currently, a significant part of the GPU on the COP has operational efficiency, significantly lower than the passport value, which leads to a significant overcurrent of fuel gas to the pump. This is due to two factors - a decrease in the technical condition of the GPU (which, ultimately, leads to the need to replace them) and their underload, which requires solving the problem of optimizing the operation of the COP. Periodic update of the GPU on the COP is the necessary and legitimate way to improve gas transport indicators in general and reduce energy consumption for its implementation. The main transport of natural gas has the greatest potential for saving, there are known typical energy-saving measures used in the main transport of gas.

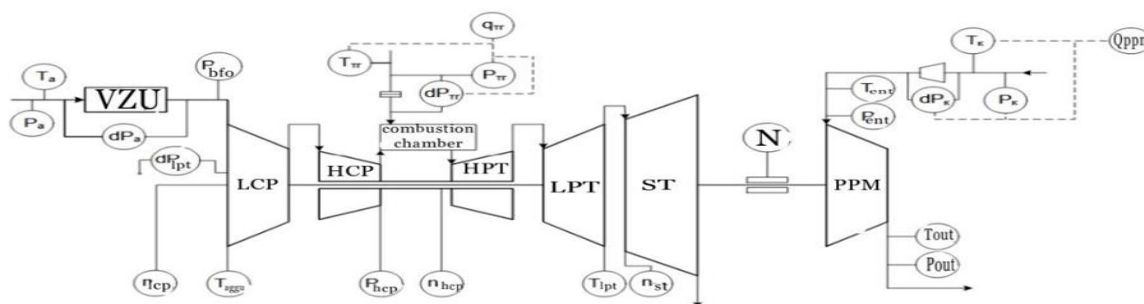


Figure 4 - Schematic diagram of the measurement of technological parameters by standard means using Sauer

Innovative energy-saving technologies for the reconstruction and modernization of the gas transmission system include:

- increasing the capacity of the GPU, taking into account the planned volumes of transported natural gas and the prospects for loading the pipeline;
- the use of axial compressors on gas turbine and electric GPU with an efficiency of up to 85%, providing a reduction in fuel gas consumption of up to 7%;
- improving the efficiency of low-pressure modes of gas transport on unloaded gas pipelines or on individual sections of gas transmission systems (the effect in saving fuel gas can be up to 8%);
- coordination of gas-dynamic characteristics of gas turbine units and gas pipelines due to the introduction of new high-efficiency flow parts in gas turbine and electric compressor shops (COP) and the transfer of shops to more economical full-pressure compression with re-linking of units (the effect of saving fuel gas and electricity can reach 9%);

Innovative energy-saving technologies in the operation of the gas transmission system:

- optimization of GTS operating modes based on software optimization systems (the effect of fuel economy can reach 3%);
- optimization of the operating modes of gas cooling devices based on the use of modern electric drives (the effect in saving electrical energy can reach 15%);
- introduction of turbo-expander units at GTS facilities for electric power generation;
- the use of gas-piston power plants of a new generation with high efficiency, which allows you to get the effect of saving gas consumption for your own needs up to 25%;
- increasing the hydraulic efficiency of the linear part and compressor considering streaming download pipelines based on sets of cameras launching and receiving treatment devices in the linear part, allowing for the cleaning of pipelines timely diagnosis and repairs to keep the hydraulic efficiency of the linear part at the normative level (the effect in saving of fuel gas consumption GPU in compression reaches 2%);
- improvement of methods and systems for waste heat recovery of the exhaust gas at compressor stations;
- equipment of technological equipment with modern means of measuring the production and consumption of energy resources.

During operation of gas delivery systems to ensure energy efficiency objectives to cs gas

pipelines it is necessary to assess the basic technological performance GPU: gas Turbine power plant, fuel consumption, effective efficiency, the coefficients of the technical condition and the flowing parts of gas turbines and centrifugal compressors.

On COP equipped with automatic control systems of the GPU, these indicators should be determined in real time. However, at the COP, even when equipped at the shop level with microprocessor-based control and control systems, the GPU is not determined with the necessary accuracy. In this regard, the operating personnel do not have the important information necessary to ensure the energy-efficient operation of the GPU at the compressor stations.

The reason is the lack of simple, but at the same time quite accurate methods and algorithms for determining the technical indicators of GTP. The methods should also be universal with the possibility of adaptation for any type of GTP.

Energy-saving issues should not be solved periodically, but constantly. Of particular importance in this case is the dispatching control of the main gas transport.

If multiple modes of operation of technological equipment, the CS decided a complex set of tasks: information software and dispatching services; organization of accounting of a consumption of gas on their own and technological needs of the COP; operational cooperation dispatch service with the production and dispatch service operator in providing technology compression at the transport of gas.

In the information software of dispatching tasks, diagrams of the given characteristics of the GPU are usually used for the calculation. These diagrams have a number of drawbacks: the given characteristics are not constant (they undergo deformation with the operating time of the aggregates), in addition, they are obtained according to a number of assumptions.

In this regard, an alternative analytical method is used to calculate the operational characteristics of the GPU of compressor stations, develop a system of initial and converted values of fuel and energy indicators of the GPU, solve the problem of the influence of the adiabatic efficiency of the axial compressor and turbine, the efficiency of the combustion chamber on the output indicators of the GTP-effective power and efficiency, fuel gas consumption and commercial performance of the GPU.

The deterioration of the efficiency of the main elements to varying degrees affects the deterioration of the main characteristics of the GPU. So, while reducing the adiabatic efficiency of the axial compressor 5-10% effective capacity and commercial performance decrease by 15-32%, respectively, and decreasing the adiabatic efficiency of the gas turbine at 5 and 10% capacity and performance reduced by 20% and 39%. Commercial performance depends more on the adiabatic efficiency of the axial compressor and turbine than on the polytropic efficiency of the centrifugal supercharger, for example, if the latter is reduced by 5%, commercial performance also decreases by 5%.

Increase the efficiency of gas turbines, a new generation can be achieved by increasing the gas temperature before the turbine and the pressure ratio of an axial compressor, but the implementation of such indicators is complicated by the degradation of gas turbines and ensuring the assigned resource GTP becomes difficult without the use of new design solutions and material with high heat resistance.

On the example of regulating the operating modes of the three-shaft installation of the GPU -10 "Wave", the characteristics of the control panel = f (tvx, N) are used in graphical form (Fig. 5).

The paper considers a method of modernization of a gas turbine plant for energy saving purposes. This goal is achieved by the system of injection of prepared water into the combustion chamber in an amount that allows you to completely replace the main purpose of secondary air in the heat balance of the GTP.

The Gorenje water, entering the annular space between the casing (housing) and the combustion chamber heat pipe, instantly evaporates due to the high temperature of the walls

of the heat pipe under the action of the combustion zone inside the heat pipe; the flame temperature reaches 1800-2200 °C. The vapor formed during evaporation with a temperature of 250-350 °C plays the role of secondary air.

In order to increase the efficiency of the GPU, we consider the option of mixing natural gas with hydrogen, which has a higher flame propagation speed, wider ignition limits, while reducing the fuel gas consumption.

The technical condition of the GPU, determined by the quality of its manufacture, installation on the COP and repairs carried out, significantly affects the consumption of energy resources. The coefficient of technical condition for the power of a gas turbine driven GPU is usually at the level of 0.85 - 0.90 and even lower, and the efficiency of the operated units is significantly lower than the design level, which can not but affect the reduction in the indicators of natural gas transport. Calculations show that the fuel gas consumption on the gas turbine drive can be reduced by 5 - 6% only by improving the quality of the repairs carried out by the gas turbine engine.

To assess the possibility of calculation, simulation and synchronization of modes of operation of gas turbines and mill in the composition of the GPU method of power balance proizvedeniakh the technical condition for power turbines and mill on the basis of the data industry performance measurements. The reference values of power consumption for a turbine of the supercharger (next – T) system "GTP- mill" is defined capacity values for each industrial measurement on the basis of gas-dynamic parameters of the flow of gas through the mill by the method of "enthalpy" [17, 18]:

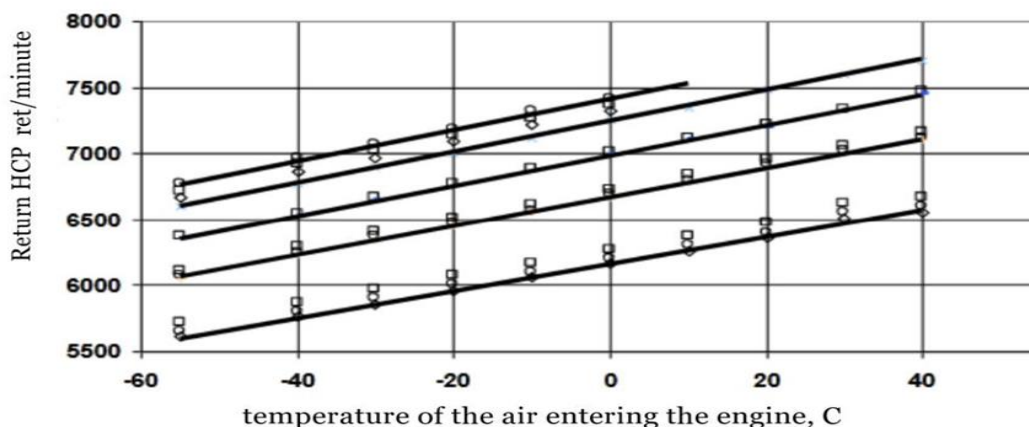


Figure 5 - The dependence of the speed of the high-pressure stage on the air temperature at the engine inlet

$$NE=N_i+\Delta NM+NT, \quad (1)$$

where N_i is the internal power of the pulp and paper mill, kW;

ΔNM -mechanical losses in the pulp and paper mill, kW;

NT – heat loss of the CBN to the environment, kW.

$$N_i=H_i \cdot G_H \quad (2)$$

where H_i is the internal specific work of the pulp and paper mill, kJ/kg;

G_H – mass flow rate of gas through the flow part of the pulp and paper mill, kg/ s.

$$H_i=l_{2H}-l_{1H} \quad (3)$$

where l_{2H} and l_{1H} are the enthalpy of the pumped natural gas in the sections of the inlet and outlet pipes of the pulp and paper mill, kJ/kg.

$$N_T=\alpha_T \cdot F \cdot (T_H-T_A) \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

where α_T is the coefficient of heat transfer to the environment, according to [17, 18], for performing estimated calculations, it is allowed to take [4, 5, 10]

$$\alpha_T=14 \frac{B_T}{m^2K};$$

F the surface area of pulp and paper mill (passport size, also can be determined using the procedure of laser surface scan PPM), m^2 ;

T_H, T_A the average temperatures of the pulp mill housing (can be determined by thermal imaging of the surface of the pulp mill housing or overhead temperature sensors) and the ambient air.

According to [15, 16, 17] the mechanical losses of GPU ΔNm do not exceed 1.0-1.5% of the power consumption. The most reliable assessment of mechanical losses can be made with the use of torque meters installed on the shaft of the supercharger turbine (power turbine) or special tests in the factory. More detailed thermal and gasdynamic calculations using the "enthalpy" method (as well as the "Schultz" method) are described in the methodology [14, 13].

In the design, construction and reconstruction of compressor stations, it is necessary that the main equipment and auxiliary equipment comply with the following aspects:

- If the requirements of the design capacity at the plant are met with the design volume of gas

transportation, the installed gas turbine units must provide highly efficient transportation of the required volumes of gas over long distances;

- The units must provide convenience during operation and repair work;

-For the convenience of operation, maintenance and maintenance, it is necessary to use gas pumping units of the same model at the station. Gas pumping units must work effectively under the climatic conditions of this station.

- Based on the experience of using the units, as well as taking into account the needs and parameters of this gas pipeline, the GPU should be able to repair in the conditions of the COP;

- The compressors must meet the relevant operating requirements in accordance with the volumes of gas transportation over the years, taking into account the possibility of adapting to changing (adapt to changes) volumes of gas transportation. The efficiency of the compressors at the design volume of gas transportation should be maximum, the compressors should work highly efficiently in all possible operating modes.

The use of centrifugal compressors with an electric drive, equipped with an appropriate system of power supply, distribution, and energy supply, can fully meet the needs of working with various changes in the situation on the pipeline. Usually, the presence of several sources of cheap electricity in the construction area of the COP can serve as a basis for making a decision to use an electric drive.

The following technical and economic criteria should be applied to solve the tasks of selecting a GPU and constructing a COP:

- minimum input capacity (GPU);

- maximum reliability of the COP operation at a given performance;

- minimum capital expenditures for equipment and operating costs for the CS.

Guided by the generally accepted design standards in the oil and gas industry, the recommended number of GPU, their unit capacity, and technological characteristics should be determined by the results of appropriate calculations and comparative analyses.

The number of units should be calculated based on the estimated capacity for the COP as a whole, taking into account the available capacity of one GPU. The available power of the GPU depends on the operating conditions (ambient temperature, high-altitude location of the GPU), as well as the characteristics of the GPU itself, provided by the manufacturer.

For the long-distance transportation of natural gas through a pipeline, a centrifugal compressor is mainly used.

The centrifugal type compressor refers to high-speed units, the effective operation of which is possible only in conditions of high rotational speeds. The selected drive can be a gas turbine unit, or an electric motor. To transport large volumes of gas over long distances, gas turbine units are mainly used as the drive of the GPU centrifugal compressor.

The main advantage of the centrifugal compressor is a large pumping volume, large capacity of a single unit, small relative weight, simple design, small footprint, high operating efficiency, stable gas flow volume, low noise, convenient operation, long service life, low maintenance costs, while the compressed gas does not come into contact with the lubricating oil of the compressor mechanisms, so high quality gas transportation is ensured.

Modern centrifugal compressors have a wide range of performance, being machines with minimal maintenance costs with a long service life, have an efficient dry gas sealing system (DGS), do not require reducing the number of revolutions or can be connected to the drive shaft through a coupling. [10]

Introduction of automated energy-saving management systems, hereinafter referred to as the Automated Power Supply Management System, is intended for monitoring and accounting of COP power supply facilities.

The COP management system is built as distributed with the decentralization of individual management functions. The goals of creating an integrated automated process control system and ES are:

- improving the efficiency and quality of decision-making on the management of energy supply and gas supply system;

- improving the reliability of gas and power supply, rapid elimination of pre-emergency and emergency modes, with subsequent analysis of emergency situations;

- technical and commercial accounting of gas and electricity consumption; introduction of equipment operation diagnostics.

The COP APSMS are designed for automated control and real-time control of the compressor station power supply, as well as for transmitting the necessary information to the CS APSMS. [9, 11-16]

The objectives of the establishment of the APSMS are:

- improving the efficiency of energy supply quality management;

- improving the reliability of power supply;
- improvement of the system of accounting for the quantity and quality of electricity received;
- accounting and control of electricity consumption;
- timely submission of reliable information to operational personnel on the progress of the technological process, the state of equipment and controls; reduction of unproductive costs and energy losses;
- improvement of primary equipment diagnostics and reduction of equipment repair costs; provision of personnel with retrospective technological information;
- the possibility of including the APSMS in automated systems of the highest level.

Save energy. The gas industry annually consumes tens of billions of kilowatt-hours of electricity, so the economical use of this energy is an urgent task. The main sources of its savings are the introduction of rational technological regimes based on the achievements of science and technology, the rationalization of power supply schemes, the improvement of the operation of energy and technological equipment, the introduction of new technology and progressive electricity consumption standards.

It is important to properly account for and analyze the specific energy consumption per unit of production. This is one of the main indicators that characterize the technical and economic level of production in general and the degree of rational management of the electric economy. The norms of specific electricity consumption allow you to control the state of production by comparing the actual consumption with the recommended or normalized one obtained over a long period of operation at a similar production or a separate production process [6, 14, 15].

Conclusions

The application of the approaches discussed in the design and reconstruction of compressor stations will improve the energy efficiency indicators of the COP, reduce the power consumption of compressor stations and reduce the cost of fuel gas. The calculation and selection of the main electric power equipment should be carried out taking into account the maximum savings and reduction of electricity losses due to the selection of optimal technical characteristics, possible operating modes of the equipment.

The use of electrical equipment that meets the modern requirements of international standards should be provided.

For example, measures to heat and increase the temperature of the fuel gas at the inlet of gas-piston power plants provide less gas consumption for electricity generation. A modern control system for parallel operation of generators will ensure an even distribution of the load between the installations, save the equipment from premature wear, and increase the inter-repair periods.

Also, the utilization of the heat of the exhaust gases for heating the air supplied for mixing with the fuel gas can serve to increase the efficiency of using gas-piston power plants. Rational loading of generators when the CS is not running at full capacity allows you to save fuel gas, extend the life of the equipment.

Conflict of interest. On behalf of all authors, the corresponding author declares that there is no conflict of interest.

Cite this article as: Moldabayeva G.Zh., Suleimenova R.T., Sadvakasov M.A., Jalalov G.E. Features of planning and implementation of energy-saving measures at compressor stations of main gas pipelines. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* - 2021. № 2 (317), pp. 46-56. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.17>

Магистральдық газ құбырларының компрессорлық станцияларында энергия үнемдеу шараларын жоспарлау және іске асыру ерекшеліктері

¹Молдабаева Г.Ж., ¹Сулейменова Р. Т., ²Садвакасов М.А., ³Джалалов Г.И.

¹ Satbayev University, Алматы, Қазақстан

² ТОО «Газопровод Бейнеу-Шымкент», Алматы, Қазақстан

³ «Мұнай және газ» институты, «Қабат жүйелерінің гидрогаздинамикасы» зертханасы, Әзірбайжан

* Corresponding author email: moldabayeva@gmail.com, 830809400443-D@stud.satbayev.university

ТҮЙІНДЕМЕ	
<p>Алынған: 14 наурыз 2021 Сараптама жасалды: 15 сәуір 2021 Қабылданған: 13 мамыр 2021</p>	<p>Қазіргі уақытта Қазақстандағы Ұлттық газбен жабдықтау операторы жабдықтың нақты техникалық жағдайын ескеріп және газ тасымалдау жүйесін оңтайлы басқаруды сақтай отырып, табиғи газды өз қажеттілігі және технологиялық қажеттіліктер үшін ұтымды пайдалануға ерекше назар аударады. Газ құбырларын энергиялық жағынан тиімді басқару - бұл газ шығынын оңтайландырудың басым бағыттарының бірі. Газ тасымалдау жүйесінің жұмысында энергия үнемдейтін технологиялардың инновациялық әдістерін қолдану, газ айдайтын қондырғылардың жұмысының тиімділігін арттыру, сондай-ақ автоматтандырылған энергия үнемдеу жүйесін енгізу газ тасымалдау тиімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Түйін сөздер: Құбыр, табиғи газ, газ айдау қондырғысы, пайдалану, компрессорлық станциялар.</p>
Авторлар туралы ақпарат:	
Молдабаева Гульназ Жаксылыковна	Техника ғылымдарының докторы, Satbayev University, «Мұнай инженерия» кафедрасының профессоры. 050013, Саппаев 22а, Алматы, Қазақстан. Электрондық пошта: moldabayeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7331-1633 .
Сулейменова Райхан Таупиховна	«Мұнай инженерия» кафедрасының докторанты, Satbayev University, 050013, Саппаева 22а, Алматы, Қазақстан. Электрондық пошта: 830809400443-D@stud.satbayev.university, https://orcid.org/0000-0001-7995-5560 .
Садвакасов Муқан	«Бейнеу-Шымкент газ құбыры» ЖШС бас директорының орынбасары, Алматы, Қазақстан, m.sadvakassov@bsgp.kz
Джалалов Гариб Исакович	Техника ғылымдарының докторы, Әзірбайжан Ұлттық Ғылым академиясының профессоры, Әзірбайжан ҰҒА корреспондент-мүшесі, «Мұнай және газ» институты, «Қабат жүйелерінің гидрогаздинамикасы» зертханасы, Әзірбайжан

Особенности планирования и реализации энергосберегающих мероприятий на компрессорных станциях магистральных газопроводов

¹ Молдабаева Г.Ж., ¹ Сулейменова Р. Т., ² Садвакасов М.А., ³ Джалалов Г.И.

¹ Satbayev University, Алматы, Казахстан² ТОО «Газопровод Бейнеу-Шымкент», Казахстан³ Лаборатория «Гидрогазодинамики пластовых систем», институт «Нефть и газ», Национальная Академия Наук, Азербайджан

* Электронная почта автора: moldabayeva@gmail.com, 830809400443-D@stud.satbayev.university

Поступила: 14 марта 2021 Рецензирование: 15 апреля 2021 Принята в печать: 13 мая 2021	АННОТАЦИЯ В настоящее время Национальный оператор газоснабжения в Казахстане уделяет особое внимание рациональному использованию природного газа для собственных и технологических нужд при сохранении оптимального управления газотранспортной системой с учетом конкретной технической ситуации оборудования. Энергоэффективное управление газопроводами - одно из приоритетных направлений оптимизации затрат на газ. Использование инновационных методов энергосберегающих технологий при эксплуатации газотранспортной системы, повышение КПД газоперекачивающих агрегатов, а также внедрение автоматизированных систем управления энергосбережением позволит значительно повысить эффективность транспортировки газа. Ключевые слова: Трубопровод, природный газ, газоперекачивающих агрегат, эксплуатация, компрессорные станции.
Молдабаева Гульназ Жаксылыковна	Информация об авторах: Доктор технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Нефтяная Инженерия», Satbayev University, 050013, Сампаева 22а, Алматы, Казахстан. https://orcid.org/0000-0001-7331-1633 . E-mail: moldabayeva@gmail.com,
Сулейменова Райхан Таупиковна	Докторант кафедры «Нефтяная Инженерия», Satbayev University, 050013, Сампаева 22а, Алматы, Казахстан. https://orcid.org/0000-0001-7995-5560 . E-mail: 830809400443-D@stud.satbayev.university,
Садвакасов Муқан	Заместитель Генерального директора по эксплуатации ТОО «Газопровод Бейнеу-Шымкент», Алматы, Казахстан, m.sadvakassov@bsgp.kz
Джалалов Гариб Исакович	Доктор технических наук, профессор Национальной Академии Наук Азербайджана, чл-корреспондент НАНА, Зав. Лабораторией «Гидрогазодинамики пластовых систем», институт «Нефть и газ», Национальная Академия Наук, Азербайджан

Литература

- [1] Карасевич А.М., Крейнин Е.В. Перспективы и резервы энергосбережения в России. Газовая промышленность. 2010. №9. С.68 - 71.
- [2] Ишков А.Г., Хворов Г.А., Юмашев М.В., Юров Е.В., Ешич Л.К. Современное состояние и перспективное развитие направлений энергосбережения в транспорте газа. Газовая промышленность. 2010. №9. С.36 - 39.
- [3] Ишков А.Г., Яценко И.А., Пыстина Н.Б., Хворов Г.А., Юмашев М.В., Юров Е.В. Методология формирования программ энергосбережения ОАО «Газпром» в условиях нового законодательства. Газовая промышленность. 2012. №2. С.70 - 75.
- [4] Интрилигатор, М. Математические методы оптимизации и экономическая теория. Пер. с англ. -М: Прогресс, 1975. С.607.
- [5] Козаченко А.Н., Никишин В.И., Поршаков Б.П. Энергетика трубопроводного транспорта газов. М.: Нефть и газ, 2001. С.397.
- [6] Карасевич А.М., Сухарев М.Г., Белинский А.В., Тверской И.В., Самойлов Р.В. Энергоэффективные режимы газотранспортных систем и методы их обеспечения. Газовая промышленность. 2012. №1. С.30 - 34.
- [7] Кампасти Н. Аэродинамика компрессоров. перевод с англ., Под. Ред. Ф.Ш. Гельмедова Н.М. Савина. М.: «Мир», 2000. С. 688.
- [8] Китаев С.В., Фарухшина Р.Р. Экспресс-способ определения показателей энергоэффективности газоперекачивающих агрегатов. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. №1. 2015. С.19 - 22.
- [9] Микаэлян Э.А. Модернизация газотурбинной установки в целях энергосбережения. Газовая промышленность. 2010. №10. С.15 - 16.
- [10] Методика 83-00-900ПМ 156. Газотурбинная установка ГТУ-16П. Комплексное диагностическое обследование по эксплуатационным параметрам. Пермь: ОАО «Авиадвигатель». С.63.
- [11] Методика 83-00-900 ПМ 150-1. Двигатель ПС-90ГП-2. АО «Авиадвигатель» Определение мощности на валу силовой турбины по термодинамическим параметрам в эксплуатации.
- [12] Михайлов С.А., Мингазов Б.Г., Варсегов В.Л., Симкин Э.Л., Осипов Б.М., Токмовцев Ю.В. Разработка методики многофакторного диагностирования и прогнозирования технического состояния ГПА-16Р «Уфа» с газотурбинным приводом АЛ-31СТ. Разработка программного обеспечения для расчета параметров технического состояния ГПА-16Р «Уфа». 2013. С.55.
- [13] Михайлов С.А., Мингазов Б.Г., Варсегов В.Л., Симкин Э.Л., Осипов Б.М., Токмовцев Ю.В. Разработка методики многофакторного диагностирования и прогнозирования технического состояния ГПА-16Р «Уфа» с газотурбинным приводом АЛ-31СТ. Разработка программного обеспечения для расчета параметров технического состояния ГПА-16Р «Уфа». 2014. С.215.

- [14] Михайлов Д.А., Гольянов А.И. Компьютерный имитатор работы центробежного нагнетателя. Уфа.: ИДПО ГОУ ВПО УГНТУ, 2007. С. 32 - 44.
- [15] Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М: Финансы и статистика, 2004. 344 с.
- [16] Иванов Э.С. Особенности моделирования режимов работы газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистрального транспорта газа в современных условиях эксплуатации. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2012, №5. С.99-114
- [17] Иванов Э.С., Гольянов А.И. Совершенствование процессов эксплуатации газоперекачивающих агрегатов. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 1. С. 30-46.

Reference

- [1] Karasevich A.M., Kreinin E.V. Perspektivy i rezervy energosberezheniya v Rossii [Prospects and Reserves of Energy Saving in Russia]. Gazovaya promyshlennost. 2010. №9. S.68 - 71. (in Russ).
- [2] Ishkov A.G., Khvorov G.A., Yumashev M.V., Yurov E.V., Yesic L.K. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivnoye razvitiye napravleniy energosberezheniya v transporte gaza. [Current state and perspective development of energy saving directions in gas transport]. Gas Industry. 2010. №9. p. 36 - 39. (in Russ).
- [3] Ishkov A.G., Yatsenko I.A., Pystina N.B., Khvorov G.A., Yumashev M.V., Yurov E.V.. Metodologiya formirovaniya programm energosberezheniya OAO «Gazprom» v usloviyakh novogo zakonodatel'stva [Methodology for the Formation of Energy Saving Programs of OAO Gazprom in the Conditions of New Legislation]. Gas Industry. - 2012. №. 2. p.70 - 75. (in Russ).
- [4] Intriligator M. Mathematical methods of optimization and economic theory / M. Intriligator. Per. from English - M.: Progress, p.1975.-607. (in Eng).
- [5] Kozachenko A.N., Nikishin V.I., Porshakov B.P. Energetika truboprovodnogo transporta gazov [Gas pipeline power engineering]. M.: Oil and gas, 2001. P.397. (in Russ).
- [6] Karasevich A.M., Sukharev M.G., Belinsky A.V., Tverskoy I.V., Samoilov R.V. Energoeffektivnyye rezhimy gazotransportnykh sistem i metody ikh obespecheniya [Energy efficient modes of gas transmission systems and methods of their provision]. Gas Industry. 2012. №1. P.30 - 34. (in Russ).
- [7] Campasti N. Aerodinamika kompressorov [Aerodynamics of compressors]. Translation from English. M.: "Mir", 2000. P.688. (in Russ).
- [8] Kitaev S.V., Farukhshina R.R. Ekspress-sposob opredeleniya pokazateley energoeffektivnosti gazoperekachivayushchikh agregatov [Express method for determining the energy efficiency indicators of gas-pumping units]. Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials. №1. 2015. p. 19 - 22. (in Russ).
- [9] Mikaelyan E.A. Modernizatsiya gazoturbinoi ustanovki v selyah energosberezheniya [Modernization of a gas turbine plant for the purpose of energy saving]. Gazovaya promyshlennost. 2010. №10. S.15 - 16. (in Russ).
- [10] Metodika 83-00-900PM 156. Gazoturbinnaya ustanovka GTU-16P. Kompleksnoe diagnosticheskoe obsledovanie po ekspluatatsionnykh parametram [Gas turbine unit GTU-16P. Comprehensive diagnostic examination of operational parameters]. Perm: OAO «Aviadvigatel». P.63. (in Russ).
- [11] Opredeleniye moshchnosti na valu silovoy turbiny po termodinamicheskim parametram v ekspluatatsii. Technique 83-00-900 PM 150-1. PS-90GP-2 engine. [Aviadvigatel JSC Determination of power on the shaft of a power turbine by thermodynamic parameters in operation] (in Russ).
- [12] Mikhailov S.A., Mingazov B.G., Varsegov V.L., Simkin E.L., Osipov B.M., Tokmoltsev Yu.V. Razrabotka metodiki mnogofaktornogo diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya GPA-16R «Ufa» s gazoturbinnym privodom AL-31ST». Razrabotka programmnoy obespecheniya dlya rascheta parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya GPA-16R «Ufa» [Technical report on the topic: "Development of a methodology for multifactor diagnostics and forecasting of the technical state of the GPA-16R" Ufa "with the gas turbine drive AL-31ST". Development of software for calculating the technical condition parameters of GPA-16R "Ufa"], 2013. P.55. (in Russ).
- [13] Mikhailov C.A., Mingazov B.G., Varsegov V.L., Simkin E.L., Osipov B.M. Tokmoltsev Yu.V. «Razrabotka metodiki mnogofaktornogo diagnostirovaniya i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya GPA-16R «Ufa» s gazoturbinnym privodom AL-31ST». Razrabotka programmnoy obespecheniya dlya rascheta parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya GPA-16R «Ufa» [Technical report on the topic: "Development of a methodology for multifactor diagnostics and forecasting of the technical state of the GPA-16R" Ufa "with the gas turbine drive AL-31ST". Development of software for calculating the parameters of the technical state of GPA-16R "Ufa"]. 2014. P.215. (in Russ).
- [14] Mikhailov D.A., Golyanov A.I. Komp'yuternyy imitator raboty tsentrobezhnogo nagnetatelya [Computer simulator of a centrifugal blower]. Ufa.: IDPO GOU VPO UGNTU, 2007. pp. 32 - 44. (in Russ).
- [15] Osovsky S. Neyronnyye seti dlya obrabotki informatsii [Neural networks for information processing]. M: Finance and statistics, 2004. P.344. (in Russ).
- [16] Ivanov E.S. Features of modeling the operating modes of gas-pumping units of compressor stations of main gas transportation in modern operating conditions. Electronic scientific journal "Oil and Gas Business", 2012, №. 5. P. 99-114.
- [17] Ivanov E.S., Gol'yanov A.I. Sovershenstvovanie protsessov ekspluatatsii gazoperekachivayushchikh agregatov [Gas compressor units' exploitation processes development], Electronic scientific journal "Neftegazovoe delo - Oil and Gas Business", 2012, Issue 1, pp. 30 - 46.



ЭОЖ 661.2

DOI: 10.31643/2021/6445.18



FTAMP 31.17.15

Improving the properties of building materials from limestone-shell rock by impregnating sulfur-containing preparations based on local raw materials

^{1*}Abdireim G.E., ²Urakayev F. Kh.

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

²V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Novosibirsk city, Russian Federation

* Corresponding author email: gaziza_97.97@mail.ru

ABSTRACT

The article presents research data on the effectiveness of impregnation with polysulfide solutions of limestone-shell rock used as a facing and wall material, as well as for the manufacture of road products. It is established that for calcium polysulfide, when they are diluted with water or mixed with acid solutions, primary sulfur nanoparticles with an average size of 20 nm are formed, which are subsequently enlarged in two stages to micron sizes. Modification of limestone-shell rock with the impregnating composition developed by us – an aqueous sulfur-containing solution based on calcium polysulfide, containing alcohols and surfactants - can significantly reduce their water absorption and increase their durability. Processing of shell limestone with a solution of calcium polysulfide provides education on the surface of the pores of the stone coating based on nano-sulfur, which partially fills the pore space and having water repellency, reduce water absorption of the samples 5-8 times, increases the average density of 22-27%, the strength of 1.2–1.3 times, softening coefficient – in 6-19%, which allows to predict the increase of durability of building materials on the basis of limestone up to 1.5–2 times or more. The impregnation of wall, facing and road construction materials and products made of limestone-shell with a polysulfide composition allows to improve their operational properties, increase their resistance to atmospheric influences, and expand their scope of application in climatic conditions.

Keywords: sulfur, nanoparticles, calcium polysulfide, polysulfide, synthesis, limestone, shell rock.

Information about authors:

Abdireim Gaziza Erikovna

Master student, Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, the Republic of Kazakhstan, ORCID ID:0000-0002-4767-4606 E-mail: gaziza_97.97@mail.ru

Urakayev Farit Khisamutdinovich

Doctor of Chemical Sciences, Institute of Geology and Mineralogy named after V. S. Sobolev, Siberian branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk city, Russian Federation; E-mail: urakayev@igm.nsc.ru

Жергілікті шикізат негізінде жасалған күкіртқұрамды препараттарды сіңдіру арқылы әктас-ұлутастан жасалған құрылыс материалдарының қасиеттерін жақсарту

^{1*}Әбдірейім Ғ.Е., ²Уракаев Ф.Х.

¹әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

²В. С. Соболев атындағы Геология және минералогия институты, Новосибирск, Ресей

* Автордың электрондық поштасы: gaziza_97.97@mail.ru

ТҮЙІНДЕМЕ

Қаптау және қабырға материалдары ретінде, сондай-ақ құрылыс-жол материалдары ретінде қолданылатын әктас-ұлутасты полисульфидті ерітінділерімен сіңдіру бойынша зерттеу деректері ұсынылған. Кальций полисульфидін сумен сұйылту немесе қышқыл ерітінділерімен араластыру кезінде орташа мөлшері 20 нм болатын күкірттің бастапқы нанобөлшектері пайда болатындығы

Алынған: 24 ақпан 2021

Сараптама жасалды: 10 наурыз 2021

Қабылданған: 14 мамыр 2021

анықталды, олар кейіннен екі сатыда микрон мөлшеріне дейін үлкейеді. Біз әзірлеген, құрамында спирттер мен БАЗ бар күкірт негізіндегі кальций полисульфидінің сулы ерітіндісінің абсорбциялық құрамы әктас-ұлутастың өзгеруін азайтады - оларға судың сіңуін едәуір төмендетіп, төзімділігін арттырады. Кальций полисульфидінің ерітіндісімен әктас-ұлутасты өңдегенде тастың кеуектерінің бетінде наномөлшерлі күкірт негізіндегі жабын пайда болады, ол кеуектер кеңістігін ішінара толтырып, гидрофобты орта түзіп, сынамаларға су сіңу мөлшерін 5-8 есе төмендетеді, олардың орташа тығыздығы 22-27%-ға, қаттылығы 1,2-1,3 есе, жұмсарту коэффициенті 6-19% - ға артады, бұл өз кезегінде әктас-ұлутас негізінде құрылыс материалдарының қолданысын 1,5-2 есеге дейін өсіруге мүмкіндік береді. Қабырғалық, қаптағыш және жол құрылыс материалдары мен әктас-ұлутастан жасалған бұйымдарды полисульфидті композициясымен сіңдіру олардың пайдалану қасиеттерін жақсартуға, атмосфералық әсерлерге төзімділігін арттыруға, климаттық жағдайларда олардың қолданылу ауқымын кеңейтуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: күкірт, нанобөлшектер, кальций полисульфиді, полисульфид, синтез, әктас, ұлутас.

Авторлар туралы ақпарат:

Әбдірейім Ғазиза Ерікқызы

магистрант, Эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.

e-mail: gaziza_97.97@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4767-4606>

Уракаев Фарит Хисамутдинвич

химия ғылымдарының докторы, В. С. Соболев атындағы Геология және минералогия институты, Новосибирск, Ресей. e-mail: urakaev@igm.nsc.ru

Кіріспе

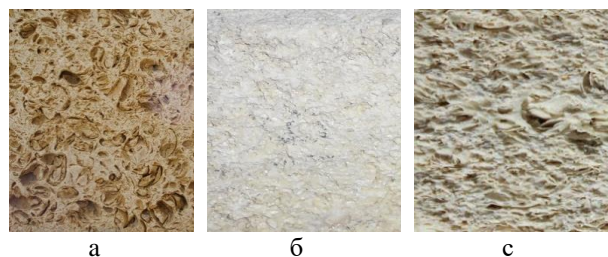
Шөгінді тау жынысы – әктас-ұлутастың қасиеттері, құрылымдық ерекшеліктері және құрамы оны халық шаруашылығының көптеген салаларында кеңінен қолдануға мүмкіндік береді. Керамикалық кірпішке ұқсас сипаттамалардан асып түсетін сәндік қасиеттерінің, өңдеудің қарапайымдылығының, экологиялық таза және жылу өткізгіштігінің, бу және ауа өткізгіштігінің арқасында ұлутас тұрғын үй құрылысында қабырға және әрлеу материалы ретінде қолданылады [1].

Құрылыс саласында ұлутас-әктас үлкен көлемде кесек тас, дана түрінде қабырға тасы және қалқалық блоктар, интерьерді безендіруге арналған тақтайшалар, тротуар плиткалары, жиек тастар, саты элементтері, қоршаулар, беттік сәндік элементтер, ландшафтық дизайн объектілері, шағын сәулет нысандары, сондай-ақ қиыршық тас және құм түрінде қолданылады [2].

Қазақстанда әктас-ұлутастың 100-ге жуық кен орны барланған. Үлкен көлемде өндіру Жетібай, Бейнеу, Солтүстік-Шығыс, Қарамандыбас, Бешқұдық, Қарақұс, Састөбе кен орындарында, Форт-Шевченко, Сарташ аудандарында, Қызылқұм елді мекенінде, Мұнайлы ауданының Құрық ауылында және басқа да бірқатар карьерлерде жүргізіледі. Қазақстанда әктас-ұлутастың едәуір барланған қорлары (180 млн. т астам) және тасты өндірудің салыстырмалы төмен өзіндік құны (3500-5000 тг/м³), оны құрылыс саласында пайдаланудың болашағы зор екенін көрсетеді [3].

Эксперименталдық бөлім

Біздің жұмысымызда Бейнеу, Солтүстік-Шығыс, Жетібай кен орындарының әктасты-ұлутасты шикізаты таңдалып алынды. Шөгінді текті зоогендік тау жынысы ретінде әктас-ұлутастың құрылымы кальцит цементімен бекітілген ұлутастар мен ұлутастық детрит негізінде әртүрлі қоспалары бар кальций карбонатының қоспасын құрайды [4]. Әктас құрылымдары әртүрлі кен орындары үшін айтарлықтай ерекшеленеді (1-сурет).



Сурет 1 - Әктас-ұлутас үлгілерінің құрылымы:
а-Солтүстік-Шығыс кен орны;
б-Бейнеу кен орны; с-Жетібай кен орны

Одан әрі жұмыс жасау мақсатында Бейнеу, Жетібай және Солтүстік-Шығыс кен орындарындағы әктас – ұлутастардың фазалық құрамы зерттелді. РФА талдау Cu_{Ka} – сәулеленуші, β -сүзгілі ДРОН-3 автоматтандырылған дифрактометрде жүргізілді.

Дифрактограммаларды түсірудің шарттары: $I=20$ мА, $U=35$ кВ; суретті $\theta=2\theta$ шартында түсіру; детектор 2 град/мин. Жартылай

сандық негіздегі рентгенфазалық талдау теңдей бөлікті сынамалар мен жасанды қоспалар әдісін қолдана отырып ұнтақ үлгілердің дифракциялық заңдылықтары негізінде жүргізілді. Фазалардың сандық қатынастары анықталды. Дифрактограммалардың интерпретациясын түсіндіру ICDD картотекасының деректерін қолданып, PDF2 ұнтақты дифрактометриялық деректердің базасын (Powder Diffraction File) және қоспалардан таза минералдардың дифрактограммаларын пайдалана отырып жүргізілді.

Кесте 1 - Батыс Қазақстан кен орындарының әктас-ұлтас үлгілерінің фазалық құрамы (РФА деректері бойынша).

Үлгінің атауы	Кальцит	Арагонит	Доломит
Бейнеу кен орнының әктас-ұлтасы	79,0%	21,0%	–
Бейнеу кен орнының әктас-ұлтасы	84,5%	15,5%	–
Солтүстік-Шығыс кен орнының әктас-ұлтасы	100%	–	–
Жетібай кен орнының әктас-ұлтасы	94,5 %	–	5,5%

РФҚ нәтижелерін талдау және Батыс Қазақстан кен орындарынан алынған әктас-ұлтас үлгілерінің рентгендік-спектрлік талдауы олардың фазалық құрамындағы елеулі айырмашылықтарды анықтауға мүмкіндік берді. Солтүстік-Шығыс кен орнының әктас-ұлтасы 100% кальциттен тұрады. Жетібай кен орнының әктас-ұлтасында 5,5% доломит, күйдіру кезінде магнезиалды әк түзеді, ал Бейнеу кен орнының әктас-ұлтасының үлгілері 15,5% - дан 21% - ға дейін арагониттен тұратыны анықталды.

Бейнеу әктас-ұлтасы қоспалардың жоқтығымен ерекшеленді, бұл кальций оксиді кристалдарының нано-күйге ауысуын қамтамасыз етті және құрамында күкірт бар ерітінділерді синтездеу процесінің күшеюіне ықпал етті. Құрамының басты ерекшелігі арагониттің шамамен 20% болуы. Арагонит кальцитке қарағанда қаттырақ (қаттылығы 3,5 – 4) және тығыз (тығыздығы 2,9 – 3,0), ал кальциттің тығыздығы 2,6-2,8 шамасын көрсетті.

Құрылыста әктас-ұлтастың кеңінен қолданылуына қарамастан, оның құрылыс

материалдарының өнімділігі мен беріктігін төмендететін кейбір кемшіліктерін атап өту керек. Әктас-ұлтас гигроскопиялық болады, кеуектілігі 22-50% құрайтын үлкен көлемімен сипатталады, суда аздап ериді, қышқыл қосылыстармен қаныққан жер асты сулары мен атмосфералық жауын-шашынның әсері кезінде еру қарқындылығы артады. Бұл оның салыстырмалы түрде аязға төзімділігі (аязға төзімділік деңгейі F15 - F35) мен сүмен қаныққандағы беріктік қасиетінің төмендеуін алдын-ала анықтайды, жұмсару коэффициентінің мәні 0,6-0,9 шамасын құрайды. Сонымен қатар, кейбір шөгінділерден тұратын әктас-ұлтасқа саңырауқұлақтар зиянын тигізеді. Бұл материалдың кеуек құрылымы мен гигроскопиясы материалдың кеуек кеңістігінің зақымдалуына ықпал етеді. Осылайша, әктастан жасалған құрылыс материалдарын ылғалдан қорғау және олардың беріктігін арттыру мәселелері өзекті болып табылады.

Кеуекті құрылыс материалдарының, оның ішінде әктас-ұлтастың суды сіңіруін төмендету мақсатында қазіргі уақытта органикалық және кремнийорганикалық негіздегі гидрофобизаторлар мен қорғанышты жабындар пайдаланылады. Қорғаныш жабындар материалдың бетінде жұқа қабық түзеді, кеуектерге енетін су мөлшерін азайтады. Бұл жабындардың негізгі кемшіліктері, ауа-райының әсерінен тез бұзылуы және қорғаныш қосылыстары мен гидрофобизаторлардың салыстырмалы түрде құны аса жоғары болып саналады [5, 6].

Пайдалану қасиеттерін дамыту мен жақсарту және қабырғалық, қаптағыш және жол құрылыс материалдары мен бұйымдарының, оның ішінде ұлтас-әктастан жасалған бұйымдардың ұзақ мерзімділігін арттыруды шешудің ең қарапайым және технологиялық тәсілдерінің бірі оларды полисульфидті ерітінділермен сіңдіру болып табылады. Бұл сіңдіру құрамының терең енуін, материалдың кеуектерін гидрофобты қатты фазамен (күкіртпен) ішінара толтыруды, кеуектілік пен су сіңірілуін азайтуды, оның тығыздығы мен аязға төзімділігін арттыруды қамтамасыз етеді [7, 8, 9].

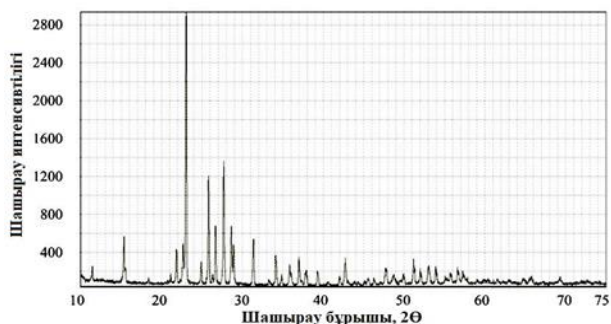
1,22 – 1,24 г/см³ тығыздықтағы кальций полисульфидіне негізделген сіңдіру құрамы, төмен тұтқырлықтың арқасында, әктас-ұлтастың кеуек құрылымына 2-4 см және одан да көп тереңдікке сіңеді және материалды кептіру кезінде, оның кеуектерінде енген күкірттің

гидрофобты нанобөлшектері түрінде ұзақ, ерімейтін неорганикалық қорғаныс жабыны түзіледі [10], олар сумен, еріткіштермен немесе тұзды ерітінділермен жуғанда ерімейді [11, 12]. Қорғаныс жабындыларының сипаттамалары (бөлшектердің өлшемдері және олардың пішіні) Shimadzu wing SALD 7101 лазерлік бөлшек өлшегіш анализаторымен және Solver PRO-M зонд микроскопымен зерттелінді, ал фазалық талдау BRUKER D2 PHASER дифрактометрінде жүргізілді.

Кептіру кезеңінде полисульфидті ерітіндіден кристалданған және әктас-ұлутастың кеуек құрылымында қорғаныс қабатын құрайтын бөлшектердің мөлшерін өлшеу үшін олар материалдың кеуек кеңістігінен бөлінді. Ол үшін әктас-ұлутастың сіңдірілген үлгісі кептіріліп, тұз қышқылының ерітіндісінде ерітілді. Тұндырылған жоғары дисперсті сары ұнтақ тазартылған сумен жуылып, кептірілді.

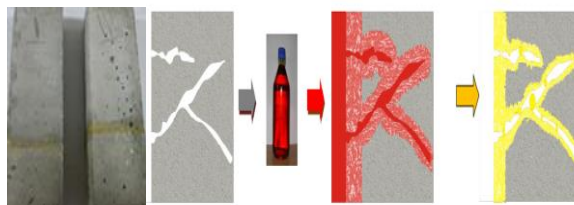
Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Лазерлік анализатормен анықталған шөгінді бөлшектердің дифференциалды және интегралды таралуы бөлшектердің орташа мөлшері 20 нм екенін көрсетті. Кальций полисульфидінің ерітіндісінен химиялық жолмен тұндырылған бөлшектер мен полисульфидті ерітіндімен сіңдірілген әктас-ұлутастарының кеуек кеңістігінен бөлінген бөлшектердің мөлшеріне сәйкес таралуы олардың сәйкестігін көрсетті. Зонд микроскопында жүргізілген зерттеулерде бөлшектердің орташа мөлшері 20-25 нм аралықты көрсетті, сонымен қатар олардың сфералық симметриялы формасы анықталды. Тұнбаның химиялық және рентгендік дифракциялық талдауы бөлшектердің кристалдық тордың орторомбалық құрылымы бар элементарлы күкірт екенін көрсетті (2-сурет).



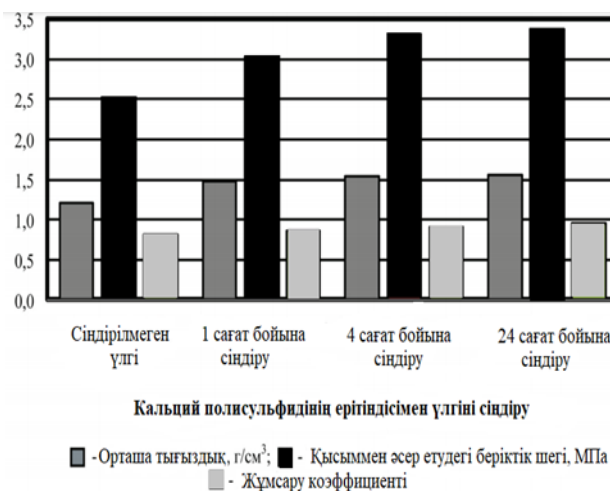
Сурет 2 - Полисульфидті ерітіндіге малынған әктас-ұлутастың кеуек кеңістігінен бөлінген күкірт нанобөлшектерінің рентгенограммасы

Полисульфидті ерітіндімен сіңдірудің материалдың физикалық-механикалық қасиеттеріне әсері бойынша зерттеулер массасы 25-28%, орташа тығыздығы 1,19 – 1,22 г/см³, сығылу кезіндегі орташа беріктік шегі 2,52 МПа су сіңіретін үлгілерде жүргізілді. Қабырғасының өлшемі 50 мм текшелер үлгілерінің полисульфидті ерітіндісімен сіңдіру қалыпты жағдайда ваннаға 1, 4 және 24 сағат ішінде батыру арқылы жүзеге асырылды. (3-сурет) Салмағы бойынша су сіңіру, орташа тығыздық, сығылу кезіндегі беріктік шегі және сынама (өңделмеген) және сіңдірілген үлгілердің суға қаныққан күйінде әктас-ұлутастың беріктігінің төмендеуі MEMCT 30629-2011 әдістемесі бойынша анықталды [13].



Сурет 3 - Полисульфидті ерітіндімен өңдеудің фронталды әсер ету жағдайларында су сіңіру шамасына әсері

Полисульфидті ерітіндімен өңделген үлгілер мен материалдар үшін судың сіңуін масса бойынша анықтау нәтижелерінен көргеніміздей, сынама (сіңірілмеген) үлгілермен салыстырғанда 1 сағат ішінде сіңірілген үлгілердің массасы бойынша су сіңірудің орташа мәні 81% - ға төмендеді; 4 сағат ішінде сіңірілген үлгілер үшін төмендеу 88% - ды құрады.



Сурет 4 - Полисульфидті ерітіндімен сіңдіру режимінің орташа тығыздыққа, сығылу беріктігіне және әктас-ұлутас үлгілерінің жұмсарту коэффициентіне әсері

Сiңдiру уақытын азайту және әктас-ұлустастан жасалған құрылыс материалдарын өңдеудiң тиiмдiлiгiн арттыру оларды құрылыс-монтаждау немесе әрлеу жұмыстары аяқталғаннан кейiн пульверизатормен сiңдiруге мүмкiндiк бередi. Бұл жағдайда үлгiлердi сiңдiру сынама үлгiлерiмен салыстырғанда массасы бойынша су сiңiрудiң 77% - ға төмендеуiне әкеледi.

4-суретте полисульфидтi ерiтiндiмен сiңдiру режимiнiң орташа тығыздыққа, қысу берiктiгiне және материал үлгiлерiнiң жұмсарту коэффициентiне әсерi туралы мәлiметтер келтiрiлген.

1 сағат iшiнде сiңдiрiлген үлгiлердiң орташа тығыздығы сынамамен салыстырғанда 22,4% - ға артты. Үлгiлердi 4 және 24 сағат iшiнде сiңдiру материалдың тығыздығын сәйкесiнше 26,9% және 27,8% арттырды, бұл әктас ұлустарын сiңдiрудiң төрт сағаттық режимiнiң тиiмдiлiгi мен жеткiлiктi болатынын көрсетедi (4-сурет).

Қорытынды

Эксперименттiк жұмыстар нәтижесiнде материалдың кеуектерiн қатты фазамен iшiнара

толтыру салдарынан үлгiлердiң тығыздығының артуы, полисульфидтi ерiтiндiмен сiңiргеннен кейiн материалды кептiру кезiнде сiңiрiлген сынаманы сығу кезiнде берiктiктiң 1 сағат iшiнде 1,2 есе өсуiн қамтамасыз етуiн, сiңiрiлмеген үлгiлердiң ұқсас сипаттамаларымен салыстырғанда жұмсарту коэффициентi 6,2% - ға артуын; үлгiлердiң төрт және жиырма төрт сағаттық сiңуi сiңдiру құрамының әктас-ұлустардың кеуек құрылымына тереңiрек енуiн қамтамасыз етедi және жұмсарту коэффициентi сәйкесiнше 12 және 19% жоғарылаған кезде оның сығылу берiктiгiн 1,3 есеге арттырады.

Осылайша, келтiрiлген зерттеу нәтижелерiнен материалды полисульфидтi ерiтiндiлермен сiңдiру атмосфералық әсерлерге ұшырайтын, оның негiзiндегi қабырғалық, қаптауыш және жол құрылыс материалдарының пайдалану қасиеттерiн жақсартады және ұзақ мерзiмдiлiгiн арттырады. Бұл Қазақстанда осындай материалдарды қолданудың дәстүрлi саласын кеңейтуге мүмкiндiк бередi.

Осы мақалаға сілтеме: Әбдiрейiм Ғ.Е., Уракаев Ғ.Х. Жергiлiктi шикiзат негiзiнде жасалған күкiртқұрамды препараттарды сiңдiру арқылы әктас-ұлустастан жасалған құрылыс материалдарының қасиеттерiн жақсарту // *Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu..* – 2021. – №. 2 (317), -б. 57-63. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.18>

Cite this article as: Abdireiim G.E., Urakayev F. Kh. Uluchshenie svojstv stroitelnykh materialov iz izvestnyaka rakushechnika putem propitki serosoderzhashchikh preparatov na osnove mestnogo syr'a [Improving the properties of building materials from limestone-shell rock by impregnating sulfur-containing preparations based on local raw materials] // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* – №. 2 (317), -б. 57-63. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.18>

Улучшение свойств строительных материалов из известняка-ракушечника путем пропитки серосодержащих препаратов на основе местного сырья

^{1*} Абдiрейiм Ғ.Е., ² Уракаев Ғ.Х.

¹ Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

* Электронная почта автора: gaziza_97.97@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Эти исследования посвящены влиянию пропитки известняково-ракушечных пород раствором полисульфида, используемого для облицовочных и стеновых материалов, а также при изготовлении дорожных изделий. Установлено, что полисульфид кальция, который разбавляют водой или смешивают с кислыми растворами, образует первые наночастицы серы среднего размера 20 нм, которые затем в два этапа увеличиваются в размере одного микрона. Разработанный нами

Поступила: 24 февраля 2021
 Рецензирование: 10 марта 2021
 Принята в печать: 14 мая 2021

абсорбционный состав-водный раствор полисульфида кальция на основе серы, содержащий спирт и поверхностно-активные вещества-значительно уменьшает изменение извести, позволяет существенно снизить их водопоглощение и повысить долговечность. Обработка известняка-ракушечника раствором полисульфида кальция дает образование наноразмерных покрытий на основе серы, которые частично заполняют межкристаллитные поры камня, после чего гидрофобность, низкое водопоглощение проб увеличивается в 5-8 раз, их среднюю плотность повышает 22-27%, 1,2-1,3 раза прочность, коэффициент размягчения - 6-19%, что позволяет повысить прочность и долговечность строительного материала известняка 1,5- 2 раза и более. Пропитка стеновых и дорожных строительных материалов, и изделий из известняка-ракушечника композицией из полисульфида позволяет повысить их эксплуатационные свойства, повысить их устойчивость к атмосферным воздействиям, а также расширить диапазон их применения в погодных условиях.

Ключевые слова: сера, наночастицы, полисульфид кальция, полисульфид, синтез, известняк, ракушечник.

Информация об авторах:

Абдирейим Газиза Ериковна

Магистрант. Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан. e-mail: gaziza_97.97@mail.ru , <https://orcid.org/0000-0002-4767-4606>

Уракаев Фарит Хисамутдинвич

Доктор химических наук. Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия. e-mail: urakaev@igm.nsc.ru

Әдебиеттер

- [1] Амбарцумян Н.В. Строительные горные породы для производства стеновых и облицовочных материалов. – М.: МГИ, 1982. – 282 с
- [2] Сементовский Ю.В. Известняк: Справочник / Науч. ред. А.С. Филько; М-во при-род. ресурсов РФ. – М.: Геоинформмарк, 1999. – 19 с
- [3] Горная энциклопедия / Гл. ред. Е.А. Козловский; Ред. кол.: М.И. Агошков, Н.К. Байбаков, А.С. Болдырев и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1985. – Т. 2. – 575 с
- [4] Природные облицовочные камни Казахстана: справочник / Под ред. А.А. Абдул-лина, Х.А. Беспяева, Э.С. Воцалевского, С.Ж. Даукеева, Л.А. Мирошниченко. – Алматы: Информационно-аналитический центр геологии и минеральных ресур-сов РК, 2000. – Т. 1. – 181 с.
- [5] Массалимов И.А., Волгушев А.Н., Чуйкин А.Е., Хусаинов А.Н., Мустафин А.Г. Долговременная защита строительных материалов покрытиями на основе нано-размерной серы // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2010. – №1. – С. 45–58. – URL: http://www.nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_1_2010_RUS.pdf (дата обращения 24.04.2017).
- [6] Massalimov I.A., Yanakhmetov M.R., Chuykin A.E., Mustafin A.G. Protection of Building Constructions with Sulfur Impregnating Solution. Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA). June 2013. Vol. 2. Issue 2. pp. 19–24.
- [7] Трансформация молекул полисульфидов в наноразмерные частицы серы в пори-стых неорганических системах / М.Р. Янахметов, И.А. Массалимов, А.Е. Чуйкин, А.Н. Хусаинов, А.Г. Мустафин // *Вестник Башкирского Университета*. – 2013. – Т. 18, № 3. – С. 691–693
- [8] Yelbek Uteпов, Daniyar Akhmetov, Ilnur Akhmatshaeva, Yelena Root. Study of the influence of fine fillers from technogenic waste and various chemical additives on the workability of self-compacting concrete and the strength of the concrete matrix // *Комплексное использование минерального сырья (Complex Use of Mineral Resources)*. – 2019. –4 (311). – р. 64-73. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.39> (In English).
- [9] Янахметов М.Р., Чуйкин А.Е., Массалимов И.А. Модифицирование поровой струк-туры цементных бетонов пропиткой серосодержащими растворами // *Нанотехно-логии в строительстве*. – 2015. – Том 7, № 1. – С. 63–72. – URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-1-2015/63-72.pdf (дата обращения 24.04.2017)
- [10] Рейбман А.И. Защитные лакокрасочные покрытия. – Л.: Химия, 1982. – 320 с
- [11] Массалимов И.А., Янахметов М.Р., Чуйкин А.Е. Прочность и долговечность бето-на, модифицированного пропиточными составами на основе серы // *Нанотехно-логи в строительстве*. – 2015. – Том 7, № 3. – С. 61–75. – URL: http://www.nanobuild.ru/en_EN/journal/Nanobuild-3-2015/61-75.pdf (дата обращения 24.04.2017).
- [12]] Массалимов И.А., Мустафин А.Г., Чуйкин А.Е., Волгушев А.Н., Массали-мов Б.И., Хусаинов А.Н. Упрочнение и увеличение водонепроницаемости бето-на покрытиями на основе наноразмерной серы // *Нанотехнологии в строи-тельстве*. – 2010. – № 2. – С. 54–61. – URL: http://www.nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_2_2010_RUS.pdf (дата обращения 24.04.2017).
- [13] ГОСТ 30629-2011. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний.

Reference

- [1] Ambartsumyan N.V. Stroitel'nye gornye porody dlya proizvodstva stenovykh i oblitsovochnykh materialov [Construction of the rock for the production of wall and facing materials]. Moscow, MGI. 1982. 282 p. (In Russian).
- [2] Sementovskii Yu.V. Izvestnyak: Spravochnik [Limestone: Hand-Book]. Nauchnyi redaktor A.S. Fil'ko; Ministerstvo prirodnykh resursov RF. Moscow, Geoinformmark. 1999. 19 p. (In Russian).
- [3] Gornaya entsiklopediya [The mountain encyclopedia]. Glavnyi redaktor E.A. Kozlovskii; Redaktsionnaya kollegiya: M.I. Agoshkov, N.K. Baibakov, A.S. Boldyrev i drugie. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya. 1985. Vol. 2. 575 p. (In Russian).
- [4] Prirodnye oblitsovochnye kamni Kazakhstana: spravochnik [Natural facing stones of Kazakhstan: reference book]. Pod redaktsiei A.A. Abdullina, Kh.A. Bespaeva, E.S. Votsalevskogo, S.Zh. Daukeeva, L.A. Miroshnichenko. Almaty, Informatsionno-analiticheskii tsentr geologii i mineral'nykh resursov RK. 2000. Vol. 1. 181 p. (In Russian).
- [5] Massalimov I.A., Volgushev A.N., Chuikin A.E., Khusainov A.N., Mustafin A.G. Long-term protection of building materials coatings based on nanoscale sulfur. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2010. No. 1, pp. 45-58. Available at: http://www.nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_1_2010_RUS.pdf (date of access 24.04.2017). (In Russian).
- [6] Massalimov I.A., Yanakhmetov M.R., Chuykin A.E., Mustafin A.G. Protection of Building Constructions with Sulfur Impregnating Solution. Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA). June 2013. Vol. 2. Issue 2. pp. 19–24.
- [7] Yanakhmetov M.R., Massalimov I.A., Chuykin A.E., Khusainov A.N., Mustafin A.G. Transformatsiya molekul polisulfidov v nanorazmernye chastitsy sery v poristykh neorganicheskikh sistemakh [Transformation of polysulfide molecules into nanosized sulfur particles in porous inorganic systems]. *Vestnik Bashkirskogo Universiteta*. 2013. Vol. 18. No. 3, pp. 691–693. (In Russian).
- [8] Yelbek Uteпов, Daniyar Akhmetov, Ilnur Akhmatshaeva, Yelena Root. Study of the influence of fine fillers from technogenic waste and various chemical additives on the workability of self-compacting concrete and the strength of the concrete matrix // *Комплексное использование минерального сырья (Complex Use of Mineral Resources)*. – 2019. – №4 (311). – p. 64-73. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.39> (In English).
- [9] Yanahmetov M.R., Chuykin A.E., Massalimov I.A. Modification of the pore structure of cement concrete impregnation with sulfur-containing solutions. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2015. Vol. 7. No. 1, pp. 63–72. Available at: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-1-2015/63-72.pdf (date of access 24.04.2017). (In Russian).
- [10] [10] Reibman A.I. Zashchitnye lakokrasochnye pokrytiya [Protective paint and varnish coatings]. Leningrad, Khimiya. 1982. 320 p. (In Russian)
- [11] Massalimov I.A., Yanahmetov M.R., Chuykin A.E. Strength and durability of concrete, modified impregnating composition based on sulfur. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2015. Vol. 7. No. 3, pp. 61–75. Available at: http://www.nanobuild.ru/en_EN/journal/Nanobuild-3-2015/61-75.pdf (date of access 24.04.2017). (In Russian).
- [12] Massalimov I.A., Chuykin A.E., Massalimov B.I., Urakaev F.H., Uralbekov B.M., Burkitbaev M.M. Improvement of operational properties of shell limestone building materials by polysulfide solution impregnation. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2017, Vol. 9, no. 3, pp. 66–80. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-3-66-80](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-3-66-80). (In Russian).
- [13] GOST 30629-2011. Facing materials and products made of natural stone. Test methods. (In Russian).



UDC 628.31

DOI: 10.31643/2021/6445.19



IRSTI 87.03.13

Wastewater treatment using natural zeolite materials

¹ Myrzaliev S.K., ² Pratama G.N.I.P., ^{3*} Khamidulla A.G.

¹ "National Center for Complex Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan", Almaty, Kazakhstan

² Yogyakarta State University, Indonesia

³ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

* Corresponding author email: aikahami98@gmail.com

Received: 27 February 2021
Peer reviewed: 05 March 2021
Accepted: 18 May 2021

ABSTRACT

Today, there is an urgent need in our country to develop and implement new energy - and resource-saving technologies for wastewater treatment and water treatment. The need for such a system is determined by the urgency of the tasks of protecting the health of the population, agricultural products and other biological objects. Wastewater is contaminated with radioactive substances, heavy metal ions, toxic substances and pathogenic microbes. During the work, wastewater contaminated with heavy metal ions Cd^{2+} , Pb^{2+} was treated with a natural zeolite material. The mechanism of water purification from metal ions is based on the porous structure and adsorption capacity of zeolite. Heavy metal ions diffuse into the pores of the zeolite material, displacing sodium ions, which are structural modifiers. The zeolite treatment process was carried out by measuring the permeability of wastewater using a conductometer and comparing its results with the value of the permeability of distilled water. According to the results obtained, this method can be used to completely purify wastewater from heavy metal ions.

Keywords: Waste water, purification, sorbents, ions, zeolite.

Information about authors:

Myrzaliev Saule Kerchaizovna

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of training of scientific personnel of RSE "National Center for Integrated Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan", Almaty, Kazakhstan. E-mail: saulekerchaiz@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2997-0716

Galeh Nur Indriatno Putra Pratama

Lecturer in Department of Civil Engineering Education and Planning, Faculty of Engineering, Yogyakarta State University, Address: Jl. Colombo No. 1, Karang Malang, Caturtunggal, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia. Email: galeh@uny.ac.id, ORCID ID: 0000-0002-4107-9814

Khamidulla Aigerim Garipullakzy

Master student, Department of Metals and Minerals Technology, Faculty of Chemistry and Chemical Technology, Al-Farabi Kazakh National University, established at RSE "National Center for Complex Processing of Mineral Resources of the Republic of Kazakhstan", Almaty, Kazakhstan. E-mail: aikahami98@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7871-7971

Introduction

The source of water released in human life and industrial activities is called wastewater [1].

Prerequisites for this project are the treatment of wastewater from oil and oil products, organic compounds in the framework of previous research [2].

Today in our country there is an urgent need to develop and implement new energy and resource-saving technologies for wastewater treatment and

water treatment. The need for such a system is determined by the urgency of the problems of protection of public health, agricultural products and other biological objects. Wastewater after industrial use contains a lot of pollutants: heavy metal ions, acids, alkalis, salts, large amounts of organic matter, etc.

Zeolites are microporous, natural or synthetic aluminosilicate materials with a specific structure. Their structure consists of a tetrahedral crystal lattice consisting of SiO_4^{4-} and AlO_4^{5-} ions. Due to

their unique porous properties, zeolites are used in various fields. Chemical formula of natural zeolite used for wastewater treatment: $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})_{2-3}\text{Al}_3(\text{Al}, \text{Si})_2\text{Si}_{13}\text{O}_{36} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ [3, 4].

The peculiarity of the work is the use of a comprehensive approach to the treatment of wastewater, which includes a combination of physicochemical and effective natural sorbents. In addition, for the first time domestic sorbents based on zeolite materials were used in the implementation of the work [4]. Integrated wastewater treatment methods are currently recognized as the most promising and economical, as they reduce energy and reagent consumption several times, and increase the speed and depth of treatment [5, 6, 7].

Experimental part

The study studied the effects of sorbent concentration and temperature on the sorption process of heavy metals. Natural zeolite from the Taizhuzgen deposit was used as an adsorbent. Chemicals and materials: 30 g of natural zeolite; aqueous solution of heavy metal salts (Cd^{2+} , Pb^{2+}) with a concentration of 0.0025 mole/dm³ for each ion 200 cm³; conductivity meter; pH meter; filter paper; clips, 3 glass filters; 2 glass jars and 4 measuring cups.

The permeability of wastewater contaminated with Cd^{2+} , Pb^{2+} ions was determined using a conductometer. The cascade wastewater filter consists of a vertically placed metal support on which glass funnels and tanks are attached with clamps and rings. The filter paper is mounted on a glass filter. Each filter, which forms a three-layer cascade, is filled with 2 g of natural zeolite. Water permeability and pH are measured after each purification to form a clear idea of the heavy metal purification process.

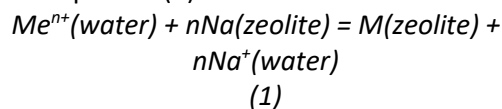
The effect of temperature. 2 g of sorbent was placed in a beaker, containing a solution of Cd^{2+} , Pb^{2+} ions, concentration 0.0025 mole/dm³, 200 cm³ and kept at a temperature of 289, 298, 308 K. The temperature was set and adjusted by means of a thermostat.

Results and Discussion

Heavy metal ions are removed from water by ion exchange and adsorption processes. During adsorption in the microporous structure of zeolite, Na^+ ions are easily displaced from water by Cd^{2+} , Pb^{2+}

ions. The mechanism of ion exchange is based on the high value of electrical negativity of heavy metals, which allows low-negative sodium ions to leave the zeolite structure and form a strong ionic chemical bond with anions in wastewater.

The mechanism of ion exchange follows the chemical equation (1):



where [M] represents the oxidation number of heavy metal ions (Cd^{2+} , Pb^{2+}), and [n] the number of oxidation of metal ions.

Experimental results in the determination of electrical conductivity showed that the water permeability and pH value increase after each treatment (after the ion exchange reaction between heavy metal ions and zeolite), as shown in Table 1. This is because the permeability of sodium ions displaced from zeolite is higher than that of heavy metal ions.

Table 1 - Electrical conductivity and pH values after filtration of wastewater with zeolite

Water	Electrical conductivity (χ)	pH indicators
1. Contaminated water:	50.0 Cm	3.8
2. After the first filtration:	68.5 Cm	6.6
3. After the second filtration:	86.0 Cm	7.1
4. After the third filtration:	91.0 Cm	7.6

Figures 1 and 2 show graphs of the degree of extraction of lead and cadmium ions from natural zeolite to the sorption time.

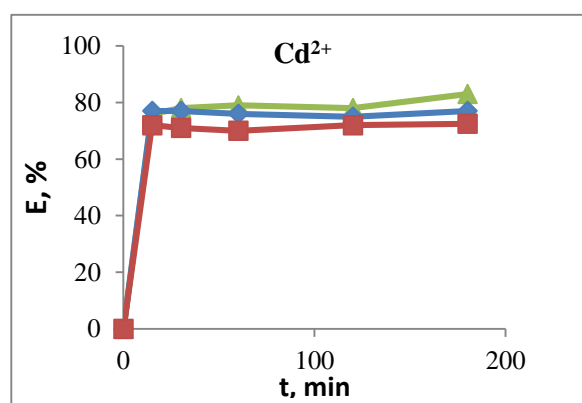


Figure 1 - Dependence of the degree of purification of Cd^{2+} ions on the sorption time

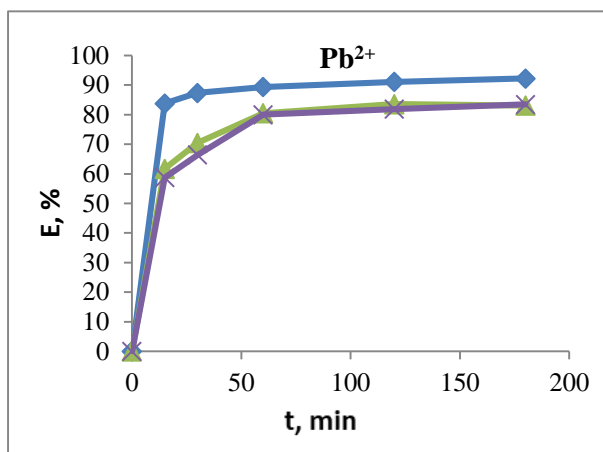


Figure 1 - Dependence of the degree of purification of Pb^{2+} ions on the sorption time

The results of the studies shown in Figures 1 and 2 show that with increasing duration of contact with the aqueous phase containing metal ions in the zeolite, the degree of purification in their initial stage increases and then becomes stable. As can be seen from the proposed graphs, the sorption equilibrium during the purification of lead and cadmium ions is within 30 minutes.

Cite this article as: Myrzaliev S.K., Pratama G.N.I.P., Khamidulla A.G. Wastewater treatment using natural zeolite materials. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* - 2021. № 2 (317), pp. 64-68. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.19>

Conclusions

Experimental results show that natural zeolite is based on ion exchange capacity, microporous structure and adsorption capacity, this method of wastewater treatment is very effective and allows almost complete removal of heavy metal ions. Based on the results obtained, the optimal conditions for the sorption of Cd^{2+} , Pb^{2+} ions by natural zeolite were determined: the mass of the sorbent per 200 cm^3 of solution is 2 g, $T = 298$ K. This method can be used for wastewater treatment, mainly in the metallurgical industry, as well as for water softening.

Conflicts of interest. On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

Acknowledgements. RSE "National Center for Integrated Processing of Mineral Raw Materials of the Republic of Kazakhstan" is thanked for the provision of experimental assistance.

Табиғи цеолиттік материалдарды қолданып ағынды суды тазалау

¹ Мырзалиева С.К., ² Г.Н.И.П. Пратама, ^{3*} Хамидулла А.Ф.

¹ «Қазақстан Республикасының минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі ұлттық орталығы», Алматы қ., Қазақстан

² Джогьякарта мемлекеттік университеті, Индонезия

³ эл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы қ., Қазақстан

* Автордың электрондық поштасы: aikahami98@gmail.com

Алынған: 27 ақпан 2021

Сараптама жасалды: 05 наурыз 2021

Қабылданған: 18 мамыр 2021

ТҮЙІНДЕМЕ

Бүгінгі күні біздің республикада ағынды суларды тазарту және суды тазарту бойынша жаңа энергия және ресурстарды үнемдеу технологияларын әзірлеу мен енгізудің шұғыл қажеттілігі туындауда. Мұндай жүйенің қажеттілігі халықтың денсаулығын, ауылшаруашылық өнімдерін және басқа биологиялық объектілерді қорғау проблемаларының өзектілігімен айқындалады. Ағынды су радиоактивті заттармен, ауыр металл иондарымен, улы заттармен және патогендік микробтармен ластанады. Жұмыс барысында ауыр металдар Cd^{2+} , Pb^{2+} иондарымен ластанған ағынды су табиғи цеолит материалдарымен тазартылды. Металл иондарын судан тазарту механизмі цеолиттің кеуекті құрылымы мен адсорбциялық қабілеттілігіне негізделген. Ауыр металл иондары цеолитті материалдың кеуектеріне еніп (диффузияланып), құрылымның модификаторы болып табылатын натрий иондарын ығыстырады. Цеолитпен тазарту ағынды судың өткізгіштігін кондуктометр көмегімен өлшеу және оның нәтижелерін дистилденген су өткізгіштігінің мәнімен салыстыру арқылы жүргізілді. Алынған нәтижелерге сәйкес, бұл әдісті қолдану арқылы ағынды суларды ауыр металл иондарынан толық тазартуға болады.

	Түйін сөздер: Ағынды су, тазарту, сорбенттер, иондар, цеолит.
	Авторлар туралы ақпарат:
Мырзалиева С.К.	<i>х.ғ.д., профессор, РМК "ҚР МШКҚ ҰО" Ғылыми кадрлар даярлау бөлімінің бастығы, Алматы, Қазақстан, e-mail: saulekerchaiz@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2997-0716</i>
Галех Нур Индриатно Путра Пратама	<i>Джогьякарта мемлекеттік университетінің инженерлік факультеті, инженерлік-техникалық білім беру және жоспарлау кафедрасының оқытушысы. Адрес: Дж. Коломбо №1, Каранг Маланг, Катүртунгал, Депок, Слеман, Даерах Истимева Джогьякарта, Индонезия. Электрондық пошта: galeh@uny.ac.id, ORCID идентификаторы: 0000-0002-4107-9814</i>
Хамидулла А.Ф.	<i>магистрант, «Қазақстан Республикасының минералдық шикізатты кешенді қайта өңдеу жөніндегі ұлттық орталығы» РМК жанынан құрылған эл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Химия және химиялық технология факультетінің Металдар және минералдар технологиясы кафедрасы, Алматы қ, Қазақстан. *e-mail: aikahami98@gmail.com, ORCID ID:0000-0002-7871-7971</i>

Очистка сточных вод с применением природных цеолитных материалов

¹ Мырзалиева С.К., ² Г.Н.И.П. Пратама, ^{3*} Хамидулла А.Г.

¹ «Национальный центр комплексной переработки минерального сырья Республики Казахстан», Алматы, Казахстан

² Джогьякартский государственный университет, Индонезия

³ Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

* Электронная почта автора: aikahami98@gmail.com

	АННОТАЦИЯ
	Сегодня в нашей стране существует острая необходимость в разработке и внедрении новых энерго- и ресурсосберегающих технологий очистки сточных вод и водоподготовки. Необходимость такой системы определяется актуальностью задач защиты здоровья населения, сельскохозяйственных продуктов и других биологических объектов. Сточные воды загрязнены радиоактивными веществами, ионами тяжелых металлов, ядовитыми веществами и патогенными микробами. В ходе работ сточные воды, загрязненные ионами тяжелых металлов Cd ²⁺ , Pb ²⁺ , обрабатывались природным цеолитным материалом. Механизм очистки воды от ионов металлов основан на пористой структуре и адсорбционной способности цеолита. Ионы тяжелых металлов диффундируют в поры цеолитного материала, вытесняя ионы натрия, которые являются модификаторами структуры. Процесс обработки цеолита проводился путем измерения проницаемости сточных вод с помощью кондуктометра и сравнения его результатов со значением проницаемости дистиллированной воды. Согласно полученным результатам, с помощью этого метода можно полностью очистить сточные воды от ионов тяжелых металлов.
	Ключевые слова: Сточные воды, очистка, сорбенты, ионы, цеолит.
	Информация об авторах:
Мырзалиева С.К.	<i>Доктор химических наук, профессор, начальник отдела подготовки научных кадров РГП «НЦ КПМС РК», г. Алматы, Казахстан, e-mail: saulekerchaiz@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2997-0716</i>
Галех Нур Индриатно Путра Пратама	<i>Преподаватель кафедры гражданского инженерного образования и планирования инженерного факультета Джогьякартского государственного университета, адрес: Jl. Коломбо № 1, Каранг Маланг, Чатуртунгал, Депок, Слеман, Даэра Истимева, Джогьякарта, Индонезия. Электронная почта: galeh@uny.ac.id, ORCID ID: 0000-0002-4107-9814</i>
Хамидулла А.Г.	<i>Магистрант кафедры технологии металлов и минералов химико-технологического факультета Казахского национального университета имени аль-Фараби, созданная на базе РГП «Национальный центр комплексной переработки минерального сырья Республики Казахстан», г. Алматы, Казахстан. Email: aikahami98@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7871-7971</i>

Литература

- [1] Мырзалиева С.К. (2019). Эффективная очистка сточных вод, загрязненных нефтью и нефтепродуктами с использованием карбонизированных растительных отходов // *Труды X Международного Беремжановского съезда по химии и химической технологии, «КазНУ им. аль-Фараби», 2019, 229.*
- [2] Алексеев А.И., Алексеев А.А. Химия воды // Химиздат, 2007. – 1 книга – 424, 2 книга – 456.
- [3] Тарасевич Ю.И. Природные цеолиты в процессах очистки воды // *Химия и технология воды. 1988. Т.10. №3, 210-*

218.

- [4] Abdikerim B.E., Kenzhaliyev B.K., Surkova T.Yu., Didik N., Berkinbayeva A.N., Dosymbayeva Z.D., Umirbekova N.S. Uranium extraction with modified sorbents. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. 2020. № 3 (314), pp. 84-90. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.30>
- [5] Смыков В.В., Смыков Ю.В., Ториков А.И. О проблеме утилизации нефтесодержащих отходов // *Нефтяное хозяйство*. 2015, №3, 30-33.
- [6] Aliev S. B., Omarbekov Ye.U. Technological improvement of the scheme unit reception and distribution of solution under conditions of high-pressure nature of groundwater. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. 2021. №1(316), pp. 40-45. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.05>
- [7] Наривский А. Э., Субботин С. А., Беликов С. Б., ЯР-Мухамедова Г. Ш., Кемелжанова А. Е. AISI304 болаттың химиялық құрамы мен оның құрылымдық гетерогендігі және айналым сулардың параметрлерінің пittingке тұрақтылығына әсері // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a*. – 2019. – №2. – С. 24-33. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.13>

Reference

- [1] Myrzaliyeva S.K. Effektivnaya ochildka stochnykh vod. zagryaznennykh neftyu i nefteproduktami s ispolzovaniyem karbonizirovannykh rastitelnykh otkhodov [Efficient treatment of wastewater contaminated with oil and petroleum products using carbonized plant waste]. *Trudy X Mezhdunarodnogo Beremzhanovskogo syezda po khimii i khimicheskoy tekhnologii*. «KazNU im. al-Farabi». 2019, 229. (In Russian).
- [2] Alekseyev A.I., Alekseyev A.A. Khimiya vody [Water Chemistry]. Khimizdat. 2007. – 1 kniga – 424 s.. 2 kniga – 456 s. (In Russian).
- [3] Tarasevich Yu.I. Prirodnyye tseolity v protsessakh ochildki vody [Natural zeolites in water treatment processes]. *Khimiya i tekhnologiya vody*. 1988. T.10. №3, 210-218. (In Russian).
- [4] Abdikerim B.E., Kenzhaliyev B.K., Surkova T.Yu., Didik N., Berkinbayeva A.N., Dosymbayeva Z.D., Umirbekova N.S. Uranium extraction with modified sorbents. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. 2020. № 3 (314), pp. 84-90. (In Eng.). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.30>
- [5] Smykov V.V., Smykov Yu.V., Torikov A.I. O probleme utilizatsii neftesoderzhashchikh otkhodov [On the problem of oil-containing waste disposal]. *Neftyanoye khozyaystvo*. 2015. №3. 30-33. (In Russian).
- [6] Aliev S. B., Omarbekov Ye.U. Technological improvement of the scheme unit reception and distribution of solution under conditions of high-pressure nature of groundwater. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*. 2021. №1(316), pp. 40-45. (In Eng.). <https://doi.org/10.31643/2021/6445.05>
- [7] Narivskiy A. E. Subbotin S. A., Belikov S. B. AISI304 bolattıñ ximiyalıq quramı men onıñ qurılımdıq geterogendigi jäne aynalımsulardıñ parametrleriniñ pittingke turaqtılıǵına äseri [Influence of circulating waters' parameters, chemical composition and structural heterogeneity of aisi304 steel on its pitting resistance] // *Kompleksnoye Ispolzovaniye Mineralnogo Syria*. №2.2019. 24-33. (In Kazakh). <https://doi.org/10.31643/2019/6445.13>



ӨЖ 528.482.5

DOI: 10.31643/2021/6445.20



FTAMP 36.01.11

Geodetic monitoring of deformations of engineering structures

¹Urazbaev G.M., ^{1*}Altayeva A.A., ¹Kozhayev Zh.T., ²Mustafin M.G.

¹Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan

²Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author email: a.aselya_92@mail.ru

ABSTRACT

Unfortunately, all kinds of anthropogenic and natural factors contribute to the deformation of man-made structures. Geodetic control of buildings and structures, timely detection and elimination of deformations is a guarantee of long-term operation of the building. Monitoring is one of the most important tools to ensure the reliability and safety of multi-storey and large-scale buildings and structures during construction and operation. A significant amount of instrumental control during construction and operation is carried out by geodetic methods. Geodetic methods are used to determine both local and general deformations of buildings and structures, deviations of load-bearing, fencing structures from vertical and design drawings, foundations and soil settlements, through which the technical condition of the building or structure is specially assessed. Today, the analysis of deformations is an important task for every region of our country, especially for areas with changes in the earth's surface. The field of deformation research in the Republic of Kazakhstan is quite developed and there are many necessary materials to identify such changes. In our country, special services are organized to control any benchmarks and analyze the results of high-precision measurements in several cycles to detect any changes on the earth's surface. Therefore, this article provides an overview of both the classical methods of geodetic control and the tools and technologies used to determine the quantitative characteristics of the deformation of engineering objects.

Keywords: monitoring, geodetic control, deformation, GNSS, laser scanning, electronic total station, digital leveling.

Received: 22 March 2021

Peer reviewed: 21 April 2021

Accepted: 14 June 2021

Information about authors:

Urazbayev Galymzhan Mahambetaliuly

Master student, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan, ORCID ID: 0000-0002-8098-0816, email: galymzhan_urazbaev@mail.ru

Altayeva Assel Abdikerimkyzy

PhD student, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan, ORCID ID: 0000-0002-1675-6828, email: a.aselya_92@mail.ru

Kozhayev Zhenis Tursynaliyevich

Doctor PhD, Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan, ORCID ID: 0000-0002-9976-9375, email: zh.kozhayev@satbayev.university

Mustafin Murat Gazizevich

Doctor of technical science, professor, head of the Department of Engineering Geodesy, 2Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation. ORCID ID: 0000-0001-9416-2358

Инженерлік құрылыстардың деформацияларының геодезиялық мониторингі

¹Уразбаев F.M., ^{1*}Алтаева A.A., ¹Қожаев Ж.Т., ²Мустафин M.Г.

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

² Санкт-Петербург тау-кен ісі университеті, Санкт-Петербург, Ресей

* Автордың электрондық поштасы: a.aselya_92@mail.ru

ТҮЙІНДЕМЕ

Өкінішке орай, антропогендік және табиғи факторлардың барлық түрлері техногендік құрылымдардың деформация әсеріне ұшырауына ықпал етеді. Ғимараттар мен құрылыстарды геодезиялық бақылау, деформацияларды уақтылы анықтау және оларды жою ғимараттың ұзақ мерзімді жұмысының кепілі. Мониторинг - бұл көп қабатты және ауқымды ғимараттар мен құрылыстарды салу және пайдалану кезінде олардың сенімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз

Алынған: 22 наурыз 2021
 Сараптама жасалды: 21 сәуір 2021
 Қабылданған: 14 маусым 2021

ететін маңызды құралдардың бірі. Құрылыс және пайдалану кезеңінде аспаптық бақылаудың едәуір мөлшері геодезиялық әдістермен жүзеге асырылады. Геодезиялық әдістер ғимараттар мен құрылыстардың локалдық және жалпы деформацияларын, жүк көтергіш, қоршау құрылымдарының тік және жобалық сызбалардан, іргетастар мен топырақтардың қоныстарынан ауытқуларын анықтау үшін қолданылады, олар арқылы ғимараттың немесе құрылыстың техникалық жағдайы арнайы бағаланады. Қазіргі таңда деформацияларды талдау біздің еліміздің әр аймағы үшін, әсіресе жер бетінің өзгеруі байқалатын аумақтар үшін маңызды міндет болып табылады. Қазақстан Республикасында деформацияны зерттеу саласы жеткілікті дамыған және мұндай өзгерістерді анықтау үшін көптеген қажетті материалдар бар. Біздің елімізде жер бетіндегі кез-келген өзгерістерді анықтау үшін барлық реперлік нүктелерді басқаратын және бірнеше циклдегі жоғары дәлдіктегі өлшеу нәтижелеріне талдау жасайтын арнайы қызметтер ұйымдастырылған. Сондықтан, бұл мақалада геодезиялық бақылаудың классикалық әдістеріне, инженерлік объектілердің деформацияларының сандық сипаттамаларын анықтау үшін қолданылатын құралдар мен технологияларға шолу жасалады.

Түйін сөздер: мониторинг, геодезиялық бақылау, деформация, ГНСС, лазерлік сканерлеу, электрондық тахеометр, цифрлық нивелирлеу.

Авторлар туралы ақпарат:

Уразбаев Ғалымжан Махамбеталиұлы	магистрант, Сәтбаев атындағы университет, Алматы, Қазақстан. ORCID ID: 0000-0002-8098-0816, email: galymzhan_urazbaev@mail.ru
Altayeva Assel Abdikerimkyzy	Докторант, Сәтбаев атындағы университет, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: 0000-0002-1675-6828, email: a.aselya_92@mail.ru
Kozhayev Zhenis Tursynalievich	PhD доктор, Сәтбаев атындағы университет, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: 0000-0002-9976-9375, email: zh.kozhayev@satbayev.university
Mustafin Murat Gazizevich	д.т.н., профессор, Инженерлік геодезия кафедрасының меңгерушісі, Санкт-Петербург тау-кен ісі университеті, Санкт-Петербург, Ресей. ORCID ID: 0000-0001-9416-2358

Кіріспе

Қазіргі уақытта құрылыс объектілерінің беріктігі, пайдалану сенімділігі және қауіпсіздігі проблемасы ерекше маңызға ие және кезек күттірмейтін міндеттердің біріне айналууда. Пайдалану ресурсының мерзімінен бұрын тозуына және олардың беріктігін төмендетуге әкелетін құрылыс құрылымдарындағы ақаулар ғимарат пен құрылысты салу мен пайдаланудың әр түрлі кезеңдерінде пайда болады.

Құрылыстардағы ақаулардың пайда болу себептерінің бірі - ғимарат іргетасының әр түрлі деформациясы. Іргетас жобалық позициядан жылжыған кезде барлық құрылыстық элементтердің жұмыс істеу сипаты өзгереді, бұл жобалық схеманың өзгеруіне және сәйкесінше құрылыстың әр түрлі секцияларының асқын кернеуіне әкеледі. Сондықтан ғимарат салу кезеңінде топырақтың тік және көлденең деформацияларын, сонымен қатар құрылыстық элементтердің тік оське қатысты жылжуын қадағалау маңызды [1, 2].

Бұл мақаланың мақсаты - инженерлік құрылыстардың деформациясын бақылаудың негізгі геодезиялық әдістерін қарастыру және тиімдісін таңдау.

Қазіргі уақытта мониторинг кезінде жүргізілетін геодезиялық жұмыстарды жүргізу бақылау элементтерінің ерекшеліктері мен оларды басқарудың аппараттық базасын көрсетпей, жалпы түрде ұсынылған қолданыстағы нормативтік әдебиеттердің позицияларына сәйкес жүзеге асырылады. Мұның басты себебі - объектілердің деформациясын бақылау бойынша тиімді шараларды жүргізу үшін бірыңғай әдістеме мен мамандандырылған сериялық жабдықтың болмауы.

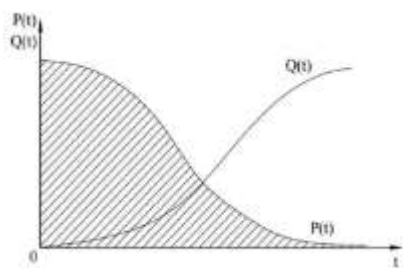
Геодезиялық мониторингтің бірыңғай әдістемесін жасауға байланысты проблеманы шешуге М.Е. Пискунов, А.К. Зайцев, С.В. Марфенко, Д.Ш. Михелев, М.Г. Мустафин, В.А. Вальков, X. Zhang, E.S. Okiemute, O.F. Olujimi, J. Janicka, W. Błaszczak-Вақ сияқты авторлар елеулі үлес қосты [3-6]. Келтірілген авторлардың еңбектерінде бақылау әдістерін жасауға және оларды негіздеуге көп көңіл бөлінеді [7, 8]. В.А.Герасимовтың, В.Я.Лобазовтың, Б.Е.Резниктің басылымдарында жаңа мониторинг тұжырымдамалары ұсынылып, шетелдік тәжірибеге сүйене отырып үздіксіз бақылау әдісін қолдануды ұсынады. Мониторинг мәселесіне классикалық бақылау әдістерінен осы тәсілдің басты айырмашылығы оның «потенциалды

Эксперименталдық бөлім

үздіксіздігі» ғана емес, сонымен қатар оның мақсаты жатады: классикалық бақылау дегеніміз - нәтижесінде анықталған критикалық мәндерден таңдалған геометриялық параметрлердің ауытқуын байқау, теориялық есептеулер; үздіксіз бақылау дегеніміз - уақыттың әртүрлі кезеңдеріндегі құрылыстардың күйлерін салыстыру [9].

Ғимараттар мен құрылыстарды салу және пайдалану кезінде жинақталған тәжірибе құрылымдардың зақымдануы әр түрлі себептерден болуы мүмкін екенін көрсетеді. Жобалау мен құрылыс процесінде жіберілген қателіктер мен ақаулардың болуы ең қауіпті себептердің бірі болып табылады, олардың болуы қазіргіден төмен жүктемелерде де апатқа әкелуі мүмкін. Кездейсоқ апаттық сипаттағы себептер (табиғи және техногендік апаттар) жеке топқа бөлінеді.

Тізімде көрсетілген әсерлер төтенше жағдайға тікелей әкеп соқтырмаса да, жалпы алғанда, зақымданудың жинақталуымен құрылым құрылымдарының сенімділігі төмендейді, бұл өз кезегінде апаттық жағдайдың бұзылу ықтималдығын арттырады. Бұл дегеніміз, объект конструкцияларының нормативтік жағдайын қалпына келтіру бойынша жұмыстарды істен шығу ықтималдығы құрылым конструкцияларының сенімділік көрсеткішінен жоғары болғанға дейін экономикалық тұрғыдан қабылдаған жөн 1-сурет.



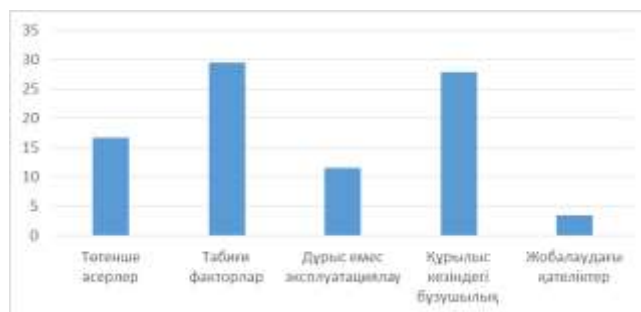
Сурет 1 - Конструкция сенімділігінің (P) және істен шығу ықтималдығының (Q) объектіні пайдалану уақытынан тәуелділігі (t)

Автоматтандырылған мониторинг - объектінің деформациясын бақылаудың тұрақты жұмыс істейтін автоматтандырылған жүйелерін пайдалануға негізделген. Ол жаңа озық технологияларды қолдануға негізделген, мысалы: талшықты-оптикалық өлшеу жүйелері немесе шетелдік «Structural Health Monitoring» (SHM), сөзбе-сөз аударма «денсаулықтың

құрылымдық мониторингі» немесе құрылымның күйін бақылау [8].

Мерзімді мониторинг - бұл мамандандырылған тексеру, оның негізгі міндеті визуалды және аспаптық бақылау көмегімен құрылыс конструкцияларының өзгерістерін анықтау болып табылады. Мерзімді мониторинг - бүгінгі күні автоматтандырылған мониторингке қарағанда шығыны аз іс-шара болып табылады.

Зерттеу барысында құрылыстардың деформациясына әкелетін негізгі себептер мыналар екендігі анықталды: табиғи типтегі әсерлер, сондай-ақ құрылыс кезіндегі қателіктер, бұл 2-сурет объектінің іргетастық және іргетас конструкцияларының зақымдануын деформациялауға әкеледі.



Сурет 2 - Ғимараттар мен құрылыстардың деформация себептерін талдау

Деформациялар табиғатта кеңістіктік екенін атап өткен жөн. Қолданыстағы нормативтік-техникалық құжаттарға сәйкес оларды тік және көлденең қозғалыстарға бөлу дәстүрге айналған. Тік жылжулар өз кезегінде шөгу, көтерілу және т.б.

Құрылыстардың тік жылжуларын бақылаудың негізгі әдістері нивелирлеу әдістері, электронды тахеометрлер, радар интерферометриясы, GNSS, сондай-ақ фото және стереофотограмметриялық әдістер болып табылады.

Геометриялық нивелирлеу.

Құрылыстардың шөгуін анықтау үшін жоғары дәлдік пен өлшеу жылдамдығы бар геометриялық нивелирлеу әдісі кеңінен қолданылады. 5-10 м қашықтықта нүктелер арасындағы биіктік айырымын 0,05-0,1 мм дейінгі дәлдікпен, ал жүздеген метр қашықтықта - 0,5 мм дейінгі дәлдікпен айқындауға болады.

Электрондық тахеометрлер және цифрлық нивелирлер.

Тахеометрдің жұмыс принципі шағылысатын нысанадан тар бағытталған лазерлік сәуленің шағылысуына және оған дейінгі қашықтықты өлшеуге негізделген. Жалпы жағдайда шағылыстырғыш-бұл объектінің бетіне бекітілген арнайы призма. Екі бұрышты (тік және көлденең) өлшеу шағылысу нүктесінің үш өлшемді кеңістіктік координаттарын есептеуге мүмкіндік береді. Қазіргі электрондық тахеометрлер шартты түрде үш топқа бөлуге болады: ең қарапайым, әмбебап және роботталған.

Лазерлік сканерлеу.

Лазерлік сканерлеу - бұл кеңістіктік координаттары бар нүктелер жиынтығымен таныстыру арқылы қоршаған кеңістіктің сандық моделін құру әдісі. Өлшеулерден кейін алынған объект моделі бірнеше миллиметр дәлдікпен координаттары бар алып нүктелер жиынтығы (жүздеген мыңнан бірнеше миллионға дейін). Лазерлік сканерлеу технологиясының мәні [9, 10] объектінің беткі нүктелерінің кеңістіктік координаттарын анықтау болып табылады. Бұл лазерлік шағылыспайтын диапазонды өлшегіш көмегімен барлық анықталған нүктелерге дейінгі қашықтықты өлшеу арқылы жүзеге асырылады [11].

Сканердің нәтижесі-есептелген үш өлшемді координаттары бар көптеген нүктелер. Мұндай нүктелер жиынтығы әдетте нүктелер бұлттары немесе скандар деп аталады. Әдетте бір бұлттағы нүктелер саны бірнеше жүз мыңнан бірнеше миллионға дейін өзгеруі мүмкін.

Лазерлік сканерлеу бойынша жұмыстарды жүргізу кезектілігі 3-суретте көрсетілген.



Сурет 3 - Лазерлік сканерлеу бойынша жұмыстарды жүргізу кезектілігі

ГНСС қолдану арқылы объектілерді мониторингі.

Ғаламдық навигациялық жерсеріктік жүйе (ҒНЖЖ) – бұл жерсеріктік сигналдарды өңдеу арқылы жер бетінің кез келген нүктесінде координаттарды алуға болатын жүйе. Кез-келген GNSS үш сегменттен тұрады: ғарыштық, жер үсті және пайдаланушы.

Навигациялық спутниктерді бақылау бойынша координаттарды анықтау келесі әдістермен жүргізілуі мүмкін [12]: абсолюттік; дифференциалды, салыстырмалы.

Горизонталь жылжулар мен қисаюларды анықтау әдістері.

Құрылыс нүктелерінің горизонталь жылжуы бір координаттар жүйесінде әртүрлі өлшеу циклдарында алынған олардың координаттарының айырмашылығы ретінде анықталады. Деформация шамасын анықтау мәселесін шешудің екі түрі бар: екі координат немесе бір координат бойынша [13]. Бірінші жағдайда нүктелердің координаталарын анықтау үшін сызықтық-бұрыштық өлшеулер, екінші жағдайда тірек нүктелері қолданылады.

Сызықтық-бұрыштық өлшеулер арнайы триангуляция және трилатерация желілері, полигонометрия жүрістері, аралас желілер, бұрыштық және сызықтық қиыстырулар, өлшенген бағыттар мен биіктіктері бар ұзартылған үшбұрыштардан жасалған желілер түрінде жасалады [14, 15].

Деформацияны бақылаудың аталған әдістері дәстүрлі болып табылады және мерзімді мониторинг кезінде практикада жиі қолданылады. Бұл әдістердің артықшылықтары мен кемшіліктері 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1 - Объектілердің деформациясын бақылау тәсілдерінің артықшылықтары мен кемшіліктері

Бақылау түрі	Дәлдігі	Үнемділік	Тиімділік	Нәтижелерді өңдеудің қарапайымдылығы
Геометриялық нивелирлеу	+	-	-	+
Фотограмметриялық бақылау әдістері	-	+	-	-
Лазерлік сканерлеу	+	+	+	+
Электрондық тахеометрлер	+	-	-	+
Ғаламдық навигациялық	-	+	+	-

жерсеріктік жүйе				
---------------------	--	--	--	--

Жоғарыда көрсетілген 1-кестені зерттеп, лазерлік сканерлеу әдісінің артықшылығы басым екеніне көз жеткізілді. Сонымен қатар, лазерлік сканерлеу әдісі түсірудің жоғары жылдамдығы, түсірілім деректерін нақтылау және толықтығы, қауіпсіздік, уақыт пен еңбекті үнемдеу сияқты көрсеткіштермен сипатталады. Осы себептен ғимараттар мен құрылыстардың деформациясын зерттеуде лазерлік сканерлеу әдісі таңдалды.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Тұрғын үй кешенінің деформацияларын геодезиялық бақылау үшін «Хан-Тәңірі» ірі тұрғын үй кешені таңдалды.

«Хан-Тәңірі» ірі тұрғын үй кешені Алматы қаласындағы Іле Алатауының етегіндегі әдемі жерде, әл-Фараби даңғылынан 3,5 км қашықтықта орналасқан (4-сурет).



Сурет 4 - «Хан-Тәңірі» тұрғын үй кешенінің жалпы көрінісі

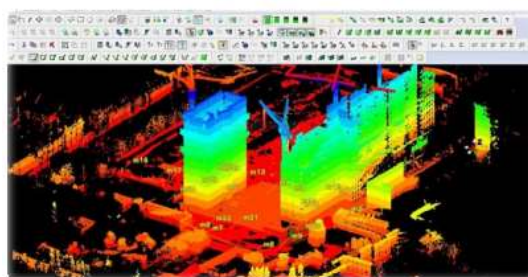
Хан Тәңірі тұрғын үй кешенінің деформацияларына геодезиялық мониторинг жердегі лазерлік сканерлеу әдісімен жүргізілді. Мониторинг төрт айлық мерзімділікпен екі кезеңде жүргізілді. Бірінші кезең - объектіні лазерлік сканерлеу, нөлдік өлшеу циклі деп аталады. Сканерлеу үшін Leica C10 жердегі лазерлік сканер қолданылды. Жұмыстың басы сканер станциясының орналасуын және қосылатын белгілердің орналасуын жоспарлау үшін объектіні және оған іргелес аумақты визуалды тексеру болды. Біздің жағдайда сканерлеу екі посттан өтті, тоғыз байланыстырушы белгі болды.

Белгі - бұл 100x100 мм және одан да көп өлшемдері бар, арнайы шағылыстыратын жабыны бар нысана. Сканердің екі тірегі үшін кем дегенде 4 жалпы белгі қажет. Белгілердің

орналасуы әр бекеттен қол жетімді болатындай болуы керек.

Әр станцияда сканерлеу: сканерді орнату, оны тегістеу, тестілеу, қажет болған жағдайда панорамалық фотосурет жасау, сканерлеу және маркаларды тану. Бір станцияда сканерлеу 30 минуттан екі сағатқа дейін созылады, сканерлеу уақыты берілген дискреттілікке және сканерлеу аймағына байланысты. Біз 5x5 см ажыратымдылықты орнаттық, нысан туралы толығырақ ақпарат алу үшін сканерлеу аймағы 360°x270°болды.

Лазерлік сканерлеудің нәтижесі 5-суретте көрсетілген нүктелік бұлттар болып табылады. Жұмысты орындау үшін пайдаланылатын сканер секундына 50 000-ға дейін өлшенген нүктелерді алуға мүмкіндік береді. Сканердің дәлдігі 4 мм-ге дейін, идеалды жағдайда 100 метр қашықтықта. Максималды қашықтық сканерленген объектінің шағылысу қабілетіне байланысты және 300 метрге жетеді. Сканерлеуден кейін сканердің екі станциясынан алынған нүктелердің бұлттары объектіні тексерудің максималды сапасын алу үшін тігіледі. Тігу байланыстырушы белгілерге сәйкес жүзеге асырылады. Лазерлік сканерлеудің ыңғайлылығы - әрбір сканерленген нүкте үшін координаттарды кез-келген жүйеде орнатуға болатындығы. Берілген нүктелерден координаттар GPS көмегімен анықталды. Лазерлік сканерлеудің тағы бір басымдығы - бұл объект үшін сканерлеу қай жерде және қай нүктеден жүзеге асырылатыны маңызды емес, сондықтан сканердің геодезиялық сілтемесі қажет емес және жетуге қиын жерлерді сканерлеуге болады.

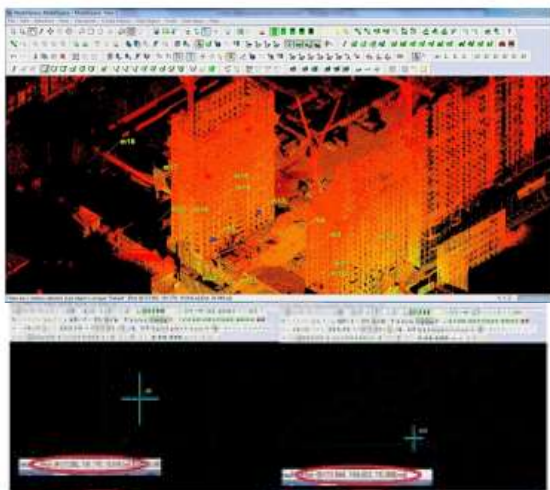


Сурет 5 – Сканерлеу кезінде алынған нүктелік бұлт

Нысанды сканерлегеннен кейін, құрылғыдан алынған деректер "Cyclone" бағдарламалық жасақтамаға жіберіледі, ол нүктелер бұлттарын өңдеуге, объектілерді модельдеуге және бірқатар қолданбалы есептерді шешуге

мүмкіндік береді. Біз алғашқы нәтижелерді алғашқы сауалнаманың мәліметтерін өңдегеннен кейін алдық. Бастапқыда біз құрылыс кезінде ауытқулар болған-болмағанын анықтадық. Нүктелер массивін өңдегеннен кейін ғимараттың едендік жоспары салынды және оның тік шекаралары бойынша бірінші және жиырмасыншы қабаттың деңгейі ғимараттың төрт бұрышына сәйкес 5, 10, 3, 3 мм-ге бөлінетіні талданды. Spір 3.03.01-87 "Жүк көтергіш және қоршау конструкциялары" ішінен жүк көтергіш қабырғалардың тігінен ауытқуының рұқсат етілген нормалары 20 мм-ден аспауы керек.

Екінші тапсырма бойынша - шөгү жылдамдығын анықтау үшін ғимаратты алғашқы сканерлеу кезінде біз оған байланыстырушы белгілерді бекітіп, олардың координаттарын анықтадық. Осылайша, объектіні кейінгі зерттеу кезінде олардың орын ауыстыруларын координаттар бойынша бақылауға мүмкіндік туды. Нәтижелерді 6-суреттен көруге болады.



Сурет 6 - Сканерлеу нәтижесінде алынған маркалардың координаттары (қараша)

Объектіге орнатылатын және тәулігіне 24 сағат аптасына 7 күн болатын жағдайдың деректерін түсіретін және жіберетін тұрақты мониторинг жүйелерінен айырмашылығы, мерзімді мониторингтің мәні объектіні сканерлеуді және белгілі бір уақыт аралығында бірнеше циклмен деректерді өңдеуді қамтиды, күрделі қондырғылар қажет емес. Екі жағдайда да оң және теріс жақтары бар, біздің жағдайда мониторингтің екінші әдісін қолдану ұтымды шешім болды.

Біздің жұмысымыздың екінші кезеңі объектіні алғашқы сканерлегеннен кейін төрт айдан кейін зерттеу болды. Өлшеудің екінші

циклінде екі сканерлеу станциясы және тоғыз байланыстырушы белгі орнатылды. Байланыстыру (бағдарлау) салынып жатқан объектінің сыртында тұрақты бекітілген белгілер бойынша өлшеу арқылы жүзеге асырылды. Екінші сканерлеу кезінде алынған деректер де өңделді. Барлық қажетті нүктелердің координаттары анықталды, олар 7-суретте көрсетілген.



Сурет 7 - Сканерлеу нәтижесінде алынған маркалар координаттары (ақпан)

Алынған екі нәтижені талдай отырып, біз белгілеріміздің координаттар бойымен жылжуын анықтай алдық және сәйкесінше ғимарат шөгүі болған-болмағанын талдадық. Нәтижелер 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2 - Ғимараттың ықтимал деформациясы мен шөгүін анықтау үшін сканерлеу нәтижелерін талдау

Марка	X	Y	Z	Маркалар арасыдағы арақашықтық
Сканерлеу деректері (қараша)				
m5	73.582	181.770	15.016	26.949
m13	73.584	154.823	15.358	
Сканерлеу деректері (ақпан)				
m5	73.586	181.769	15.011	26.950
m13	73.588	154.821	15.347	

Осылайша, m5 белгісі 5 мм биіктікке, ал m13 11 мм-ге жылжығанын көреміз. Бұл ғимараттың екі көтергіш қабырға бойымен біркелкі емес орналасуы туралы сигнал береді. Алайда, құрылыс нормалары мен ережелерінен ҚНЖЕ 2.02.01-83* «Ғимараттар мен құрылыстардың іргетастары» ғимараттардың іргетастарын отырғызудың рұқсат етілген нормалары 10 см құрайды. Осыдан қарастырылып отырған объект қолданыстағы нормалар мен ережелерге сәйкес

қолайлы шектерде болады деп қорытынды жасауға болады.

Қорытынды

Геодезиялық қызмет көрсету қазіргі уақытта құрылыс өндірісінің ажырамас және ең жауапты бөлігі болып табылады. Тұрғын үй кешендерін салу кезінде геодезиялық жұмыстарды өлшеу мен орындаудың жаңа әдістемелерінің пайда болуы еңбек өнімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік берді.

Осылайша, негізгі нәтижелерді келесідей тұжырымдауға болады:

1. Құрылыстардың деформациясының себептері анықталды. Құрылыс объектілерін салу және пайдалану бойынша жинақталған

тәжірибені жүйелеу арқылы деформация себептерінің төрт негізгі тобын бөлуге болады:

1. Сыртқы техногендік және табиғи әсерлер;
2. Пайдаланудың жоспарлы шарттарының өзгеруі;
3. Техникалық қателер және технологиялық ақаулар;
4. Төтенше әсерлер.

Деформацияларды бақылаудың оңтайлы геодезиялық әдістері бақылаудың көпшілігінде қолданылады. Алайда, ұсынылған әдістер талаптарға сәйкес келмейтін, жұмыстың жоғары, дәл жылдамдығын талап ететін жұмыс жағдайында бақылаудың басқа әдістерін қолдану бұл жағдайлар тапсырыс берушінің мақсаттарына байланысты және экономикалық қауіпсіздікпен анықталады.

Осы мақалаға сілтеме: Уразбаев Г.М., Алтаева А.А., Кожаяев Ж.Т., Мустафин М.Г. Инженерлік құрылыстардың деформацияларының геодезиялық мониторингі // *Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu..* – 2021. – №. 2 (317), -б. 69-77. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.20>

Cite this article as: Urazbaev G.M., Altayeva A.A., Kozhayev Zh.T., Mustafin M.G. (2021). Geodetic monitoring of deformations of engineering structures // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* Vol. 317, Issue 2, -p. 69-77. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.20>

Геодезический мониторинг за деформациями инженерных сооружений

¹Уразбаев Г.М., ^{1*}Алтаева А.А., ¹Кожаяев Ж.Т., ²Мустафин М.Г.

¹ Satbayev University, Алматы, Казахстан

² Санкт-Петербург тау-кен ісі университеті, Санкт-Петербург, Ресей

* Электронная почта автора: a.aselya_92@mail.ru

АННОТАЦИЯ

К сожалению, всевозможные внешние факторы, как антропогенного, так и природного характера способствуют тому, что все рукотворные сооружения подвергаются деформационным воздействиям. Геодезический мониторинг зданий и сооружений, своевременное выявление деформаций и их устранение — это залог долгой эксплуатации здания. Мониторинг - один из важнейших инструментов обеспечения надежности и безопасности многоэтажных и крупномасштабных зданий и сооружений при строительстве и эксплуатации. Значительный объем инструментального контроля при строительстве и эксплуатации осуществляется геодезическими методами. Геодезические методы используются для определения как локальных, так и общих деформаций зданий и сооружений, отклонений несущих, ограждающих конструкций от вертикальных и проектных чертежей, фундаментов и осадки грунтов, по которым специально оценивается техническое состояние здания или сооружения. Сегодня анализ деформаций - важная задача для каждого региона нашей страны, особенно для участков с изменениями земной поверхности. Область исследования деформаций в Республике Казахстан достаточно развита и есть много необходимых материалов для выявления таких изменений. В нашей стране организованы

Поступила: 22 марта 2021

Рецензирование: 21 апреля 2021

Принята в печать: 14 июня 2021

специальные службы для управления любыми реперными точками и анализа результатов высокоточных измерений в несколько циклов для выявления любых изменений на земной поверхности. Поэтому в данной статье представлен обзор классических методов геодезического контроля, а также инструментов и технологий, используемых для определения количественных характеристик деформаций инженерных объектов.

Ключевые слова: мониторинг, геодезический контроль, деформация, GNSS, лазерное сканирование, электронный тахеометр, цифровое нивелирование.

Информация об авторах:

Уразбаев Ғалымжан Махамбеталиұлы	магистрант, Сатбаев Университет, Алматы, Казакстан. ORCID ID: 0000-0002-8098-0816, email: galymzhan_urazbaev@mail.ru
Altayeva Assel Abdikerimkyzy	Докторант, Сатбаев Университет, Алматы, Казакстан, ORCID ID: 0000-0002-1675-6828, email: a.aselya_92@mail.ru
Kozhayev Zhenis Tursynalievich	PhD доктор, Сатбаев Университет, Алматы, Казакстан, ORCID ID: 0000-0002-9976-9375, email: zh.kozhayev@satbayev.university
Mustafin Murat Gazizevich	д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Инженерная геодезия, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия. ORCID ID: 0000-0001-9416-2358

Әдебиеттер

- [1] Шеховцов, Г.А. (2009). Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений. Н.Новгород, ННГАСУ, 156.
- [2] Герасимов В.А., Лобазов В.Я., Резник Б.Е. (2010). Концепция геодезического мониторинга деформационных процессов. Геопрофи, №1, 17-21. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/10/105004>. 73.
- [3] Mustafin M.G., Valkov V.A., Kazantsev A.I. (2017). Monitoring of deformation processes in buildings and structures in metropolises. Procedia Engineering, Volume 189, 729-736. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.115>.
- [4] Zhang X. (2017). Different monitoring methods for building deformation of practical exploration. Journal of Physics: Conf. Series 910, 012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/910/1/012029>.
- [5] Xu Y.L., Chen B, Ng CL, Wong KY, Chan WY. (2010). Monitoring temperature effect on a long suspension bridge. Struct Control Hlth, 17, 632-53. <https://doi.org/10.1002/stc.340>.
- [6] Okiemute E.S., Olujimi O.F. (2018). Monitoring and analysis of vertical and horizontal deformations of a large structure using conventional geodetic techniques. Journal of Environment and Earth Science, Vol.8, № 12,. 52-61. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2529964>.
- [7] Baltiyeva A. A., Raskaliyaev A. S., Samsonenko A. I., Shamganova L. S., Fan H. (2020). Development of the software and technical complex of the high-precision satellite positioning system in the conditions of open pit mining processes. Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo syr'â/Complex Use of Mineral Resources/Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu, 4 (315), p. 42-48. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.35>.
- [8] Janicka J., Błaszczak-Bąk W., Rapinski J., Suchocki C. (2020). Application of the msplit estimation method in the detection and dimensioning of the displacement of adjacent planes. Remote Sensing, 12(19), 1-17. <https://doi.org/10.3390/rs12193203>.
- [9] Hayakawa Y., Kusumoto Sh., Matta N. (2016). Application of terrestrial laser scanning for detection of ground surface deformation in small mud volcano. Hayakawa et al. Earth, Planets and Space, 68:114. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0495-0>.
- [10] Lienhart W. (2017). Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners: critical aspects and solutions. Journal of Civil Structural Health Monitoring volume 7, 315–324. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0228-5>.
- [11] Kovanič, L.; Blistan, P.; Urban, R.; Štroner, M.; Pukanská, K.; Bartoš, K.; Palková, J. (2020). Analytical determination of geometric parameters of the rotary kiln by novel approach of TLS point cloud segmentation, 10, 7652.
- [12] Yuwono B.D., Prasetyo Y. (2019). Analysis deformation monitoring techniques using GNSS survey and terrestrial survey. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 313, 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/313/1/012045>.
- [13] Sedlak V. (2015). Some specific procedures in solving the deformation vector for mining undermined areas. Journal of materials and engineering structures, 2, 99–110.
- [14] Жуков Б.Н., Карпик А.П. (2003). Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов. Новосибирск, СГГА, 356. <https://doi.org/10.5862/MCE.46.6>.
- [15] Luccio M. (2002). The concrete and the clay: monitoring large structure deformation. GPS World, Vol. 13, No. 8, 16. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.115>.

Reference

- [1] Şehovsov, G.A. (2009). *Sovremennyye geodezicheskie metody opredeleniya deformatsii inzhenernykh sooruzhenii* [Modern geodetic methods for determining the deformations of engineering structures]. N. Novgorod, NNGASU, 156. (in Russ).
- [2] Gerasimov V.A, Lobazov V.Я., Reznik B.E. (2010). *Konsepsiya geodezicheskogo monitoringa deformatsionnykh processov. Geoprofi* [The concept of geodetic monitoring of deformation processes], №1, 17-21. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/10/105004>. 73.(in Russ).
- [3] Mustafin M.G., Valkov V.A., Kazantsev A.I. (2017). *Monitoring of deformation processes in buildings and structures in metropolises. Procedia Engineering*, Volume 189, 729-736. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.115>. (in Eng).
- [4] Zhang X. (2017). *Different monitoring methods for building deformation of practical exploration. Journal of Physics: Conf. Series* 910, 012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/910/1/012029>. (in Eng).
- [5] Xu YL, Chen B, Ng CL, Wong KY, Chan WY. (2010). *Monitoring temperature effect on a long suspension bridge. Struct Control Hlth*, 17, 632-53. <https://doi.org/10.1002/stc.340>. (in Eng).
- [6] Okiemute E.S., Olujimi O.F. (2018). *Monitoring and analysis of vertical and horizontal deformations of a large structure using conventional geodetic techniques. Journal of Environment and Earth Science*, Vol.8, № 12,. 52-61. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2529964>. (in Eng).
- [7] Baltiyeva A. A., Raskaliyaev A. S., Samsonenko A. I., Shamganova L. S., Fan H. (2020). *Development of the software and technical complex of the high-precision satellite positioning system in the conditions of open pit mining processes. Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo syr'â/Complex Use of Mineral Resources/Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*, 4 (315). P. 42-48. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.35>. (in Eng).
- [8] Janicka J., Błaszczak-Bąk W., Rapinski J., Suchocki C. (2020). *Application of the msplit estimation method in the detection and dimensioning of the displacement of adjacent planes. Remote Sensing*, 12(19), 1-17. <https://doi.org/10.3390/rs12193203>. (in Eng).
- [9] Hayakawa Y., Kusumoto Sh., Matta N. (2016). *Application of terrestrial laser scanning for detection of ground surface deformation in small mud volcano. Hayakawa et al. Earth, Planets and Space*, 68:114. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0495-0>. (in Eng).
- [10] Lienhart W. (2017). *Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners: critical aspects and solutions. Journal of Civil Structural Health Monitoring* volume 7, 315–324. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0228-5>. (in Eng).
- [11] Kovanič, L'; Blistan, P.; Urban, R.; Štroner, M.; Pukanská, K.; Bartoš, K.; Palková, J. (2020). *Analytical determination of geometric parameters of the rotary kiln by novel approach of TLS point cloud segmentation*, 10, 7652. (in Eng).
- [12] Yuwono B.D., Prasetyo Y. (2019). *Analysis deformation monitoring techniques using GNSS survey and terrestrial survey. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 313, 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/313/1/012045>. (in Eng).
- [13] Sedlak V. (2015). *Some specific procedures in solving the deformation vector for mining undermined areas. Journal of materials and engineering structures*, 2, 99–110. (in Eng).
- [14] Jukov B.N., Karpik A.P. (2003). *Geodezicheskii kontrol inzhenernykh obektov promyslennykh predpriatii i grajdanskih kompleksov* [Geodetic control of engineering facilities of industrial enterprises and civil complexes]. Novosibirsk, SGGA, 356. <https://doi.org/10.5862/MCE.46.6>. (in Russ).
- [15] Luccio M. (2002). *The concrete and the clay: monitoring large structure deformation. GPS World*, Vol. 13, No. 8, 16. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.115>. (in Eng).



УДК 62-1

DOI: 10.31643/2021/6445.21



МРПТИ 53.49.21

Plasma electrolytic oxidation technology for producing protective coatings of aluminum alloys

¹Yeshmanova G.B., ¹Smagulov D.U., ²Blawert C.

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Helmholtz-Zentrum Hereon, Institute of Surface Science, Geesthacht, Germany

* Corresponding author email: e_gaukhar@mail.ru, g.yeshmanova@satbayev.university

Received: 12 March 2021

Peer reviewed: 04 May 2021

Accepted: 14 June 2021

ABSTRACT

Today, the technology of hardening the surface layers of parts and the creation of protective coatings on the surface with high physical, mechanical and chemical properties is particularly effective. The article reviews the most promising innovative technologies for surface hardening of aluminum alloys – plasma electrolytic oxidation (PEO). Possible conditions and mechanisms for the formation of protective coatings on the surface of aluminum alloys are considered. The influence of the main parameters of PEO processing (electrical parameters, composition and concentration of electrolyte, the influence of alloying elements) on the structure and properties of oxide-ceramic coatings has been studied. The qualitative characteristics of the surface layer of samples and finished products made of aluminum alloys have shown the effectiveness of the PEO technology, which makes it possible to obtain ceramic coatings with high hardness, strength, increased wear and corrosion resistance. Possible areas of application of high-performance technologies for the deposition of protective PEO coatings on the surface of products made of aluminum alloys are proposed.

Keywords: plasma electrolytic oxidation, aluminum alloy, ceramic coatings, corrosion, structure, properties.

Information about authors:

Yeshmanova Gaukhar Bauirzhankyzy

engineer, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, ORCID ID: 0000-0001-8707-8385.

Email: g.yeshmanova@satbayev.university

Smagulov Dauletkhan Uliyialovich

Doctor of Technical Sciences, professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

ORCID ID: 0000-0002-0599-8741. Email: d.smagulov@satbayev.university

Carsten Blawert

PhD, Head of department of Functional Surface, Institute of Surface Science, Helmholtz-Zentrum

Hereon, Geesthacht, Germany, Email: carsten.blawert@hereon.de

Технология плазменного электролитического оксидирования для получения защитных покрытий алюминиевых сплавов

¹Ешманова Г.Б., ¹Смагулов Д.У., ²Блаверт К.

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Центр Гельмгольца Хереон, Институт поверхностных исследований, Гестхacht, Германия

* Электронная почта автора: e_gaukhar@mail.ru, g.yeshmanova@satbayev.university

АННОТАЦИЯ

На сегодняшний день технология упрочнения поверхностных слоев деталей и создание на поверхности защитных покрытий с высокими физико-механическими и химическими свойствами являются особо эффективными. В статье проведен обзор наиболее

Received: 12 марта 2021
Peer reviewed: 04 мая 2021
Accepted: 14 июня 2021

перспективной инновационной технологии поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов – плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). Рассмотрены возможные условия и механизмы формирования защитных покрытий на поверхности алюминиевых сплавов. Изучено влияние основных параметров ПЭО обработки (электрических параметров, состава и концентрации электролита, влияние легирующих элементов) на структуру и свойства оксидно-керамических покрытий. Качественные характеристики поверхностного слоя образцов и готовых изделий из алюминиевых сплавов показали эффективность технологии ПЭО, позволяющим получить керамические покрытия с высокой твердостью, прочностью, повышенной износостойкостью и коррозионностойкостью. Предложены возможные области применения высокоэффективных технологий нанесения защитных покрытий ПЭО на поверхности изделий из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: плазменное электролитическое оксидирование, алюминиевый сплав, керамические покрытия, коррозия, структура, свойства.

Ешманова Гаухар Бауыржанкызы	Информация об авторах: инженер, Satbayev University, Алматы, Казахстан, ORCID ID: 0000-0001-8707-8385. Email: e_gaukhar@mail.ru, g.yeshmanova@satbayev.university
Смагулов Даулетхан Улиялович	д.т.н., профессор, Satbayev University, Алматы, Казахстан, ORCID ID: 0000-0002-0599-8741. Email: d.smagulov@satbayev.university
Карстен Блаверт	pHD, заведующий отделом Функциональных поверхностей, Институт поверхностных исследований, Центр Гельмгольца Хереон, Гестхакт, Германия, Email: carsten.blawert@hereon.de

Введение

Широкое применение легких металлов (Al, Mg, Ti) и сплавов на их основе во многих отраслях промышленности, в транспорте, в судоходстве, в биомедицинских устройствах и в авиакосмической технике, в основном, обусловлено их низкой плотностью и хорошей обрабатываемостью резанием по сравнению с традиционными конструкционными материалами на основе железа. В частности, алюминиевые сплавы благодаря своей высокой удельной прочности, хорошей ударной вязкости, повышенной электрической и теплопроводности, являются одним из самых востребованных материалов во многих отраслях науки и техники. Однако, относительно низкая твердость и износостойкость алюминиевых сплавов значительно ограничивают их применения в современных условиях.

В связи с этим, разработка новых прогрессивных технологий поверхностного упрочнения и нанесения защитных покрытий на поверхности готовых изделий из алюминиевых сплавов имеет большое практическое значение.

Наиболее эффективным методом поверхностного упрочнения легких сплавов, позволяющим модифицировать поверхность и сформировать защитное покрытие, является метод плазменного электролитического

оксидирования (ПЭО). Формируемые при этом оксидно-керамические покрытия обладают высокой твердостью, прочностью, жаростойкостью и диэлектрическими свойствами [1]. ПЭО представляет собой технологию окисления поверхности деталей до состояния тугоплавких оксидов металлов и сплавов под действием искровых микрозарядов (плазмы) в водном растворе электролита.

Метод плазменной электролитической обработки является гибридом традиционного электролиза и процесса атмосферной плазмы и является областью исследований в течение многих лет. Келлог [2] был одним из первых ученых исследовавший и открывший путь к дальнейшему познанию данной технологии. Позже, Ерохин А.Л. и соавт. [3] провели значительную работу в этой области, исследуя фазообразование в ПЭО покрытиях и сформировав теоретическую модель, которая подходит для оценки фазы покрытия на стадии проектирования ПЭО. Ключевой определяющей характеристикой технологии ПЭО является многократное образование плазменных микрозарядов на поверхности образца, в котором металл подложки преобразовывается в оксид. Несмотря на сложность электрохимических и плазменных процессов, протекающих при ПЭО, многие исследователи,

ориентируясь на характер искрового разряда, предлагали разные механизмы моделей процесса возникновения плазменных микроарядов, где отмечается значительное продвижение в этой области [4–6]. Огромное количество других исследований по изучению технологий ПЭО проводятся по всему миру начиная от фундаментальной науки [7] до практического применения [8,9].

ПЭО-покрытия на поверхности алюминиевых сплавов характеризуются прочной, хорошо прилегающей к основанию слоистой структурой. Тонкий переходной слой на границе с основанием отвечает за его антикоррозионные свойства. Основной слой ПЭО-покрытий на сплавах, как правило, включает корунд $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, который имеет высокую микротвердость и обеспечивает хорошую износостойкость [8]. Покрытия с такой структурой обладают наряду с высокой твердостью и прочностью одновременно относительной пластичностью. Они эффективно сопротивляются макро- и микроразрушениям, эрозионному износу, кавитационным и вибродинамическим нагрузкам.

В основе инновационных технологий, предлагаемых в исследовании, лежат наноструктурированные сплавы (наноразмерные частицы упрочняющих матрицу фаз) и покрытия. Подобные разработки всегда оказывают положительное влияние на развитие науки и технологий. Могут служить источником новых идей по созданию других наноматериалов, нанокомпозитов, в том числе гибридных, с использованием органических и полимерных материалов. Опыт показывает, что применение таких материалов в технике и технологии, вполне могут привести к прорывным результатам. Так, предлагаемая технология имеет реальные преимущества перед существующими аналогами.

Инновационная технология ПЭО и ее преимущества

Несмотря на то, что технология ПЭО известна уже более 30 лет, но до сих пор не получила широкого применения по сравнению с известными технологиями оксидирования алюминиевых сплавов - микродуговое оксидирование (МДО) [10]. Так при МДО используются простые конденсаторные источники питания технологических ванн,

работающие на промышленной частоте 50 Гц. Основными недостатками технологии МДО являются низкая производительность процесса, большая энергоемкость и слоистое строение получаемого покрытия (при этом пористый дефектный слой составляет 30–40%). Также при технологии ПЭО использование ультракоротких, коротких мощных импульсов тока приводит к образованию высокотемпературных твердых фаз оксидов алюминия уже в относительно тонких покрытиях (10–20 мкм), что невозможно при способе МДО. Особенностью технологии ПЭО является возможность образования тугоплавких фаз, например, Al_2O_3 . $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ является основным компонентом природного корунда, который проявляет хорошую химическую стабильность и не вступает в реакцию с кислотой. В результате образование $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ улучшается коррозионная стойкость покрытий.

Благодаря своей простоте обработка ПЭО успешно конкурирует по стоимости также с вакуумным нанесением покрытий и методами электрогальваники [11, 12]. Предварительная подготовка покрытий состоит только в очистке и обезжиривании. Никаких дополнительных мер вроде отжига или поверхностной активации не требуется.

Технология ПЭО нового поколения существенно отличается от известных коммерческих технологий ПЭО (Keronite и др.) [13]. Эти известные технологии имеют относительно низкую производительность процесса (0,5–1,0 мкм/мин), что сдерживает их применение в серийном производстве. Кроме того, относительно тонкие керамические покрытия толщиной 10–30 мкм при использовании этих технологий не обладают достаточной микротвердостью и износостойкостью.

Технология ПЭО - это импульсный высоковольтный анодно-катодный процесс оксидирования, проводящийся на высоких частотах, что обеспечивает менее пористое и более плотное покрытие. Используемый в данной технологии микропроцессор обеспечивает четкое соотношение длительностей и мощностей анодных и катодных импульсов тока. Ультракороткие (15–100 мкс), но достаточно мощные биполярные импульсы тока и напряжения позволяют реализовать высокую скорость нагрева и плавления поверхностного слоя металла.

Быстрое охлаждение и кристаллизация окисленных микрообъемов материала происходит в электролите, что создает благоприятные условия для образования нанокристаллических окисдно-керамических структур. Размеры кристаллов в покрытии составляют 50–150 нм. Процесс оксидирования ведется при частоте следования импульсов 3–10 кГц и амплитудах импульсов напряжений: анодных – 1000–1700 В, катодных – 350–500 В. Полученное наноструктурное керамическое покрытие имеет микротвердость HV1300–1700, модуль упругости 320–340 ГПа, адгезионную и когезионную прочность 300–350 МПа [14]. Толщина защитного покрытия может быть 10-60 мкм.

Микропористая структура на поверхности изделий, которая образуется после ПЭО, пропитывается фторполимером с последующей термической обработкой, которая позволяет создавать на поверхности деталей новое композиционное покрытие с повышенными коррозионной, ударной и усталостной стойкостью. После обработки на поверхности изделий не образуется внешний дефектный слой, что позволяет проводить механическую обработку деталей на обрабатывающих центрах в окончательный размер. Таким образом, после ПЭО размеры деталей не изменяются, и не требуется трудоемкой финишной обработки. Также, применение алюминиевых сплавов при производстве рабочих деталей позволяет: упрощать технологию их изготовления; сокращать количество технологических операций; снижать трудоемкость и себестоимость изготовления деталей и обеспечить высокую производительность и экологическую безопасность. Замена черных металлов на алюминиевые сплавы при производстве деталей приведет к существенной экономии электроэнергии и к отсутствию вредных выбросов в окружающую среду.

Так к примеру, ООО «Механика» (г. Москва) разработала и внедрила в производство на предприятии «Металлинвест-к» (г. Казань) новую технологию ПЭО [9], для изготовления рабочих ступеней электроцентробежных насосов из теплостойких алюминиевых сплавов с защитным керамическим покрытием. Такие рабочие ступени ЭЦН обладают высокой износостойкостью и низкой шероховатостью поверхности, способны работать надежно и длительное время в условиях осложнения одновременно несколькими факторами [15].

Метод ПЭО имеет ряд преимуществ [16]: а) широкий диапазон свойств покрытия, включая износостойкость и коррозионную стойкость и другие функциональные свойства (термооптические, диэлектрические, трибологические, твердость, прочность); б) отсутствие ухудшения механических свойств материала подложки вызвано низкой теплопроводностью слоя покрытия; в) высокая прочность сцепления (адгезия) между покрытием и основой; г) есть возможность обработки деталей со сложными геометрическими формами или больших размеров; д) оборудование простое и удобное в эксплуатации; е) низкая стоимость, не требуется защита с использованием вакуума или специальной газовой атмосферы; ж) технология экологически чистая, так как используются в основном щелочные электролиты, и в процессе отсутствуют вредные выбросы, соответствует требованиям экологически чистой технологии модификации поверхности.

Следует отметить также научный интерес по комбинированию процесса ПЭО разными дополнительными методами как золь-гель, для получения более улучшенных свойств коррозионной стойкости ПЭО-покрытий [17], и предварительного анодирования, для снижения энергопотребления обработки ПЭО и увеличения микротвердости покрытий [18].

Влияние параметров обработки ПЭО на структуру и свойства покрытий

Микроструктура ПЭО-покрытий обычно относительно сложная. Структурные исследования обычно выявляют три четких области в покрытиях, полученных методом ПЭО на алюминиевых сплавах. Пористая наружная область состоит преимущественно из низкотемпературных рентгеноаморфных фаз. Плотная внутренняя область формируется при высокотемпературной модификации, тогда как комплексные фазы элементов сплава подложки наблюдаются в тонкой межфазной области ниже этого плотного слоя. Относительные размеры этих областей, их структура, состав и свойства подвержены существенному влиянию параметров режимов обработки [8].

В настоящее время учеными исследуются различные аспекты как самого процесса ПЭО, так и свойства формируемых при этом процессе ПЭО-покрытий на легких сплавах. Исследуются

факторы, влияющие на морфологию, фазовый состав, механические и физические свойства, а также на защитную способность ПЭО-покрытий.

Исследование механизма образования покрытий позволило существенно расширить знания об основных факторах, влияющих на структуру и свойства оксидных покрытий при процессе ПЭО: режим поляризующего тока, напряжение, частота, коэффициент заполнения, состав и концентрация электролита, продолжительность оксидирования, материал образца и т.д. В частности, определение подходящих электрических параметров играет решающую роль в получении желаемых покрытий со специальными фазовыми компонентами и микроструктурой. Полные исследования этих эффектов проводились при обработке алюминиевых сплавов.

Параметры тока и поляризующего сигнала напряжения при ПЭО оказывают существенное влияние на структуру и свойства оксидного слоя. Различные текущие режимы используются при обработке ПЭО, включая режимы постоянного, переменного, униполярного или биполярного импульсного тока [19]. Хотя работа на постоянном токе возможна (покрытие тонкое без основного слоя богатой $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), но неоднократно обнаруживалось, что процесс работает более эффективно, а покрытия более качественные при использовании источников питания переменного и импульсного биполярного тока, которые позволяют управлять характеристиками микроразряда и тем самым избежать перегрева и разрушения материала покрытия, что может произойти в режимах постоянного тока [20].

Биполярный режим позволяет обеспечить точный контроль процесса за счет варьирования отношения амплитуд отрицательных и положительных импульсов тока, а также их синхронизации, с целью устранения сильнейших разрядов для улучшения качества покрытия [21]. Значительно лучшие свойства образцов полученных в биполярном импульсном режиме можно отнести к более высокочастотным мощным импульсам тока, которые дают возможность созданию коротких и более энергичных микроразрядов. Как результат, они имеют более плотное покрытие, что приводит к более высокой микротвердости и меньшему коэффициенту трения по сравнению с образцами, полученными при постоянном токе [22, 23]. Ерохин и др. [19] провели сравнение

свойств керамических покрытий алюминиевых сплавов при ПЭО, полученные при переменном токе с частотой 50 Гц и в биполярном импульсном режиме в диапазоне частот в 1-3 кГц, которые также подтверждают, что биполярный импульсный режим может улучшить морфологию покрытия (рисунок 1).

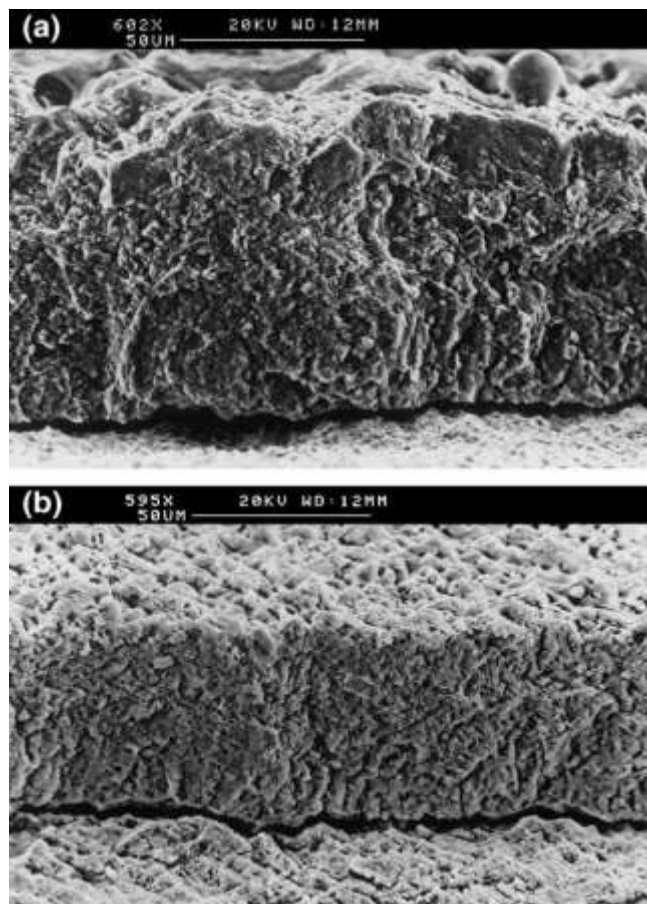


Рисунок 1 - Типичные СЭМ-изображения поперечного сечения ПЭО-покрытий, полученных с использованием (а) процессов переменного тока частотой 50 Гц и (б) биполярного импульсного тока частотой 2,5 кГц [19]

При этом формируется плотный и однородный поверхностный слой толщиной 50-70 мкм. Особенно за счет увеличения скорости роста покрытий и уменьшения толщины пористого наружного слоя, так как объемная доля пористого внешнего слоя может быть уменьшена с 20-25% до 15-10% от общей толщины слоя по сравнению с обработкой ПЭО при переменном токе 50 Гц. Внутренний слой, несмотря на небольшое увеличение пористости, сохраняет относительно высокую твердость 1200-1500 НК₂₅ и хорошую адгезию ($L_{C2} = 60$ Н). Также в данной работе обсуждается влияние частоты импульсов тока как на кинетику роста

покрытий, так и на энергоэффективность процесса, устанавливая, что оптимальное сочетание скорости роста покрытий и энергопотребление может быть достигнуто при частоте 1-3 кГц, и с увеличением частоты, увеличивается фаза $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Напряжение оказывает наибольшее влияние на структуру и свойства ПЭО-покрытий и его влияние было изучено многими исследователями [24]. С ростом напряжения толщина и скорость роста покрытий увеличивается, повышаются стойкость к коррозии и износу. Частота и коэффициент заполнения мало влияют на толщину покрытия, но оказывают значительное влияние на пористость поверхности и коррозионную стойкость покрытия [25]. В работе [26] на примере чистого алюминия рассмотрено влияние электрических параметров (напряжения, частота, коэффициент заполнения) на структуру ПЭО-покрытия в щелочном силикатосодержащем электролите. На рисунке 2 показаны морфологии поперечного сечения микроструктурой и повышенной коррозионной стойкостью в среде NaCl достигается, когда низкое напряжение и высокая частота совпадают с небольшим коэффициентом заполнения.

Исследования влияния плотности тока на фазовый состав, структуру и свойства покрытий показали, что увеличение значения данного параметра ведет к возрастанию скорости роста оксидного покрытия, улучшению механических и антикоррозионных характеристик покрытий и уменьшению плотности пор [27]. Также увеличение напряжения приводит к более ПЭО-покрытий, сформированных на чистом

алюминии. Видно, что напряжение имеет наибольшее влияние на морфологию поперечного сечения покрытия. Покрытия (образцы 1-4) полученные при низком напряжении (340 В) содержат только плотный слой, толщина которой колеблется в диапазоне 2–4 мкм и практически отсутствуют наблюдаемые микропоры и микротрещины. Покрытия (образцы 5-8) получены в условиях высокого напряжения (480 В) в основном состоят из внутреннего плотного слоя и внешнего пористого слоя, толщиной 32-42 мкм. Толщина внутреннего плотного слоя неравномерны, также много микропор и микротрещины наблюдаются во внешнем пористом слое покрытия. Отмечается, что не только каждый независимый фактор, оказывает заметное влияние на структуру и свойства покрытий. Сочетание высокого напряжения, низкой частоты и большого коэффициента заполнения, значительно увеличивает толщину покрытия и коррозионную стойкость в среде HNO_3 . И наоборот, покрытие с наиболее плотной высокой твердости покрытия, что связано с увеличением содержания $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Обычно для ПЭО плотность тока устанавливается в пределах 0.01 до 0.3 А/см². Поэтапное уменьшение плотности тока, проведенное в работе [28], значительно улучшили микроструктуру оксидных покрытий по сравнению с режимом постоянной плотности тока, что связано с изменением поведения искровых разрядов по уменьшающейся плотности тока в более поздних этапах, ведущих к герметизации изначально сформированных крупных микропор.

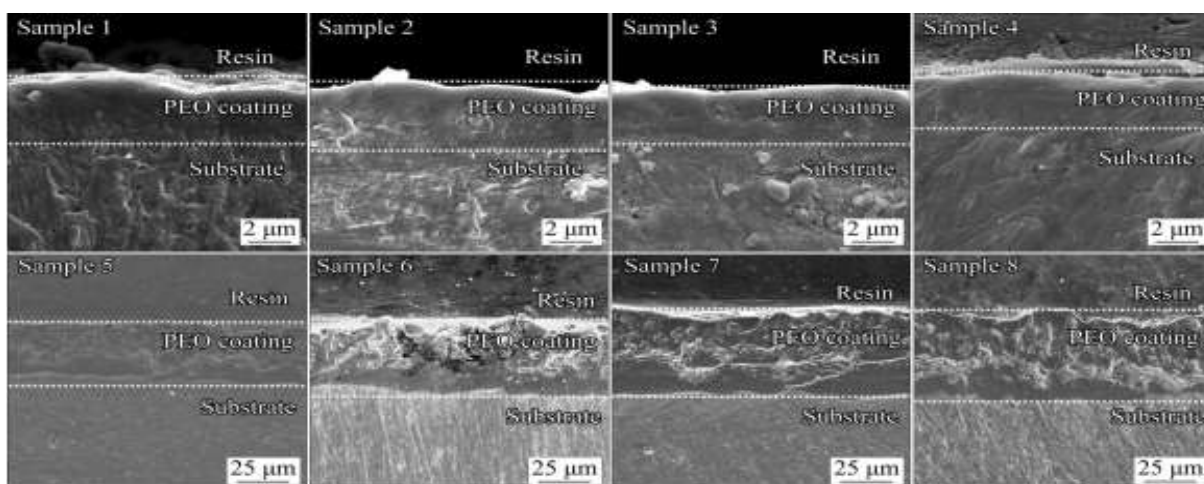


Рисунок 2 - Морфология поперечного сечения ПЭО-покрытий, сформированных на основе чистого алюминия, на основе ортогональных экспериментов [26]

Влияние относительного расстояния между электродами на процесс можно объяснить интенсивностью разряда. Экспериментальные результаты [29] оценили влияние расстояния анод-катод (5 и 25 см) и ориентацию катода относительно анода показывают, что анодные токи уменьшаются с увеличением расстояния, более короткие расстояния и прямая ориентация приводят к покрытию с повышенной устойчивостью к коррозии и износу.

Состав электролита оказывает большое влияние на свойства покрытий. Чаще всего для алюминиевых сплавов используются слабощелочные электролиты. Они обеспечивают стабильное формирование покрытий и позволяют избежать быстрого растворения металла. Простые щелочные электролиты являются невыгодными для коммерциализации процесса, из-за низкого темпа роста покрытий и очень высокого потребления энергии. Как правило, основными компонентами электролитов алюминиевых сплавов являются алюминаты, фосфаты, силикаты и т.д. слабощелочных металлов (NaAlO_2 , Na_3PO_4 , Na_2SiO_3) [30], которые позволяют легко достичь искрового напряжения экономя время и способствуют увеличению скорости роста покрытий. Кроме того, наиболее успешно используются фтористые электролиты, которые характеризуются сложным поведением (KF , NaF), также электролиты, обеспечивающие слабую пассивацию металла, а также гидроксиды щелочных металлов NaOH и KOH в качестве регулятора pH и обеспечения высокой электропроводности раствора [31]. Однако следует признать, что огромный диапазон других составов электролитов, и потенциальное

влияние выходит за рамки эффектов, связанных с pH, проводимостью и слабой пассивации металлов. Кроме того, существуют многочисленные работы по изучению различных добавок в электролиты, приводящих к изменению свойств электролитов, получению новых соединений в составе ПЭО-покрытия [32, 33, 34].

Наибольшее влияние на структуру и свойства ПЭО-покрытий оказывает концентрация электролитов. В работе [35] рассмотрены литейные алюминиевые сплавы А356 в алюминатных электролитах с разной концентрацией (2, 16 и 24 г/л). Отмечается, что однослойное покрытие сформированное в течении короткого промежутка времени 480 с. в растворе NaAlO_2 с концентрацией 24 г/л показывает отличные коррозионные и износостойкие свойства, по сравнению с двухслойными покрытиями с концентрациями 2 и 16 г/л, соответственно при 1800 и 720 с. времени.

В работе зарубежных коллег [36], изучены алюминиевые сплавы при ПЭО в цинкосодержащем фосфатном электролите с разной концентрацией. Микродуговой разряд оптимизируется за счет изменения концентрации фосфата. Как видно из рисунка 3, при увеличении концентрации фосфата, размер пор не увеличивается, наоборот уменьшается, но плотность увеличивается, указывая на то, что дуга становится плотнее (рис. 3с-е). Благодаря более плотному и однородному разряду скорость роста покрытий ускоряется и уменьшается шероховатость поверхности. Большая концентрация фосфата в электролите увеличивает кристалличность твердой фазы

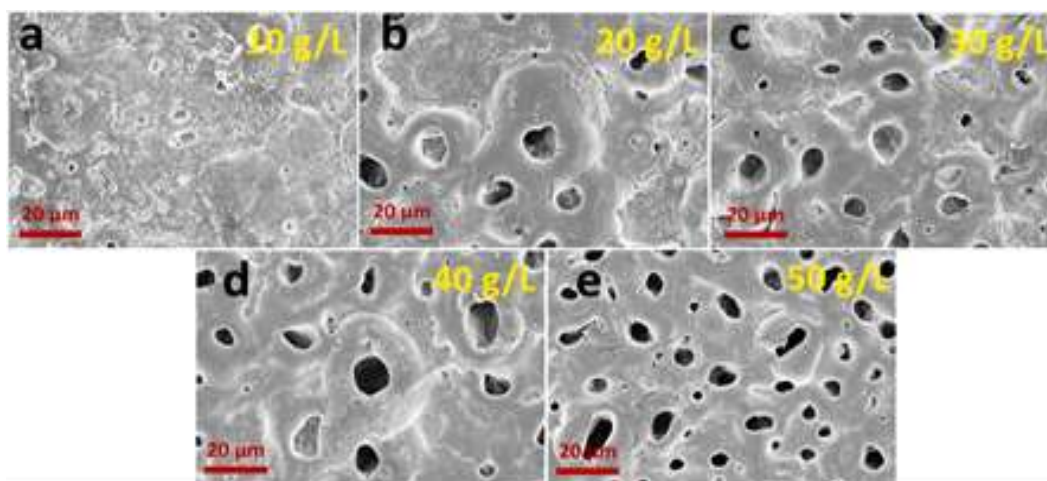


Рисунок 3 - СЭМ образцов, полученных с электролитами, содержащими различные концентрации (NaPO_3)₆: (а) 10 г/л, (b) 20 г/л, (с) 30 г/л, (d) 40 г/л, (е) 50 г/л [36]

Al_2O_3 и покрытия, полученные при концентрации 50 г/л в фосфатном электролите показывает твердость 711,8 HV и скорость износа $2,0 \times 10^{-5} \text{мм}^3 \cdot (\text{Н} \cdot \text{м})^{-1}$. Таким образом, за счет увеличения концентрации в электролите можно избежать снижения содержания коррозионно-стойкой фазы, что приведет к улучшению износостойкости при одновременном сохранении стойкости к коррозии.

Отмечается интерес научного мира к модифицированию стандартных электролитов ПЭО добавками [37], такими как глицерин, наночастицы SiC, вольфрамат натрия и аллотропами углерода и т. д., для получения более плотных и равномерных покрытий и дальнейшего повышения коррозионной стойкости и износостойкости. Отмечено, что введение глицерина приводит не только к стабилизации раствора, но и к получению плотного равномерного покрытия без трещин (пор) [32].

Включение вольфрама привело к образованию твердых покрытий (до 1900 HV) с темным внешним видом, поэтому перспективно для применения в системах терморегулирования [33].

Добавление материалов на основе углерода (нанотрубки, графит, алмаз и графен) в электролиты приводят к уменьшению количества и размеров трещин (пор) и к увеличению толщины и плотности покрытия, что увеличивает защиту от коррозии. Более того, увеличение содержания фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, более плотная структура и повышенная поверхностная твердость привела к лучшей износостойкости этих композитных покрытий по сравнению с простыми покрытиями [34].

В [38] работе изучено влияние состава катионного электролита на свойства ПЭО на алюминиевом сплаве A1050. Установлено, что на электрические и оптические характеристики процесса ПЭО влияет химическая природа катионов. Эффект клапана, т.е. способность к катодному (отрицательному) переносу заряда в системе «металл-оксид-электролит», максимален для катионов Na^+ и K^+ . Отсутствие однозарядных катионов (кроме протона) приводит к увеличению катодного порогового напряжения до пробивного значения. Фазовый состав покрытий, полученных из электролита с однозарядными катионами, состоит из γ - и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. В отсутствие однозарядных катионов никаких кристаллических фаз не наблюдалось. Таким образом, можно сделать вывод, что катионы

играют важную роль в катодном переносе заряда во время ПЭО, а также в образовании кристаллической фазы.

Отмечается также, что составы электролитов не всегда остаются стабильными как во время работы, так и в процессе хранения [39]. Это неудивительно, поскольку с течением времени свойства и химический состав электролитов могут меняться, в зависимости от возможности химических изменений в неиспользованном электролите, так и возможность воздействия загрязнений во время использования разных подложек. Следовательно, подбор подходящих стабилизаторов и дальнейшая оптимизация составов электролита для улучшения долгосрочной стабильности по-прежнему является важным направлением исследований.

Немаловажны и такие технологические параметры процесса ПЭО, как температура, продолжительность обработки и т. п. Обнаружено, что при превышении оптимального времени оксидирования (40 мин), наблюдается ухудшение защитных свойств покрытия, снижается эффективность покрытий, из-за растворения подложки или физической потери материала покрытий [20]. Установлено, что с увеличением времени оксидирования микротвердость покрытия снижается, а коэффициент трения увеличивается [32].

Существенное влияние на защитную способность ПЭО-покрытий оказывает легирующие элементы. Недавние исследования [40] указали, что ПЭО очень многообещающе в качестве замены традиционного анодирования для изготовления высокоэффективных покрытий на композитах на основе алюминия.

В другой работе [41] представлены результаты ПЭО обработки легированных алюминиевых сплавов медью (1–4,5 мас. %), в электрическом режиме переменного тока в силикатно-щелочном электролите. На поверхности формировались покрытия толщиной до 75 мкм. Электрохимическая коррозия сплавов с покрытием и без изучена в 3% растворе NaCl. Установлено, что после ПЭО плотность тока коррозии значительно уменьшается.

Характеристики керамических ПЭО-покрытий

Опыт использования метода плазменного электролиза в последние годы показывает, что

покрытия, полученные методом ПЭО, могут успешно конкурировать с покрытиями, полученными анодированием и процессами электрогальваники, а также обеспечивать альтернативу другим «композиционным материалам» в разных сферах промышленности.

Так, анодные покрытия по своим защитным свойствам значительно уступает ПЭО-покрытию по износостойкости в 4–5 раз, а по коррозионной стойкости в 2–3 раза. Так как в структуре анодных слоев содержится до 20% анионов электролита и более 10% связанной воды, то при нагревании деталей выше 120°C составляющие электролита и вода удаляются из покрытия, что приводит к разрывам и разрыхлениям покрытий и снижению их защитных свойств. Также, анодирование ведется в токсичном сернистом электролите, который требует к тому же глубокого охлаждения, что удорожает процесс нанесения покрытия [42]. Так как процесс ведется при более низких напряжениях 10–80 В, получаемое покрытие более тонкое и пористое.

Так как ПЭО-покрытие образуется за счет

которых значительно меньше размера пор у гальванических покрытий. Поэтому коррозионная стойкость в агрессивных средах у деталей с керамическим покрытием в 2–3 раза выше, чем у деталей, покрытых никелем или твердым хромом.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики современных упрочняющих покрытий, наносимых на поверхность рабочих деталей. Хром гораздо тверже никеля и более стоек к воздействию абразива. Но хром наносится только на подслои из никеля или меди, следовательно, микротрещины в твердохромовом покрытии заполняются никелем или медью, что значительно улучшает антикоррозионные свойства защитного покрытия. Кроме того, гальванические процессы никелирования и хромирования экологически опасны. Они требуют дорогостоящей переработки и обезвреживания отработанных растворов и промывочных вод. Недостаточная адгезия гальванических покрытий к основному металлу не обеспечивает надежной защиты деталей от вибрационных и кавитационных нагрузок [43].

Таблица 1 - Сравнительные характеристики современных упрочняющих покрытий [43]

№	Способ поверхностной обработки	Материал покрытия	Материал основы	Характеристики покрытий		
				Толщина, мкм	Микро твердость, HV	Прочность сцепления с основой, Мпа
1	Никелирование электролитическое	Никель	Латунь	15-25	300-350	20-40
2	Хромирование твердое электролитическое	Хром (на подслое никеля)	Латунь	25-45	800-1000	20-40
3	Анодирование твердое	Аморфное и кристаллические оксиды алюминия	Алюминий	30-50	300-450	150-220
4	ПЭО нового поколения	Нанокристаллические оксиды алюминия	Алюминий	Тонкое 10-20	800-1000	180-250
				Толстое 50-70	1000-1500	180-250

модификации поверхностного слоя алюминиевой детали, оно обладает прочностью сцепления с металлом на порядок выше по сравнению, например, с прочностью сцепления гальванопокрытий с латунью. Поэтому керамическое покрытие выдерживает ударные и термоциклические нагрузки без отслоений, часто встречающихся у гальванопокрытий. Также стоит отметить, что керамическое покрытие химически инертно и имеет микропоры, размер

Физико-механические свойства ПЭО-покрытий

В работе [42] сформулированы основные физико-механические свойства ПЭО-покрытий:

- *Износостойкость и прочность.* Структура инновационных керамических ПЭО-покрытий состоит из нанокристаллов оксидов размером 10-100 нм, характеризующаяся одновременно высокой микротвердостью и повышенной

прочностью. Микротвердость ПЭО-покрытия на алюминиевых сплавах достигают HV 800-1500 и имеют в своем составе высокотемпературные альфа- и гамма-фазы оксида алюминия. Мелкие, плотно упакованные кристаллы лучше сопротивляются микро- и макроразрушениям при динамическом воздействии абразивных частиц. Поэтому керамические ПЭО-покрытия прекрасно противостоят абразивному изнашиванию (царапанию), гидроабразивному и газоэрозионному износу. Так как формирование ПЭО-покрытий происходит за счет окисления металлической подложки с продвижением границы покрытие-металл вглубь металла, оно имеет очень высокую прочность сцепления с подложкой, достигающую 80-90% от ее прочности. Кроме того, сами керамические покрытия состоят из композиции различных по твердости кристаллических модификаций оксидов. Фазы, имеющие высокую твердость и обеспечивающие высокую износостойкость покрытиям, располагаются в матрице из менее твердых фаз. Такая структура придает относительную пластичность керамическому покрытию и исключает случаи хрупкого разрушения. Высокая адгезия ПЭО-покрытия к металлу-основе и композиционной структуре обеспечивает стойкость против вибрации, ударным, термоциклическим и кавитационным нагрузкам.

- *Теплостойкость и теплопроводность.* Благодаря высокой теплостойкости ПЭО-покрытия (выдерживают кратковременный нагрев до 1500°C). С другой стороны, высокая теплопроводность легких сплавов (особенно алюминиевых) и относительно тонкое керамическое покрытие способствует быстрому отводу тепла от зон трения и нагруженных поверхностей, что способствует интенсивному отводу тепла, например, от зоны трения скольжения гарантирует стабильную работу деталей, отсутствие тепловых ударов и тепловой деформации деталей.

- *Коррозионная стойкость.* Плазменное

электролитическое оксидирование (ПЭО) - эффективный способ повышения коррозионной стойкости алюминиевых сплавов. Малые размеры пор (до 1 мкм) и минимальная сквозная пористость инновационных ПЭО-покрытий делает их достаточно коррозионностойкими. Керамические ПЭО-покрытия инертны к большинству агрессивных сред и проникновение таких сред через сквозные поры керамического слоя может привести к коррозионному воздействию на сплав-основу и даже к отслоению покрытия. Для гарантированной защиты композиционного материала необходимо выбирать наиболее оптимальные параметры обработки, выбирать коррозионностойкий легкий сплав и уплотнять покрытие, заполняя его поры антикоррозионными материалами.

Области применения керамических покрытий

Новые конструкционные материалы с защитным ПЭО-покрытием, для изготовления ответственных деталей с высокой износ- и коррозионной стойкостью, могут с успехом использоваться на всех предприятиях различных отраслей промышленности Казахстана и в др. странах: нефтедобывающей, нефте-газо- и энергетических трубопроводах, атомной энергетике, машиностроении, полиграфии, ТНП, космонавтике, авиации, приборостроении, вакуумной технике, электронике и электротехнике, медицине, полиграфии и других отраслях промышленности. В зависимости от того, где они будут использоваться, покрытия должны обладать стойкостью к химическим агрессивным средам. В работе [44] приведены основные области применения изделий с наноструктурированными керамическими покрытиями:

- Применение в химической промышленности: ПЭО-покрытия могут



Рисунок 4 - Применение ПЭО-покрытий: (1) в атомной энергетике, (2) в машиностроении, (3) в военной отрасли, (4) в медицине, (5) в нефтедобывающей отрасли

использоваться в химической промышленности благодаря устойчивости покрытий в водной среде и стойкости к сильным кислотам и основаниям.

- Тепловые применения: термобарьерное покрытие требует сочетания свойств низкой теплопроводности, хорошей стойкости к окислению и термостойкости. Теплопроводность оксидного слоя при ПЭО алюминиевых сплавов низкая ($0,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$), что в основном объясняется особой микроструктурой, мелкозернистой вместе со значительной долей аморфной фазы (муллиты) [45]. Таким образом, ПЭО-покрытия могут использоваться для тепловой защиты металлов при высоких температурах среды.

- Механическое применение (твердость, износ и трение): из-за высокой твердости и превосходных трибологических характеристик оксидного слоя при ПЭО, где, например, снижает скорость износа сплава 6061Al примерно в 30 раз [46] по сравнению с 2-кратным твердым анодированным покрытием, позволяет заменять многие детали, на сплавы Mg и Al с ПЭО-покрытием, что приводит к снижению расхода топлива в автомобильной и авиакосмической промышленности. Улучшенные характеристики покрытия, которые можно получить применением технологии ПЭО в аэрокосмической промышленности (крепеж, шасси, лопасти, диски и валы авиационных двигателей) автомобильной промышленности (каркасы сидений, двери, поршни и гильзы цилиндров), а также нефте- и газовой промышленности (шестеренчатые и роторные насосы, обратный шаровый кран, крыльчатки центробежного насоса) [47].

- Электрооборудование и электроника: можно получить электроизоляционные покрытия с высокой диэлектрической прочностью (до 2500 В) для электрических и электронных компонентов. Покрытие ПЭО может заменить обычно применяемую электрическую изоляцию малярного материала для изготовления датчиков. Также ПЭО подходит для твердого покрытия внутренних поверхностей, включая конические, полые или цилиндрические области.

- Биомедицинские применения: титановые сплавы и магниевые сплавы широко используются в биомедицинских устройствах, включая ортопедические изделия, зубные импланты, а также в разлагаемых биоматериалах, благодаря хорошей

биосовместимости и отличной коррозионной стойкости (Ti) и высокому удельному сопротивлению [48].

- Декоративные или оптические применения: в зависимости от параметров обработки ПЭО, декоративные покрытия могут быть черного матового и блестящего цвета, чернильного, серого, коричневого, оливкового цветов с различными декоративными оттенками. За счет создания пористости предварительная обработка ПЭО улучшает адгезию красок, золь-гель и порошковых покрытий и производят дуплекс покрытия для улучшения свойств, особенно в агрессивных средах [49]. Черные абсорбирующие покрытия, образованные из экологически чистых электролитов, обладают большим потенциалом для алюминиевых сплавов в качестве терморегулирующих слоев, применяемых в аэрокосмических компонентах (например, в спутниках).

Заключение

Технология ПЭО - является высокоэффективной, энергосберегающей и экологически чистой технологией создания наноструктурированного защитного керамического покрытия на поверхности изделий.

Замена черных металлов на алюминиевые сплавы при производстве деталей приведет к существенной экономии электроэнергии, к отсутствию вредных выбросов в окружающую среду.

Уникальные свойства керамических ПЭО-покрытий обеспечивают широчайший спектр применения изделий с этими покрытиями.

Результат соответствующих исследований показывают, что, хотя был сделан большой шаг для внедрения и развития этого способа обработки, до сих пор отмечается недостаток экспериментальных данных, из-за одновременных сложных электрохимических и плазменных реакций на поверхности подложки.

Таким образом, проведенный обзор показывает, что есть значительные возможности для более эффективного управления процессом в отношении характеристик покрытия и энергоэффективности, и делаются дальнейшие попытки определить ключевые моменты, которые могут помочь в этом.

Ссылка на данную статью: Ешманова Г.Б., Смағұлов Д.У., Блаверт К. Технология плазменного электролитического оксидирования для получения защитных покрытий алюминиевых сплавов // *Комплексное использование минерального сырья = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* -2021. №2(317), pp.78-93. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.21>

Cite this article as: Yeshmanova G.B., Smagulov D.U., Blawert C. Tekhnologiya plazmennogo elektroliticheskogo oksidirovaniya dlya polucheniya zashchitnykh pokrytiy alyuminiyevykh splavov [Plasma electrolytic oxidation technology for producing protective coatings of aluminum alloys] // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* - 2021. № 2 (317), pp. 78-93. (In Rus.). <https://doi.org/10.31643/2021/6445.21>

Алюминий қорытпаларының бетінде қорғаныш қабат алудың плазмалық электролиттік тотықтыру технологиясы

¹Ешманова Г.Б., ¹Смағұлов Д.У., ²Блаверт К.

¹Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан

²Гельмгольц орталығы, Беттік ғылыми зерттеу институты, Гестхахт, Германия

* Corresponding author email: e_gaukhar@mail.ru, g.yeshmanova@satbayev.university

Received: 12 наурыз 2021
Peer reviewed: 04 мамыр 2021
Accepted: 14 маусым 2021

ТҮЙІНДЕМЕ

Бүгінгі күні бөлшектердің беткі қабаттарын беріктендіру және бетінде жоғары физикалық, механикалық және химиялық қасиеттері бар қорғаныш жабындарын жасау технологиясы өте тиімді. Мақалада алюминий қорытпаларын беттік беріктендірудің ең перспективті инновациялық технологиясы – плазмалық электролиттік тотықтыру (ПЭО) әдісі қарастырылған. Алюминий қорытпаларының бетінде қорғаныс жабындарының пайда болуының ықтимал шарттары мен механизмдері қарастырылған. ПЭО өңдеудің негізгі параметрлерінің (электрлік параметрлері, электролиттің құрамы мен концентрациясы, легірлеуші элементтердің әсері) оксидті керамикалық жабындардың құрылымы мен қасиеттеріне әсері зерттелді. Алюминий қорытпаларынан жасалған сынамалар мен дайын бұйымдардың беткі қабатының сапалық сипаттамалары ПЭО технологиясының тиімділігін көрсетіп, жоғары қаттылық, беріктік, тозуға және коррозияға төзімділік қасиеттері бар керамикалық жабындарды алуға мүмкіндік береді. Алюминий қорытпаларынан жасалған бұйымдардың бетіне қорғаныш ПЭО жабындыларын жалату үшін жоғары тиімді технологияларды қолданудың мүмкін бағыттары ұсынылған.

Түйін сөздер: плазмалық электролиттік тотықтыру, алюминий қорытпасы, керамикалық жабындар, коррозия, құрылым, қасиет.

Авторлар туралы ақпарат:

Ешманова Гаухар Бауыржанқызы

инженер, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: 0000-0001-8707-8385. Email: g.yeshmanova@satbayev.university

Смағұлов Даулетхан Улиялович

т.ғ.д., профессор, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: 0000-0002-0599-8741. Email: d.smagulov@satbayev.university

Карстен Блаверт

pHD, Функционалды беттер бөлімінің басшысы, Беттік ғылыми зерттеу институты, Гельмгольц орталығы, Гестхахт, Германия, Email: carsten.blawert@hereon.de

Литература

- [1] Ramzanova J. M., Zamalitinova M. G. Physical and mechanical properties investigation of oxide coatings on titanium. // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* – 2019. – №. 2. – С. 34-41. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.14>
- [2] Kellogg H.H. Anode Effect in Aqueous Electrolysis. // *Journal of The Electrochemical Society.* – 1950. - V. 97. N. 4. - P. 133-142. <https://doi.org/10.1149/1.2777980>
- [3] Yerokhin A.L., Lyubimov V.V., Ashitkov R.V. Phase formation in Ceramic Coatings during plasma electrolytic oxidation of aluminium alloys. // *Ceramics International.* – 1998. – 24. - P. 1-6.

- [4] Yerokhin A.L., Snizhko L.O., Gurevina N.L., Leyland A., Pilkington A., Matthews A. Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium. // *Applied Physics*. – 2003. – 36. – P. 2110-2120. <http://iopscience.iop.org/0022-3727/36/17/314>
- [5] Dunleavy C.S., Curran J.A., Clyne T.W. Self-similar scaling of discharge events through PEO coatings on aluminium. // *Surface and Coating Technology*. – 2011. – 206. – P. 1051–1061.
- [6] Dunleavy C.S., Curran J.A., Clyne T.W. Time dependent statistics of plasma discharge parameters during bulk AC plasma electrolytic oxidation of aluminium. // *Appl. Surf. Sci.* – 2013. – 268. – P. 397–409.
- [7] Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E.O., Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering — An overview. // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. – 201. – P. 8746–8760. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.023>
- [8] Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowe S.J. Plasma electrolysis for surface engineering. // *Surface and Coatings Technology*. – 1999. – 122. – P. 73–93. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00441-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00441-7)
- [9] Евразийский патент 012825 Способ формирования на поверхности металлических изделий защитного керамического покрытия / Кокарев В.Н. Опубл. 03.12.09. Бюл. № 200901050 (44)
- [10] Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б. и др. Микродуговое окисление (теория, технология, оборудование). - М.: Экомет, 2005. - 368 с.
- [11] Погребняк А. Д., Каверина А.Ш., Кылышканов М.К. Электролитно-плазменная технология для нанесения покрытий и обработки металлов и сплавов. // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2014. – Т. 50. № 1. - С. 72 – 88.
- [12] Mamaeva A. A., Kenzhegulov A. K., Panichkin A. V., Shah A. Obtaining hydroxyapatite coatings by mechanochemical interaction. // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* – 2020. – №. 3 (314). – С. 76-83. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.29>
- [13] Advanced Surface Treatments for Light Alloys, <http://www.keronite.com> 22.04.2021
- [14] Фиркова А.С. и др. Структура и свойства сплава АК4–1 Т 1, подвергнутого плазменной электролитной обработке нового поколения. // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: Сб. матер. VII междунар. конф. – М: ИМЕТ РАН, 2017. - С. 515–517.
- [15] Шатров А.С., Кокарев В.Н. Высокоэффективные легкие погружные многоступенчатые электроцентробежные насосы для добычи нефти в осложненных условиях. // *Нефтегазовые технологии и аналитика*. – 2018. - С. 14-27.
- [16] Patel J. L., Saka N. Microplasmic coatings. // *American Ceramic Society Bulletin*. - 2001. - 80(4). - P. 27–29.
- [17] Pezzato L., Rigon M., Martucci A., Brunelli K., Dabalà M. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) as pre-treatment for sol-gel coating on aluminium and magnesium alloys. // *Surface and Coating Technology*. – 2019. – 366. – P. 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.03.023>
- [18] Matykina E., Arrabal R., Pardo A., Mohedano M., Mingo B., Rodriguez I., Gonzalez J. Energy-efficient PEO process of aluminium alloys. // *Materials Letters*. – 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.04.077>
- [19] Yerokhin A.L., Shatrov A.S., Samsonov V., Shashkov P., Pilkington A., Leyland A., Mathews A. Influence of process parameters on electrolytic plasma discharging behaviour and aluminum oxide coating microstructure. // *Surf. Coat. Technol.* – 2005. – 199. – P. 150-157.
- [20] Matykina E., Arrabal R., Skeldon P., Thompson G.E. Investigation of the growth processes of coatings formed by AC plasma electrolytic oxidation of aluminium. // *Electrochimica Acta*. – 2009. – 54. – P. 6767–6778. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.06.088>
- [21] Hussein R.O., Nie X., Northwood D.O. Influence of process parameters on electrolytic plasma discharging behaviour and aluminum oxide coating microstructure. // *Surface & Coatings Technology*. – 2010. – 205. – P. 1659–1667. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.059>
- [22] Jaspard-Mécuson F., Czerwicz T., Henrion G., Belmonte T., Dujardin L., Viola A., Beauvir J. Tailored aluminium oxide layers by bipolar current adjustment in the Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) process. // *Surface and Coatings Technology*. – 2007. – 201. – P. 8677–8682. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.09.005>
- [23] Zh. M. Ramazanova, K. J. Kirgizbaeva, M. G. Zamalidinova, I. P. Tkacheva, A. G. Tolesh. Influence of regimes of plasma-electrolytic process on porosity and morphology of oxide coating // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* – 2017. – 2. – С.41-45. http://kimsimio.kz/wpcontent/uploads/2018/03/ilovepdf_com-43-47.pdf
- [24] Fatkullin A.R., Parfenov E.V., Yerokhin A.L., Lazarev D. M., Matthews A. Effect of positive and negative pulse voltages on surface properties and equivalent circuit of the plasma electrolytic oxidation process [J]. *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – 284. – P. 427–437.
- [25] MA Ying, ZHAN Hua, MA Yue-zhou, LÜ Wei-ling, FENG Jun-yan, GAO Wei Effects of electrical parameters on microstructure and corrosion resistance of micro-arc oxidation coatings on AZ91D magnesium alloys [J]. // *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*. – 2010. – 20. – P. 1467–1473.
- [26] Ling-yun AN, Ying MA, Xiao-xu YAN, Sheng WANG, Zhan-ying WANG Effects of electrical parameters and their interactions on plasma electrolytic oxidation coatings on aluminum substrates. // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. – 2020. – 30. – P. 883–895. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65262-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65262-1)
- [27] Nan Xiang, Ren-guo Song, Jun-jie Zhuang, Ruo-xi Song, Xiao-ya LU, Xu-ping SU Effects of current density on microstructure and properties of plasma electrolytic oxidation ceramic coatings formed on 6063 aluminum alloy. // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. – 2016. – 26. – P. 806–813. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64171-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64171-7)
- [28] Liang J., Hu L.T., Hao J.C. Improvement of corrosion properties of microarc oxidation coating on magnesium alloy by optimizing current density parameters. // *Appl. Surf. Sci.* – 2007. – 253. – P. 6939–6945.

- [29] Wei C.B, Tian X.B., Yang S.Q., Wang X.B., Fu K.Y., Chu P.K. Anode current effects in plasma electrolytic oxidation. // *Surf. Coat. Technol.* – 2007. – 201. – P. 5021–5024.
- [30] Shuaxing Wang, Xiaohui Liu, Xiaole Yin, Nan Du Influence of electrolyte components on the microstructure and growth mechanism of plasma electrolytic oxidation coatings on 1060 aluminum alloy. // *Surface and Coatings Technology.* – 2020. – V. 381. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125214>
- [31] Козлов И.А., Виноградов С.С., Тарасова К.Г., Кулюшина Н.В., Манченко В.А. Плазменное Электролитическое Оксидирование Магниевых Сплавов (обзор). // *Авиационные Материалы и Технологии.* – 2019. – 1 (54). - С. 23-36. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36>
- [32] Mehdi Javidi, Hossein Fadaee Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior. // *Applied Surface Science.* – 2013. – 286. – P. 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.049>
- [33] Hakimizad A., Raeissi K., Santamaria M., Asghari M. Effects of pulse current mode on plasma electrolytic oxidation of 7075 Al in Na₂WO₄ containing solution: From unipolar to soft-sparking regime. // *Electrochimica Acta.* – 2018. – V. 284. - P. 618-629. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.07.200>
- [34] Kazem Babaei, Arash Fattah-alhosseini, Maryam Molaei The effects of carbon-based additives on corrosion and wear properties of Plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Aluminum and its alloys: A review. // *Surfaces and Interfaces.* – 2020. – V. 21. - 100677. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100677>
- [35] Huan-jun XIE, Ying-liang CHENG, Shao-xian LI, Jin-hui CAO, Li CAO Wear and corrosion resistant coatings on surface of cast A356 aluminum alloy by plasma electrolytic oxidation in moderately concentrated aluminate electrolytes. // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* – 2017. – 27. – P. 336–351. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60038-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60038-4).
- [36] Chao Yang, Jiayu Zhu, Suihan Cui, Pinghu Chen, Zhongcan Wu, Zhengyong Ma, Ricky K.Y. Fu, Xiubo Tian, Paul K. Chu, Zhongzhen Wu Wear and corrosion resistant coatings prepared on LY12 aluminum alloy by plasma electrolytic oxidation. // *Surface and Coatings Technology.* – 2021. – V. 409. - 126885. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126885>
- [37] Lu X.P., Mohedano M., Blawert C., et al. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – a review. // *Surf. Coat. Technol.* – 2016. - V. 307. - P. 1165–1182 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.055>
- [38] Rogov A.B., Shayapov V.R. The role of cathodic current in PEO of aluminum: Influence of cationic electrolyte composition on the transient current-voltage curves and the discharges optical emission spectra. // *Applied Surface Science.* 2017. – 394. – P. 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.10.115>
- [39] Martin J., Leone P., Nomine A. et al. Influence of electrolyte ageing on the plasma electrolytic oxidation of aluminium. // *Surf. Coat. Technol.* - 2015. - 269. - P. 36–46.
- [40] Xue W.B., Wu X.L., Li X.J., Tian H. Anti-corrosion film on 2024/SiC aluminum matrix composite fabricated by microarc oxidation in silicate electrolyte. // *J Alloys Compd.* – 2006. – 425. - P. 302–306.
- [41] Agureev L., Savushkina S., Ashmarin A., Borisov A., Apelfeld A., Anikin K., Tkachenko N., Gerasimov M., Shcherbakov A., Ignatenko V., Bogdashkina N. Study of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on Aluminum Composites. // *Metals.* – 2018. – 8. - P. 459-470. <https://doi.org/10.3390/met8060459>
- [42] Шатров А. С. Кокарев В.Н. Инновационная технология плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) и создание нового конструкционного материала – толокомпозиата. // *Арматуростроение.* – 2010. - № 2. - С. 63–67.
- [43] Шатров А.С., Кокарев В.Н. Новая технология промышленного производства износостойких деталей трубопроводной арматуры из алюминиевых сплавов с защитным керамическим наноструктурным покрытием. // *Вестник арматурищика.* – 2014. - 6 (19).
- [44] Hussein R.O., Northwood D.O. Production of Anti-Corrosion Coatings on Light Alloys (Al, Mg, Ti) by Plasma-Electrolytic Oxidation (PEO). // *Developments in Corrosion Protection.* – 2014. – P. 201-239. <https://doi.org/10.5772 / 57171>
- [45] Jiang B.L., Wang Y.M. Plasma electrolytic oxidation treatment of aluminium and titanium alloys. // *Woodhead Publishing Limited.* – 2010. – P. 110-154.
- [46] Krishna L.R., Purnima A.S., Sundararajan G.A. Comparative study of tribological behavior of microarc oxidation and hard-anodized coatings. // *Wear.* – 2006. – 261. - P. 1095–1101.
- [47] Zhang P., Nie X., Hu H., Wear and Galvanic Corrosion Protection of Mg alloy via Plasma Electrolytic Oxidation Process for Mg Engine Application. // *SAE Technical Paper.* – 2009. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0790>.
- [48] Frauchiger V.M., Schlottig F., Gasser B., Textor M. Anodic plasma–chemical treatment of CP titanium surfaces for biomedical applications. // *Biomaterials.* – 2004. – 25. - P. 593–606.
- [49] Goueffon Y., Arurault L., Mabruc C., Tonond C., Guiguela P., Black anodic coatings for space applications: study of the process parameters, characteristics and mechanical properties. // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2009. – 209. – P. 5145–5151.

Reference

- [1] Ramazanova J. M., Zamalitinova M. G. Physical and mechanical properties investigation of oxide coatings on titanium. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* 2019. 2. 34-41. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.14> (In Eng.).
- [2] Kellogg H.H. Anode Effect in Aqueous Electrolysis. *Journal of The Electrochemical Society.* 1950. 97. 4. 133-142. <https://doi.org/10.1149/1.2777980> (In Eng.).
- [3] Yerokhin A.L., Lyubimov V.V., Ashitkov R.V. Phase formation in Ceramic Coatings during plasma electrolytic oxidation of aluminium alloys. *Ceramics International.* 1998. 24. 1-6 (In Eng.).

- [4] Yerokhin A.L., Snizhko L.O., Gurevina N.L., Leyland A., Pilkington A., Matthews A. Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium. *Applied Physics*. 2003. 36. 2110-2120. <http://iopscience.iop.org/0022-3727/36/17/314> (In Eng.).
- [5] Dunleavy C.S., Curran J.A., Clyne T.W. Self-similar scaling of discharge events through PEO coatings on aluminium. *Surface and Coating Technology*. 2011. 206. 1051–1061 (In Eng.).
- [6] Dunleavy C.S., Curran J.A., Clyne T.W. Time dependent statistics of plasma discharge parameters during bulk AC plasma electrolytic oxidation of aluminium. *Appl. Surf. Sci.* 2013. 268. 397–409 (In Eng.).
- [7] Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E.O., Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering — An overview. *Surface and Coatings Technology*. 2007. 201. 8746–8760. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.11.023> (In Eng.).
- [8] Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowe S.J. Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*. 1999. 122. 73–93. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00441-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00441-7) (In Eng.).
- [9] Evraziyskiy patent 012825 *Sposob formirovaniya na poverkhnosti metallicheskih izdeliy zashchitnogo keramicheskogo pokrytiya* (A method of forming a protective ceramic coating on the surface of metal products) / Kokarev V.N. Opubl. 03.12.09. 200901050 (44). (in Russ).
- [10] Suminov I.V., Epelfeld A.V., Lyudin V.B. i dr. *Mikrodugovoye oksidirovaniye (teoriya. tekhnologiya. oborudovaniye)* (Microarc oxidation (theory, technology, equipment)). M.: Ekomet, 2005, 368. (in Russ).
- [11] Pogrebnyak A.D., Kaverina A.Sh., Kilyshkanov M.K., *Elektrolitno-plazmennaya tekhnologiya dlya naneseniya pokrytiy i obrabotki metallov i splavov* (Electrolytic-plasma technology for coating and processing of metals and alloys). *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov = Physicochemistry of surfaces and protection of materials*. 2014. 50. 1. 72–88 (in Russ).
- [12] Mamaeva A. A., Kenzhegulov A. K., Panichkin A. V., Shah A. Obtaining hydroxyapatite coatings by mechanochemical interaction. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paldalanu*. 2020. 3. 314. 76-83. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.29> (In Eng.).
- [13] Advanced Surface Treatments for Light Alloys, <http://www.keronite.com> 22.04.2021
- [14] Firkova A.S. i dr. *Struktura i svoystva splava AK4–1 T 1. podvergnutogo plazmennoy elektrolitnoy obrabotke novogo pokoleniya* (Structure and properties of the AK4-1 T 1 alloy subjected to plasma electrolytic treatment of a new generation). *Deformatsiya i razrusheniye materialov i nanomaterialov: Sb. mater. VII mezhdunar. konf.* (Deformation and destruction of materials and nanomaterials: Collection of materials VII int. conf.) M: IMET RAN, 2017. 515–517 (in Russ).
- [15] Shatrov A.S. Kokarev V.N. *Vysokoeffektivnyye legkiye pogruzhnyye mnogostupenchatyye elektrotsentrobezhnyye nasosy dlya dobychi nefti v oslozhnennykh usloviyakh* (High efficiency lightweight submersible multistage electric centrifugal pumps for oil production in difficult conditions). *Neftegazovyye tekhnologii i analitika = Oil and gas technologies and analytics*. 2018. 14-27 (in Russ).
- [16] Patel J.L., Saka N. *Microplasmic coatings. American Ceramic Society Bulletin*. 2001. 80(4). 27–29 (In Eng.).
- [17] Pezzato L., Rigon M., Martucci A., Brunelli K., Dabalà M. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) as pre-treatment for sol-gel coating on aluminum and magnesium alloys. *Surface and Coating Technology*. 2019. 366. 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.03.023> (In Eng.).
- [18] Matykina E., Arrabal R., Pardo A., Mohedano M., Mingo B., Rodriguez I., Gonzalez J. Energy-efficient PEO process of aluminium alloys. *Materials Letters*. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.04.077> (In Eng.).
- [19] Yerokhin A.L., Shatrov A.S., Samsonov V., Shashkov P., Pilkington A., Leyland A., Mathews A. Influence of process parameters on electrolytic plasma discharging behaviour and aluminum oxide coating microstructure. *Surf. Coat. Technol.* 2005. 199. 150-157 (In Eng.).
- [20] Matykina E., Arrabal R., Skeldon P., Thompson G.E. Investigation of the growth processes of coatings formed by AC plasma electrolytic oxidation of aluminium. *Electrochimica Acta*. 2009. 54. 6767–6778. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.06.088> (In Eng.).
- [21] Hussein R.O., Nie X., Northwood D.O. Influence of process parameters on electrolytic plasma discharging behaviour and aluminum oxide coating microstructure. *Surface and Coatings Technology*. 2010. 205. 1659–1667. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.08.059> (In Eng.).
- [22] Jaspard-Mécuson F., Czerwiec T., Henrion G., Belmonte T., Dujardin L., Viola A., Beauvir J. Tailored aluminium oxide layers by bipolar current adjustment in the Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) process. *Surface and Coatings Technology*. 2007. 201. 8677–8682. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.09.005> (In Eng.).
- [23] Zh. M. Ramazanova, K. J. Kirgizbaeva, M. G. Zamalitinova, I. P. Tkacheva, A. G. Tolesh. Influence of regimes of plasma-electrolytic process on porosity and morphology of oxide coating. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paldalanu*. 2017. 2.41-45. http://kimsimio.kz/wpcontent/uploads/2018/03/ilovepdf_com-43-47.pdf (In Eng.).
- [24] Fatkullin A.R., Parfenov E.V., Yerokhin A.L., Lazarev D. M., Matthews A. Effect of positive and negative pulse voltages on surface properties and equivalent circuit of the plasma electrolytic oxidation process [J]. *Surface and Coatings Technology*. 2015. 284. 427–437 (In Eng.).
- [25] MA Ying, ZHAN Hua, MA Yue-zhou, LÜ Wei-ling, FENG Jun-yan, GAO Wei Effects of electrical parameters on microstructure and corrosion resistance of micro-arc oxidation coatings on AZ91D magnesium alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*. 2010. 20. 1467–1473 (In Eng.).
- [26] Ling-yun AN, Ying MA, Xiao-xu YAN, Sheng WANG, Zhan-ying WANG Effects of electrical parameters and their interactions on plasma electrolytic oxidation coatings on aluminum substrates. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2020. 30. 883–895. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65262-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65262-1) (In Eng.).

- [27] Nan Xiang, Ren-guo Song, Jun-jie Zhuang, Ruo-xi Song, Xiao-ya LU, Xu-ping SU Effects of current density on microstructure and properties of plasma electrolytic oxidation ceramic coatings formed on 6063 aluminum alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2016. 26. 806–813. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64171-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64171-7) (In Eng.).
- [28] Liang J., Hu L.T., Hao J.C. Improvement of corrosion properties of microarc oxidation coating on magnesium alloy by optimizing current density parameters. *Appl. Surf. Sci.* 2007. 253. 6939–6945 (In Eng.).
- [29] Wei C.B, Tian X.B., Yang S.Q., Wang X.B., Fu K.Y., Chu P.K. Anode current effects in plasma electrolytic oxidation. *Surf. Coat. Technol.* 2007. 201.5021–5024 (In Eng.).
- [30] Shuaixing Wang, Xiaohui Liu, Xiaole Yin, Nan Du Influence of electrolyte components on the microstructure and growth mechanism of plasma electrolytic oxidation coatings on 1060 aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2020. 381. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125214> (In Eng.).
- [31] Kozlov I.A., Vinogradov S.S., Tarasova K.G., Kulyushina N.V., Manchenko V.A. *Plazmennoye Elektroliticheskoye Oksidirovaniye Magniyevykh Splavov (obzor)* (Plasma Electrolytic Oxidation of Magnesium Alloys (Review)). *Aviatsionnyye Materialy I Tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*. 2019. 1(54). 23-36. <http://dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36> (in Russ.).
- [32] Mehdi Javidi, Hossein Fadaee Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior. *Applied Surface Science*. 2013. 286. 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.09.049> (In Eng.).
- [33] Hakimizad A., Raeissi K., Santamaria M., Asghari M. Effects of pulse current mode on plasma electrolytic oxidation of 7075 Al in Na₂WO₄ containing solution: From unipolar to soft-sparking regime. *Electrochimica Acta*. 2018. 284. 618-629. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.07.200> (In Eng.).
- [34] Kazem Babaei, Arash Fattah-alhosseini, Maryam Molaei The effects of carbon-based additives on corrosion and wear properties of Plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Aluminum and its alloys: A review. *Surfaces and Interfaces*. 2020. 21. 100677. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100677> (In Eng.).
- [35] Huan-jun XIE, Ying-liang CHENG, Shao-xian LI, Jin-hui CAO, Li CAO Wear and corrosion resistant coatings on surface of cast A356 aluminum alloy by plasma electrolytic oxidation in moderately concentrated aluminate electrolytes. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2017. 27. 336–351. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60038-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60038-4) (In Eng.).
- [36] Chao Yang, Jiayu Zhu, Suihan Cui, Pinghu Chen, Zhongcan Wu, Zhengyong Ma, Ricky K.Y. Fu, Xiubo Tian, Paul K. Chu, Zhongzhen Wu Wear and corrosion resistant coatings prepared on LY12 aluminum alloy by plasma electrolytic oxidation. *Surface and Coatings Technology*. 2021. 409. 126885. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126885> (In Eng.).
- [37] Lu X.P., Mohedano M., Blawert C., et al. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – a review. *Surf. Coat. Technol.* 2016. 307. 1165–1182 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.055> (In Eng.).
- [38] Rogov A.B., Shayapov V.R. The role of cathodic current in PEO of aluminum: Influence of cationic electrolyte composition on the transient current-voltage curves and the discharges optical emission spectra. *Applied Surface Science*. 2017. 394. 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.10.115> (In Eng.).
- [39] Martin J., Leone P., Nomine A. et al. Influence of electrolyte ageing on the plasma electrolytic oxidation of aluminium. *Surf. Coat. Technol.* 2015. 269. 36–46 (In Eng.).
- [40] Xue W.B., Wu X.L., Li X.J., Tian H. Anti-corrosion film on 2024/SiC aluminum matrix composite fabricated by microarc oxidation in silicate electrolyte. *J Alloys Compd.* 2006. 425. 302–306 (In Eng.).
- [41] Agureev L., Savushkina S., Ashmarin A., Borisov A., Apelfeld A., Anikin K., Tkachenko N., Gerasimov M., Shcherbakov A., Ignatenko V., Bogdashkina N. Study of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on Aluminum Composites. *Metals*. 2018. 8. 459–470. <https://doi.org/10.3390/met8060459> (In Eng.).
- [42] Shatrov A. S. Kokarev V.N. *Innovatsionnaya tekhnologiya plazmennogo elektroliticheskogo oksidirovaniya (PEO) i sozdaniye novogo konstruktivnogo materiala – topokompozita* (Innovative technology of plasma electrolytic oxidation (PEO) and creation of a new structural material - topocomposite). *Armaturostroyeniye = Valve construction*. 2010. 2. 63–67 (in Russ.).
- [43] Shatrov A.S., Kokarev V.N. *Novaya tekhnologiya promyshlennogo proizvodstva iznosostoykikh detaley truboprovodnoy armatury iz alyuminiyevykh splavov s zashchitnym keramicheskim nanostrukturnym pokrytiyem* (New technology for industrial production of wear-resistant parts of pipeline valves made of aluminum alloys with a protective ceramic nanostructured coating). *Vestnik armaturschika = The fitter's bulletin*. 2014. 6(19) (in Russ.).
- [44] Hussein R.O., Northwood D.O. Production of Anti-Corrosion Coatings on Light Alloys (Al, Mg, Ti) by Plasma-Electrolytic Oxidation (PEO). *Developments in Corrosion Protection*. 2014. 201-239. <https://doi.org/10.5772 / 57171> (In Eng.).
- [45] Jiang B.L., Wang Y.M. Plasma electrolytic oxidation treatment of aluminium and titanium alloys. *Woodhead Publishing Limited*. 2010. 110-154 (In Eng.).
- [46] Krishna L.R., Purnima A.S., Sundararajan G.A. Comparative study of tribological behavior of microarc oxidation and hard-anodized coatings. *Wear*. 2006. 261. 1095–1101 (In Eng.).
- [47] Zhang P., Nie X., Hu H., Wear and Galvanic Corrosion Protection of Mg alloy via Plasma Electrolytic Oxidation Process for Mg Engine Application. *SAE Technical Paper*. 2009. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0790> (In Eng.).
- [48] Frauchiger V.M., Schlottig F., Gasser B., Textor M. Anodic plasma–chemical treatment of CP titanium surfaces for biomedical applications. *Biomaterials*. 2004. 25. 593–606 (In Eng.).
- [49] Goueffon Y., Arurault L., Mabruc C., Tonond C., Guigues P., Black anodic coatings for space applications: study of the process parameters, characteristics and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. 209. 5145–5151 (In Eng.).



UDC 669.712

DOI: 10.31643/2021/6445.22



IRSTI 53.37.91

Modification of the phase composition of low-grade gibbsite-kaolinite bauxites

¹Abdulvaliyev R.A., ¹Dyussenova S.B., ¹Manapova A.I., ²Akcil A., ¹Beisenbiyeva U.Zh.

¹Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation JSC, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Department of Mining Engineering, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey

* Corresponding author email: s.dyussenova@satbayev.university

Received: 25 March 2021

Peer reviewed: 14 May 2021

Accepted: 15 June 2021

ABSTRACT

The known methods of processing low-quality bauxite have a number of disadvantages that make it difficult or impossible to use them in the conditions of production of JSC "Aluminum of Kazakhstan", therefore, it is necessary to effectively develop a technology for preliminary enrichment. Enrichment of low-quality bauxites is possible by separating the clayey - high-siliceous and coarse-crystalline fractions. Electron-microscopic analysis of the original bauxite showed that the coarse-crystalline fraction is tightly pressed by the fine one. The total silicon modulus of the sample is 2.49. The silicon modulus of the fine fraction is 2.19, and that of the coarse fraction is 3.89. When enriching bauxite, as a result of the separation of fines, it is possible to increase the silicon modulus. After the chemical activation of bauxite in a sodium bicarbonate solution, the finely dispersed fraction is effectively separated from the coarse one and the phase composition changes - the calcium silicate phase disappears and the calcite phase is formed. With an increase in the activation temperature, the content of kaolinite and siderite decreases, and the content of quartz and hematite increases. Studies have shown that at temperatures of chemical activation of 120 °C, duration of more than 120 minutes and 200 °C, duration of more than 40 minutes, a dawsonite phase is formed in bauxite, which densifies the mineral structure. When determining the optimal regime for carrying out chemical activation, it is necessary to take into account the negative possibility of dawsonite formation.

Keywords: Gibbsite-kaolinite bauxite, chemical activation, sodium bicarbonate, phase composition, conditioning, technology.

Information about authors:

Abdulvaliyev Rinat Anvarbekovich

– cand.tech.sc., head of the laboratory of alumina and aluminum. JSC "Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation", Almaty, Kazakhstan. ORCID ID: 0000-0001-6747-6984. Email: r.abdulvaliyev@satbayev.university

Dyussenova Symbat Berikkalikyzy

– PhD, researcher. JSC "Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation", Almaty, Kazakhstan. ORCID ID: 0000-0002-1990-3678. Email: s.dyussenova@satbayev.university

Manapova Alfiyam Iliyaevna

– master, junior researcher. JSC "Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation", Almaty, Kazakhstan. ORCID ID: 0000-0002-3258-7948. Email: a.manapova@satbayev.university

Akcil Ata Utku

– Ph.D. - Eng. Group Leader, MMRR Research Group, Department of Mining Engineering, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey. ORCID ID: 0000-0002-9991-0543. Email: ataakcil@sdu.edu.tr

Beisenbiyeva Uldana Zhomartkyzy

– graduate student, junior researcher. JSC "Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation", Almaty, Kazakhstan. ORCID ID: 0000-0002-2955-7027. Email: u.beisenbieva@satbayev.university

Introduction

At present, at the Pavlodar aluminum plant of Aluminum of Kazakhstan JSC, the bauxites of the Krasnogorsk deposit are processed according to the sequential-combined method Bayer-sintering. Bauxites are characterized by a low silicon modulus and a high content of harmful components: siderite, chamosite, hematite, pyrite, organic and other impurities, and their quality continues to

decline, which leads to a sharp deterioration in the composition of solutions, industrial products and a decrease in technical and economic indicators [1]. This is the basis for carrying out a set of theoretical and technological research for the development of an effective technology.

The known method of conditioning low-quality bauxite, combining washing of clay components and hydroalkaline decarbonization. The method makes it possible to simultaneously increase the

silicon modulus and reduce the carbonate content in bauxite. The main disadvantages of this technology are: low degree of washing due to the use of alkaline wash water; increase in material flow [2].

Processing of low-quality bauxite is possible by the method of separate leaching of clay and stony bauxite fractions, however, the separation of bauxite fractions in an alkaline does not provide the required degree of separation of the clay part [3, 4].

Thus, the known methods of processing low-quality bauxite have a few disadvantages that make it difficult or impossible to use them. It is required to create new solutions to ensure efficient processing of low-quality gibbsite - kaolinite bauxite from the Krasnogorsk deposit to obtain high-quality alumina.

To involve in the processing of most bauxite deposits in Kazakhstan, we propose a technology for processing low-quality gibbsite - kaolinite bauxite with two-stage concentration and hydrochemical processing, including preliminary chemical activation [5, 6].

Experimental part and discussion of results

The purpose of the research was to develop a technology for conditioning gibbsite-kaolinite bauxites of the Krasnogorsk deposit before concentration and hydrochemical processing. To achieve the goal, the method of preliminary chemical activation in a solution of sodium bicarbonate was used.

The work was carried out on a representative sample of Krasnogorsk bauxite of composition, wt. %: Al₂O₃ 42.0; SiO₂ 11.5; Fe₂O₃ 19.5; CaO 1.08; Na₂O 0.22; MgO 0.18; K₂O 0.03; TiO₂ 2.05; SO₃ 0.24; Cl⁻ 0.04; pp 23.16; μSi 3.65.

The work used: chemical, X-ray fluorescence, thermal, electron microscopic and IR analyzes.

Chemical analysis of the samples was carried out on an Optima 2000 DV inductively coupled plasma optical emission spectrometer (PerkinElmer, USA).

X-ray fluorescence analysis was performed on a Venus 200 PANalytical B.V. (PANalytical B.V., Holland).

X-ray experimental data were obtained on a BRUKERD8 ADVANCE apparatus using copper radiation at an accelerating voltage of 36 kW and a current of 25 mA.

IR analysis was obtained on an Avatar 370 FT-IR spectrometer in the spectral range of 4000-400 cm⁻¹

from preparations prepared from 200 mg of KBr and 2 mg of a sample. Experiment attachment: Avatar Diffuse Reflectance.

Thermal analysis was performed using an STA 449 F3 Jupiter synchronous thermal analysis instrument.

The micrographs were taken on a JEOL JSM-6610LV thermal emission cathode (LaB6) scanning low-vacuum electron microscope.

The chemical activation of bauxite was carried out in a solution containing 120 g / dm³ NaHCO₃ at a ratio L: T = 10.0 and temperatures of 90 - 200 °C using a thermostatted installation with 6 autoclaves rotating through the head, with a working volume of 250 cm³. The required content of sodium bicarbonate in the solution of 120 g / dm³ was selected taking into account its solubility limit.

The silicon modulus of the samples was determined from the ratio Al₂O₃/SiO₂.

The study of the material composition of the bauxite sample was carried out.

The X-ray phase composition of gibbsite - kaolinite bauxite is presented in Table 1.

Table 1 - Phase composition of gibbsite - kaolinite bauxite from Krasnogorsk deposit

Name	Formula	%
Gibbsit	Al(OH) ₃	54.95
Kaolinite-1A	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	10.02
Siderite	FeCO ₃	6.09
Hydroaluminosilicate	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	5.17
Quartz	SiO ₂	5.10
Calcium silicate	Ca ₅ Si ₃	5.07
Hematite	Fe ₂ O ₃	4.89
Titanium oxide	TiO ₂	4.88
Ferrotitanium oxide	Fe ₂ TiO ₅	3.83

The infrared spectrum of a bauxite sample is shown in Figure 2.

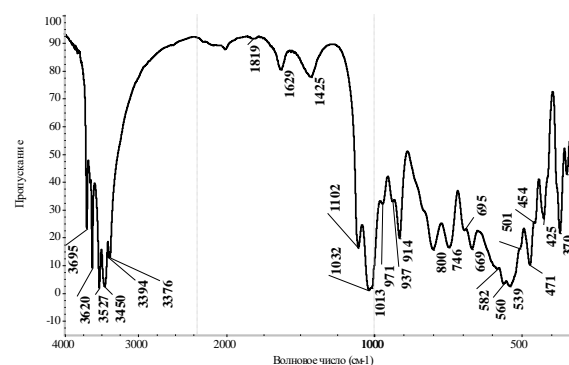
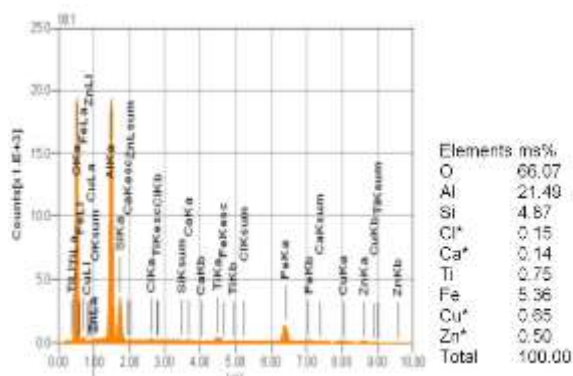


Figure 2 - Infrared spectrum of bauxite from Krasnogorsk deposit



C

a - general composition; b - large fraction; c - fine fraction

Figure 1 - Micrographs and electron microscopic analyzes of gibbsite - kaolinite bauxite from Krasnogorsk deposit

The micrographs show that the coarse-crystalline fraction of bauxite is tightly pressed with a fine fraction. The total silicon modulus of the sample area (Figure 1 - a) is 3.45. The silicon modulus of the coarse fraction (Figure 1-b) is 4.41, of the fine fraction (Figure 1-c) - 2.19.

In order to increase the silicon modulus of bauxite by separating the fine fraction, the initial sample was subjected to chemical activation in a sodium bicarbonate solution.

To determine the optimal conditions for the chemical activation of bauxite, studies of the effect of temperature and process duration were carried out.

Studies of the effect of the temperature of chemical activation on the change in the material composition of bauxite were carried out at temperatures of 90-200 ° C and duration of 60 minutes.

The chemical composition of bauxite depending on the activation temperature is presented in Table 2.

Table 2 - Chemical composition of bauxite depending on the activation temperature

Name	Activation temperature, °C					
	Initial	90	120	150	180	200
	Content, %					
Al ₂ O ₃	42.0	42.4	42.0	42.2	42.6	42.8
SiO ₂	11.5	11.4	11.3	11.3	11.4	11.5
Fe ₂ O ₃	19.5	19.7	19.9	19.7	19.9	19.9
CaO	1.08	1.1	1.1	1.2	1.1	1.2
Na ₂ O	0.22	0.7	1.06	1.18	1.5	6.4
MgO	0.18	0.18	0.19	0.17	0.19	0.18
SO ₃	0.24	0.17	0.18	0.18	0.19	0.16

K ₂ O	0.03	0.03	0.02	0.03	0.05	0.05
TiO ₂	2.05	2.25	2.3	2.2	2.1	2.2
Cl ⁻	0.04	0.02	0.02	0.016	0.017	0.03
LOI	23.16	22.05	21.93	21.824	20.953	15.58

As a result of chemical activation obtained, that the content of the elements in the samples, except sodium oxide, remained at the same level. At an activation temperature of 200 ° C, a thick slurry was obtained.

The phase composition of bauxite depending on the temperature of chemical activation is presented in Table 3.

Table 3 - Phase composition of bauxite depending on the temperature of chemical activation

Name	Activation temperature, °C					
	Initial	90	120	150	180	200
	Content, %					
Gibbsite Al(OH) ₃	54.95	55.59	56.45	55.7	52.38	55.34
Kaolinite-1A Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	15.19	12.11	12.43	12.44	10.79	10.86
Siderite FeCO ₃	6.09	11.52	9.77	7.69	6.82	7.29
Quartz SiO ₂	5.11	4.8	4.91	6.37	7.63	8.04
Calcium silicate Ca ₅ Si ₃	5.07	-	-	-	-	-
Hematite Fe ₂ O ₃	4.89	5.09	5.89	6.23	6.99	7.22
Titanium oxide Ti ₆ O ₁₁	4.88	4.69	4.59	4.57	4.51	4.64
Ferrotitanium oxide Fe ₂ TiO ₅	3.82	3.67	3.70	3.80	3.76	3.41
Calcite CaCO ₃	-	2.53	2.26	3.20	3.21	3.20

It follows from Table 3 that with an increase in the temperature of chemical activation in the phase composition of bauxite, the content of kaolinite and siderite decreases, the content of quartz and hematite increases, the calcium silicate phase disappears and the calcite phase is formed.

The influence of the duration of chemical activation on the change in the material composition of bauxite at temperatures of 120 and 200 ° C has been investigated.

The chemical composition of bauxite, depending on the duration of activation at a temperature of 120 ° C, is presented in Table 4.

Table 4 - Chemical composition of bauxite depending on the duration of activation at a temperature of 120 ° C

Name	Duration, min.						
	20	40	60	90	120	180	240
	Content, %						

Al ₂ O ₃	42.2	42.25	42.24	42.4	42.4	38.8	36.3
SiO ₂	11.2	11.1	11.3	11.3	11.1	10.9	10.6
Fe ₂ O ₃	20.3	20.3	19.8	19.6	20.0	18.6	17.1
CaO	1.3	1.14	1.1	1.1	1.17	1.06	0.9
Na ₂ O	0.413	0.45	1.16	1.3	1.43	4.35	6.8
MgO	0.13	0.18	0.19	0.16	0.18	0.2	0.16
SO ₃	0.19	0.16	0.18	0.17	0.17	0.04	0.19
K ₂ O	0.07	0.06	0.02	0.04	0.03	0.04	0.06
TiO ₂	2.5	2.4	2.6	2.2	2.5	2.2	2.06
Cl ⁻	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04
LOI	21.677	21.94	21.39	21.71	21.0	23.79	25.79

With an increase in the duration of activation to 180 minutes at a temperature of 120 ° C, the content of Na₂O in bauxite increases, and the content of the remaining elements remains the same. With an activation duration of 180 minutes or more, a thick pulp was obtained. the mass of which is greater than the initial mass of bauxite, therefore, the percentage of elements decreases.

The phase composition of bauxite depending on the duration of chemical activation at a temperature of 120 ° C is presented in Table 5.

Table 5 - Phase composition of bauxite depending on the duration of chemical activation at a temperature of 120 ° C

Name	Activation temperature, °C						
	20	40	60	90	120	180	240
	Content, %						
Gibbsite Al(OH) ₃	51.43	51.42	51.45	51.91	50.69	45.62	43.76
Kaolinite-1A Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	11.67	11.98	10.94	10.22	10.37	9.06	9.3
Siderite FeCO ₃	4.89	4.58	4.77	5.00	6.56	6.02	-
Quartz SiO ₂	5.28	5.18	5.61	5.94	6.02	6.55	6.05
Hematite Fe ₂ O ₃	10.02	10.25	10.23	10.1	9.81	9.35	8.09
Titanium oxide Ti ₆ O ₁₁	6.99	7.0	7.09	6.94	6.99	7.11	7.1
Ferrotitanium oxide Fe ₂ TiO ₅	6.32	6.2	6.25	6.6	6.54	6.23	6.71
Calcite CaCO ₃	3.4	3.39	3.66	3.29	3.02	4.4	4.5
Dawsonite NaAlCO ₃ (OH) ₂	-	-	-	-	-	5.66	14.49

As a result of chemical activation, the content of the gibbsite phase remains at the same level for a duration of 120 minutes, further, its amount decreases and a new aluminum-containing phase appears - dawsonite.

The chemical composition of bauxite, depending on the duration of activation at a temperature of 200 ° C, is presented in Table 6.

With an activation duration of 60 minutes, a thick pulp was obtained. A solid phase was obtained at a duration of 90 minutes, which filled the entire volume of the autoclave, there was no solution (Figure 4).

Table 6 - Chemical composition of bauxite depending on the duration of activation at a temperature of 200 ° C

Name	Duration, min.			
	20	40	60	90
	Content, %			
Al ₂ O ₃	44.1	44.38	44.83	44.8
SiO ₂	11.0	11.1	10.9	10.7
Fe ₂ O ₃	20.1	19.4	19.9	11.08
CaO	1.14	1.1	1.2	0.6
Na ₂ O	0.2	0.9	6.4	23.1
MgO	0.18	0.18	0.18	0.12
SO ₃	0.17	0.17	0.16	0.2
K ₂ O	0.04	0.05	0.05	0.01
TiO ₂	2.6	2.53	2.5	1.64
Cl ⁻	0.02	0.02	0.02	0.01
п.п.	20.45	20.17	13.86	7.74



Figure 4 - Solid phase of bauxite activation. obtained at 200 ° C and duration 90 minutes

An increase in the final weight of bauxite after activation at a temperature of 200 ° C and a duration of 60 minutes or more led to a decrease in the percentage of elements, at the same time, the sodium oxide content increased sharply, which is associated with the formation of a new phase - dawsonite (table 7).

Table 7 - Phase composition of bauxite depending on the duration of chemical activation at a temperature of 200 ° C

Name	Temperature, °C			
	20	40	60	90
	Content, %			

Gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$	54.59	54.38	50.34	15.3
Kaolinite-1A $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	9.58	8.85	9.8	6.34
Siderite FeCO_3	8.8	8.86	-	-
Quartz SiO_2	4.05	4.36	4.8	3.2
Hematite Fe_2O_3	5.45	6.28	6.22	5.45
Titanium oxide Ti_6O_{11}	2.69	2.83	2.4	1.2
Ferrotitanium oxide Fe_2TiO_5	8.49	8.19	8.41	2.8
Calcite CaCO_3	6.35	6.25	3.26	2.82
Dawsonite $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$	-	-	14.77	62.89

Micrographs and electron microscopic analysis of bauxite after chemical activation are shown in Figure 5.

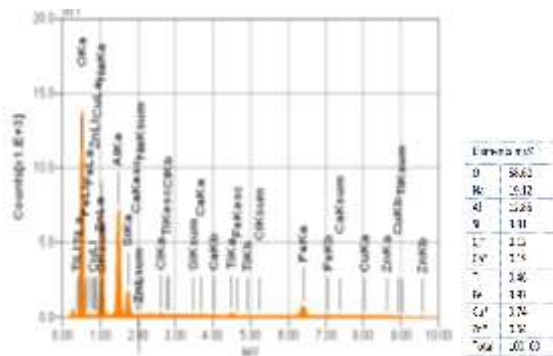
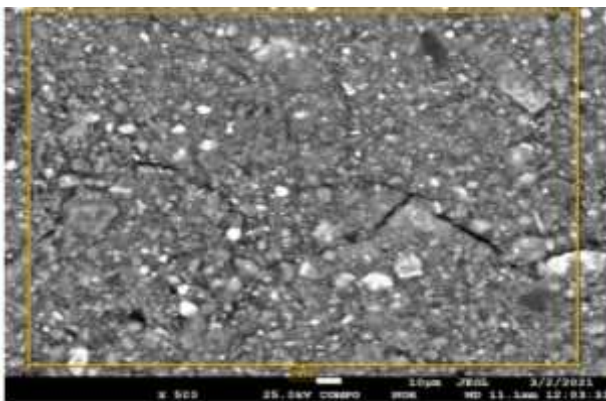


Figure 5 - Micrograph and electron microscopic analysis of gibbsite - kaolinite bauxite of the Krasnogorsk deposit after chemical activation at a temperature of 200 ° C and a duration of 40 minutes

The photomicrograph shows, that after chemical activation of bauxite there was a separation of the fine fraction from the coarse one, which will improve the efficiency of gravity and chemical processing, low-quality gibbsite - kaolinite

bauxite from Krasnogorsk deposit for further processing to produce alumina.

Conclusions

The phase composition of gibbsite - kaolinite bauxite of the Krasnogorsk deposit is represented by gibbsite, kaolinite, siderite, hydroaluminosilicate, quartz, calcium silicate, hematite, titanium oxide and ferrotitanium oxide.

Electron-microscopic analysis of the original bauxite showed that the coarse-crystalline fraction is tightly pressed by the fine one. The total silicon modulus of the sample is 3.45. The fines silicon module is 2.19, large fraction - 4.41.

After the chemical activation of bauxite in a sodium bicarbonate solution, the finely dispersed fraction is effectively separated from the coarse one and the phase composition changes - the calcium silicate phase disappears and the calcite phase is formed.

With an increase in the activation temperature, the content of kaolinite and siderite decreases, and the content of quartz and hematite increases.

At temperatures of chemical activation of 120 ° C, duration of more than 120 minutes and 200 ° C, duration of more than 40 minutes, the dawsonite phase is formed in bauxite, which densifies the mineral structure and makes it impossible to carry out further enrichment by gravity methods. therefore, when choosing the activation conditions, it is necessary to exclude the formation of this phase.

After chemical activation of bauxite, the separation of the finely dispersed fraction from the coarse one took place, which will increase the efficiency of gravity and chemical enrichment of low-quality gibbsite - kaolinite bauxite from the Krasnogorsk deposit for further processing to produce alumina.

Conflicts of interest. On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

Acknowledgement. This study was funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AR08856046).

Төмен сортты гиббсит-каолинит бокситтерінің фазалық құрамының модификациясы

¹Абдулвалиев Р.А., ¹Дюсенова С.Б., ¹Манапова А.И., ²Акчил А., ¹Бейсенбиева У.Ж.

¹ «Металлургия және кен байыту институты» АҚ, Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан

² Тау-кен кафедрасы, Сулейман Демирель университеті, Испарта, Түркия

* Автордың электрондық поштасы: s.dyussenova@satbayev.university

Мақала келді: 25 наурыз 2021
Сараптамадан өтті: 14 мамыр 2021
Қабылданды: 15 маусым 2021

ТҮЙІНДЕМЕ

Төмен сапалы бокситті өңдеудің белгілі әдістерінің бірқатар кемшіліктері бар. Оларды «Қазақстан алюминий» АҚ өндіріс жағдайында қолдану қиын немесе мүмкін емес, сондықтан алдын ала байыту технологиясын әзірлеу қажет. Төмен сапалы бокситті байыту - сазды жоғары кремнийлі және ірі кристалды фракцияларға бөлу арқылы мүмкін болады. Бастапқы бокситтің электронды-микроскопиялық талдауы ірі кристалды фракцияның майда бөлшектермен тығыз басылып қалатындығын көрсетті. Үлгінің жалпы кремний модулі 3,45 құрайды. Ұсақ фракцияның кремний модулі 2,19, ал ірі фракцияның 3,89-ды құрайды. Бокситтегі ұсақ бөлшектерді бөлу арқылы кремний модулін көбейтуге болады. Натрий гидрокарбонатының ерітіндісінде бокситті химиялық активтендіргеннен кейін ұсақ дисперсті фракция ірі бөліктен тиімді бөлінеді және фазалық құрамы өзгереді - кальций силикатының фазасы жойылып, кальцит фазасы түзіледі. Белсендіру температурасы жоғарылағанда каолинит пен сидериттің мөлшері азаяды, ал кварц пен гематиттің мөлшері артады. Зерттеулер көрсеткендей, химиялық активтендірудің температурасы 120° С, ұзақтығы 120 минут және 200° С, ұзақтығы 40 минуттан артық болғанда бокситте даусонит фазасы түзіліп, минералдық құрылымды тығыздайды. Химиялық активтендірудің оңтайлы режимін анықтағанда, даусониттің жағымсыз түзілу мүмкіндігін ескеру қажет.

Түйін сөздер: Гиббсит-каолинитті боксит, химиялық активация, натрий гидрокарбонаты, фазалық құрамы, кондициялау, технология.

	Авторлар туралы ақпарат:
Абдулвалиев Ринат Анварбекович	– т.ғ.к., глинозем және алюминий зертханасының меңгерушісі, «Металлургия және кен байыту институты» АҚ, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: 0000-0001-6747-6984, Email: r.abdulvaliyev@satbayev.university
Дюсенова Сымбат Берікқалиқызы	– PhD, ғылыми қызметкер, «Металлургия және кен байыту институты» АҚ, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: 0000-0002-1990-3678, Email: s.dyussenova@satbayev.university
Манапова Альфиям Ильевна	– магистр, кіші ғылыми қызметкер, «Металлургия және кен байыту институты» АҚ, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: 0000-0002-3258-7948, Email: a.manapova@satbayev.university
Акчил Ата Утку	– PhD, Сулейман Демирел Университеті, Тау-кен факультеті, MMRR зерттеу тобының жетекшісі, Түркия, Испарта. ORCID ID: 0000-0002-9991-0543. Email: ataakcil@sdu.edu.tr
Бейсенбиева Ұлдана Жомартқызы	– магистрант, кіші ғылыми қызметкер, «Металлургия және кен байыту институты» АҚ, Алматы, Қазақстан, ORCID ID: 0000-0002-2955-7027, Email: u.beisenbieva@satbayev.university

Модифицирование фазового состава низкокачественных гиббсит-каолинитовых бокситов

¹Абдулвалиев Р.А., ¹Дюсенова С.Б., ¹Манапова А.И., ²Акчил А., ¹Бейсенбиева У.Ж.

¹ АО «Институт металлургии и обогащения», Сәтбаев университет, Алматы, Қазақстан

² Кафедра горной инженерии, Университет Сулеймана Демиреля, Испарта, Түркия

* Электронная почта автора: s.dyussenova@satbayev.university

АННОТАЦИЯ

Известные методы переработки низкокачественных бокситов имеют ряд недостатков, делающих затруднительным или невозможным их применение в условиях производства АО «Алюминий Казахстана», поэтому необходима эффективная разработка технологии предварительного обогащения. Обогащение низкокачественных бокситов возможно осуществить путем разделения глинистой – высококремнистой и крупнокристаллической фракций. Электронно – микроскопический анализ исходного боксита показал, что крупно – кристаллическая фракция плотно запрессована мелкой. Общий кремниевый модуль пробы составляет 3,45. Кремниевый модуль мелкой фракции равен 2,19, крупной – 4,41. В результате отделения мелкой фракции боксита возможно повысить его кремниевый модуль. При химической активации боксита в растворе гидрокарбоната натрия происходит эффективное отделение мелкодисперсной фракции от крупной и изменение фазового состава – исчезает фаза силиката кальция и образуется фаза кальцита. С увеличением температуры активации уменьшается содержание каолинита и сидерита, увеличивается содержание кварца и гематита. Исследования показали, что при температурах химической активации 120° С, продолжительности более 120 минут и 200° С, продолжительности более 40 минут в боксите образуется фаза даусонита, которая уплотняет минеральную структуру. При определении оптимального режима проведения химической активации необходимо учитывать негативную возможность образования даусонита.

Ключевые слова: Гиббсит-каолиновый боксит, химическая активация, гидрокарбонат натрия, фазовый состав, кондиционирование, технология.

Поступила: 25 марта 2021
Рецензирование: 14 мая 2021
Принята в печать: 15 июня 2021

	Информация об авторах:
Абдулвалиев Ринат Анварбекович	– к.т.н., заведующий лабораторией глинозема и алюминия, АО «Институт металлургии и обогащения», Алматы, Казахстан, ORCID ID: 0000-0001-6747-6984, Email: r.abdulvaliyev@satbayev.university
Дюсенова Сымбат Берикқалиқызы	– PhD, научный сотрудник, АО «Институт металлургии и обогащения», Алматы, Казахстан, ORCID ID: 0000-0002-1990-3678, Email: s.dyussenova@satbayev.university
Манапова Альфиям Ильязовна	– магистр, младший научный сотрудник, АО «Институт металлургии и обогащения», Алматы, Казахстан, ORCID ID: 0000-0002-3258-7948, Email: a.manapova@satbayev.university
Акчил Ата Утку	– PhD, руководитель исследовательской группы MMRR, Кафедра горного дела, Университет Сулеймана Демиреля, Испарта, Турция. ORCID ID: 0000-0002-9991-0543. Email: ataakcil@sdu.edu.tr
Бейсенбиева Улдана Жомартқызы	– магистрант, младший научный сотрудник, АО «Институт металлургии и обогащения», Алматы, Казахстан, ORCID ID: 0000-0002-2955-7027, Email: u.beisenbieva@satbayev.university

Литература

- [1] Ибрагимов А.Т., Будон С.В. (2010). Развитие технологии производства глинозема из бокситов Казахстана. ТОО «Дом печати», 299.
- [2] Тастанов Е.А. (2003). Разработка физико-химических основ и совершенствование технологических процессов переработки низкокачественных бокситов: дис. докт. техн. наук. ИМИО, 86.
- [3] Ни Л.П., Медведков Б.Е., Абдулвалиев Р.А. и др. (1987). Исследование по переработке Краснооктябрьских бокситов с раздельным выщелачиванием глинистой и каменистой фракций // Переработка некондиционного сырья на глинозем: сб. научн. тр. ИМИО АН КазССР, 3-8.
- [4] Kenzhaliyev V. K. Innovative technologies providing enhancement of nonferrous, precious, rare and rare earth metals extraction // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*, 2019, 3 (310), 64-75. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.30>
- [5] Патент №32333 РК. Способ подготовки алюмосиликатного сырья перед выщелачиванием/ Абдулвалиев Р.А., Гладышев С.В., Позмогов В.А., Имангалиева Л.М. опубл.31.08.2017. Бюл. №16.
- [6] Miryuk O.A. Activation of cement clinker with high content of belite // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu*, 2020, 2 (313), 38-45. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.15>
- [7] Moenke H. (1962). *Mineralspektren*. Acad. Verlag, 394.
- [8] Farmer V.C. (1974). *The Infrared Spectra of minerals* // Mineralogical society, 539.
- [9] Юрченко Э.Н., Кустова Г.Н., Бацанов С.С. (1981). Колебательные спектры неорганических соединений // Наука, 145.

Reference

- [1] Ibragimov A.T., Budon S.V. (2010). *Razvitiye tekhnologii proizvodstva glinozema iz boksitov Kazakhstana* [Development of

- technology for the production of alumina from bauxite in Kazakhstan]. LLP "House of the press», 299. (in Russ).
- [2] Tastanov E.A. (2003). *Razrabotka fiziko-khimicheskikh osnov i sovershenstvovaniye tekhnologicheskikh protsessov pererabotki nizkokachestvennykh boksitov* [Development of physical and chemical foundations and improvement of technological processes for the processing of low-quality bauxite]: dis. doct. tech. science. IMOB, 86. (in Russ).
- [3] Ni L.P., Medvedkov B.E., Abdulvaliyev R.A. et al. (1987). *Issledovaniye po pererabotke Krasnooktyabr'skikh boksitov s razdel'nym vyshchelachivaniyem glinistoy i kamenistoy fraktsiy* // *Pererabotka nekonditsionnogo syr'ya na glinozem* [Research on the processing of Krasnooktyabrsk bauxites with separate leaching of clay and rocky fractions] // *Processing of substandard raw materials for alumina: collection of articles. scientific. tr. IMOB SA KazSSR, 3-8.* (in Russ).
- [4] Kenzhaliyev B. K. Innovative technologies providing enhancement of nonferrous, precious, rare and rare earth metals extraction // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* 2019, 3 (310), 64-75. (In Eng.). <https://doi.org/10.31643/2019/6445.30>
- [5] Patent No. 32333 RK. *Sposob podgotovki alyumosilikatnogo syr'ya pered vyshchelachivaniyem* [Method of preparation of aluminosilicate raw materials before leaching] / Abdulvaliev R.A., Gladyshev S.V., Pozmogov V.A., Imangalieva L.M. publ. 31.08.2017. Bul. No. 16. (in Russ).
- [6] Miryuk O.A. Activation of cement clinker with high content of belite // *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a. = Complex Use of Mineral Resources = Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu.* 2020, 2 (313), 38-45. (In Eng.). <https://doi.org/10.31643/2020/6445.15>
- [7] Moenke H. (1962). *Mineralspektren.* Acad. Verlag, 394. (In Eng.).
- [8] Farmer V.C. (1974). *The Infrared Spectra of minerals* // *Mineralogical society*, 539. (In Eng.).
- [9] Yurchenko E.N., Kustova G.N., Batsanov S.S. (1981). *Kolebatel'nyye spektry neorganicheskikh soyedineniy* [Vibrational spectra of inorganic compounds] // *Science*, 145. (in Russ.).

МАЗМУНЫ
СОДЕРЖАНИЕ
CONTENTS

<i>Seitkan A.S, Redfren S.A.T.</i> ARSENIC IN REFRACTORY GOLD ORE PROCESSING	5
<i>Moldabayeva G.Zh., Agzamov A.Kh., Suleimenova R.T., Elefteriadi D.K., Abileva S. Zh., Baluanov B. A.</i> HYDRODYNAMIC MODELING OF FIELD DEVELOPMENT USING ENHANCED OIL RECOVERY METHODS	14
<i>Zhakupova A.T., Salina V.A.</i> COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF SOLID AND HOLLOW STEEL CAST BILLETS	23
<i>Алиев С.Б., Омарбеков Е.У.</i> ВЛИЯНИЕ «НАСОСНЫХ СКВАЖИН» НА ПОКАЗАТЕЛИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА	30
<i>Sapinov R.V., Kulenova N.A., Sadenova M.A., Varbanov P.S., Klemeš J.J.</i> STATE AND PROSPECTS OF PROCESSING TIN-CONTAINING RAW MATERIALS IN KAZAKHSTAN	37
<i>Moldabayeva G. Zh., Suleimenova R. T., Sadvakassov M.A., Jalalov G.E.</i> FEATURES OF PLANNING AND IMPLEMENTATION OF ENERGY-SAVING MEASURES AT COMPRESSOR STATIONS OF MAIN GAS PIPELINES	46
<i>Әбдірейім F.E., Уракаев Ф.Х.</i> ЖЕРГЛІКТІ ШИКІЗАТ НЕГІЗІНДЕ ЖАСАЛҒАН КҮКІРТҚҰРАМДЫ ПРЕПАРАТТАРДЫ СІңДІРУ АРҚЫЛЫ ӨКТАС-ҰЛУТАСТАН ЖАСАЛҒАН ҚҰРЫЛЫС МАТЕРИАЛДАРЫНЫҢ ҚАСИЕТТЕРІН ЖАҚСARTU	57
<i>Myrzaliev S.K., Pratama G.N.I.P., Khamidulla A.G.</i> WASTEWATER TREATMENT USING NATURAL ZEOLITE MATERIALS	64
<i>Уразбаев F.M., Алтаева А.А., Қожаев Ж.Т., Мустафин М.Г.</i> ИНЖЕНЕРЛІК ҚҰРЫЛЫСТАРДЫҢ ДЕФОРМАЦИЯЛАРЫНЫҢ ГЕОДЕЗИЯЛЫҚ МОНИТОРИНГІ	69
<i>Ешманова Г.Б., Смагулов Д.У., Блаверт К.</i> ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАЗМЕННОГО ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	78
<i>Abdulvaliyev R.A., Dyussenova S.B., Manapova A.I., Akcil A., Beisenbiyeva U.Zh.</i> MODIFICATION OF THE PHASE COMPOSITION OF LOW-GRADE GIBBSITE KAOLINITE BAUXITE.....	94

Технические редакторы:
Г.К. Касимова, Т.И. Кожухметов, Ж.А. Карбоз, Н.Ж. Артыкбаев

Верстка на компьютере:
Г.К. Касимова

Дизайнер:
Г.К. Касимова, Н.Ж. Артыкбаев

Подписано в печать 15.06.2021 г.