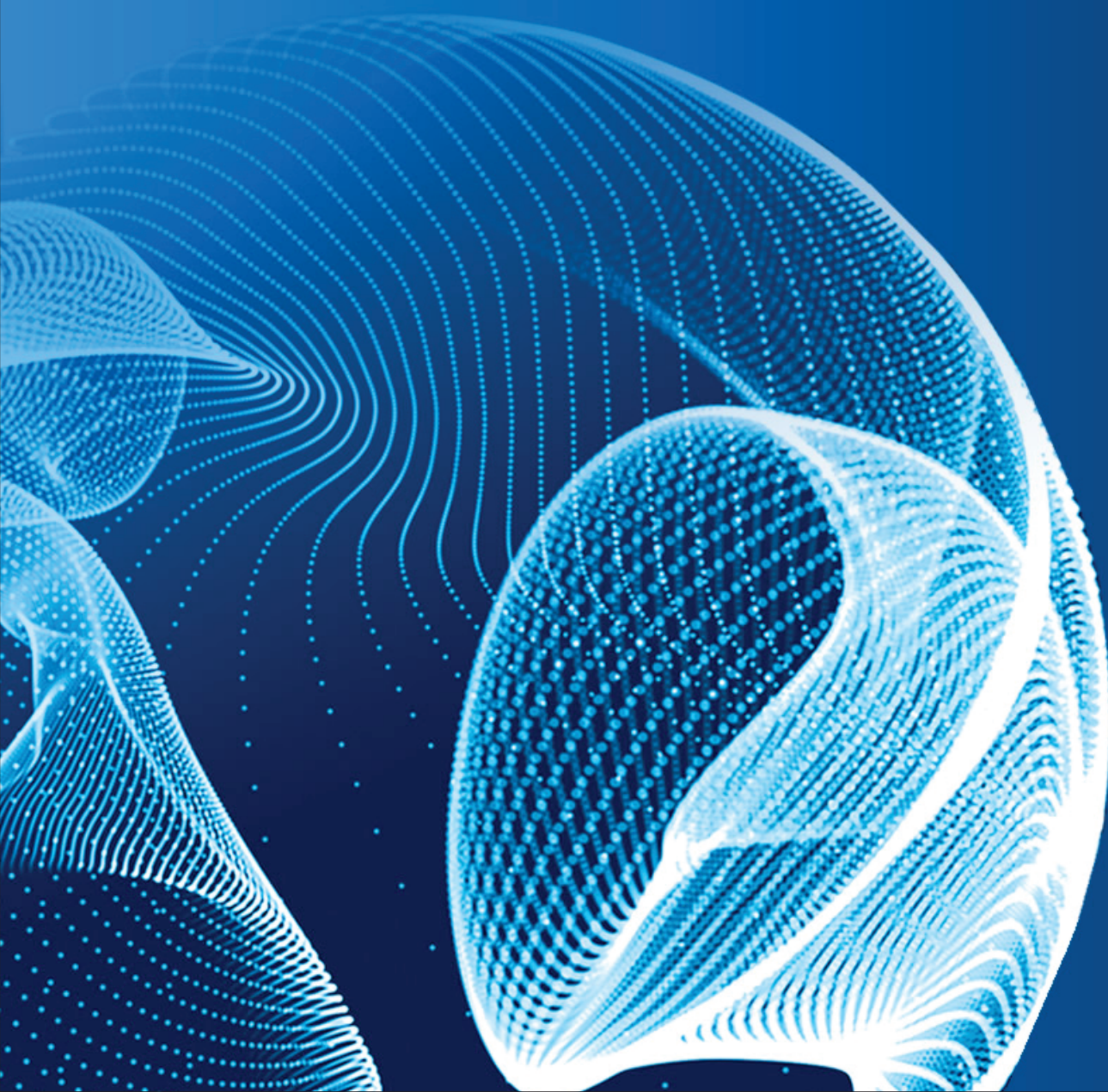


ENGINEERING JOURNAL of Satbayev University

Volume 145 (Issue 2)
April 2023



**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**



ENGINEERING JOURNAL OF SATBAYEV UNIVERSITY

145 (2)

EDITOR-IN-CHIEF

Alma Bekbotayeva, PhD, associate professor, Geology and Petroleum Engineering Institute of Satbayev University, Kazakhstan

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Kanai Rysbekov, candidate of technical sciences, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Vasyl Lozinskyi, PhD, associate professor, National TU Dnipro Polytechnic, Ukraine

MANAGING EDITOR

Gulziya Burshukova, PhD, associate professor, Satbayev University, Kazakhstan

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

Ata Akçil, PhD, professor, Suleyman Demirel University, Turkey

Adilkhan Baibatsha, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, Geology and Petroleum Engineering Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Atac Bascetin, PhD, professor, Istanbul Technical University, Turkey

Madina Barmenshinova, candidate of technical sciences, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Omirsirik Baigenzhanov, PhD, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Tatiana Chepushtanova, PhD, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, habilit.doctor, professor, Adam Mickiewicz University, Poland

Serik Moldabaev, doctor of technical sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Brajendra Mishra, PhD, professor, Worcester Polytechnic Institute, USA

Suping Peng, professor, academician, Chinese Mining University, China

Reimar Seltsmann, PhD, professor, The Earth Sciences Department, Center for Russian and Central Asian Mineral Research (CERCAMS), Great Britain

Atsushi Shibayama, PhD, professor, Akita University, Japan

Olena Sdvizhkova, doctor of technical sciences, professor, National TU Dnipro Polytechnic, Ukraine

Khalidilla Yusupov, doctor of technical sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

БАС ҒЫЛЫМИ РЕДАКТОР

Алма Бекботаева, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Геология және мұнай-газ ісі институты, Қазақстан

БАС ҒЫЛЫМИ РЕДАКТОРДЫҢ ОРЫНБАСАРЛАРЫ

Қанай Рысбеков, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Василий Лозинский, PhD, қауымдастырылған профессор, «Днепр политехникасы» Ұлттық техникалық университеті, Украина

ЖАУАПТЫ ХАТШЫ

Гулзия Буршукова, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Қазақстан

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА МҮШЕЛЕРІ

Ata Akçil, PhD, профессор, Сүлейман Демирел Университеті, Түркия

Әділхан Байбатша, г-м.ғ.д., профессор, Satbayev University Геология және мұнай-газ ісі институты, Қазақстан

Atac Bascetin, PhD, профессор, Ыстамбұл техникалық университеті, Түркия

Мадина Барменшинова, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Өмірсерік Байгенженов, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Татьяна Чепуштанова, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, хабилит.доктор, профессор, Адам Мицкевич Университеті, Польша

Серік Молдабаев, т.ғ.д., профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Brajendra Mishra, PhD, профессор, Вустер политехникалық институты, АҚШ

Suping Peng, профессор, академик, Қытай тау-кен университеті, ҚХР

Reimar Selmann, PhD, профессор, Жер туралы ғылымдар бөлімі, Ресей және Орта Азия минералды зерттеулер орталығы (CERCAMS), Ұлыбритания

Atsushi Shibayama, PhD, профессор, Akita University, Жапония

Олена Сдвижкова, т.ғ.д., профессор, «Днепр политехникасы» Ұлттық техникалық университеті, Украина

Халидилла Юсупов, т.ғ.д., профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

ГЛАВНЫЙ НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

Алма Бекботаева, PhD, ассоц.профессор, Институт геологии и нефтегазового дела Satbayev University, Казахстан

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

Канай Рысбеков, к.т.н., ассоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Василий Лозинский, PhD, ассоц.профессор, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Украина

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Гулзия Буршукова, PhD, ассоц.профессор, Satbayev University, Казахстан

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Ata Akçil, PhD, профессор, Университет Сулеймана Демиреля, Турция

Адилхан Байбатша, д.г-м.н., профессор, Институт геологии и нефтегазового дела Satbayev University, Казахстан

Atac Bascetin, PhD, профессор, Стамбульский технический университет, Турция

Мадина Барменшинова, к.т.н., Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Омирсерик Байгенженов, PhD, ассоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Татьяна Чепуштанова, PhD, ассоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, хабилит.доктор, профессор, Университет Адама Мицкевича, Польша

Серик Молдабаев, д.т.н., профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Brajendra Mishra, PhD, профессор, Вустерский политехнический институт, США

Suping Peng, профессор, академик, Китайский горнопромышленный университет, КНР

Reimar Seltsmann, PhD, профессор, Отдел Наук о Земле, Центр Российских и Среднеазиатских Минеральных Исследований (CERCAMS), Великобритания

Atsushi Shibayama, PhD, профессор, Akita University, Япония

Олена Сдвижкова, д.т.н., профессор, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Украина

Халидилла Юсупов, д.т.н., профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i2.01>

Physical and chemical studies of finely-dispersed slurry tailings of the Donskoy Ore Mining and Processing Plant (DMPP) for chemical beneficiation to produce chromium concentrate

Ye.A. Tastanov¹, N.Kh. Serzhanova¹, N.M.-K. Sadykov¹, Zh.A. Yerzhanova¹, A.Ye. Tastanova^{1,2*}

¹Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: tastanova.aisha.27.02@gmail.com

Abstract. During the processing of chromium ores, chromite concentrate is obtained for the production of ferrochrome, and waste is also collected - tailings beneficiation. Fragment and sludge tailings depending on the beneficiation technology.

Finely dispersed sludge tailings of the Donskoy MPP of Kazchrome JSC are stored at the Dubersay and Akzhar tailings, which are man-made deposits (MMD) or man-made mineral formations (MMF). To develop a technology for processing sludge tailings, which contain up to 30% chromium oxide, their physical and chemical studies were carried out. According to the chemical analysis of sludge tailings, it follows that research should be directed to the removal of magnesium and silicon oxides, thereby increasing the content of chromium oxide to a standard chromium concentrate. A very thin dissemination of chromite with minerals of host rocks necessitates additional grinding of intermediate products, which are intergrowths of chromite with waste rock. According to the results of fractional analysis and IR spectroscopy, the content of a large number of flocculants in the studied sludge tailings and a large number of particles with a particle size of less than 20 µm, which, in heavy liquid solutions, due to its small size, is in suspension and does not stratify, was revealed. According to the granulometric composition, it was determined that the sludge minus 0.071 mm must also be classified into 0.04 and 0.02 mm and enriched each class separately.

It has been established that in order to obtain high technological performance, the traditional gravitational beneficiation scheme used at the DMPP is technologically cumbersome, because includes operations of flocculant disintegration, classification, grinding, beneficiation on concentration tables of each size class, regrinding of intermediate products. The results of the physicochemical study of chromium sludge tailings showed the need for a combined beneficiation scheme, including chemical enrichment with finishing of chromium concentrate by gravity beneficiation.

Keywords: *slurry tailings, mineralogical analysis, granulometric analysis, fractional analysis, chromium oxide.*

1. Introduction

At present, the technologies for gravity concentration of fine chromium raw materials used in the chrome industry are not sufficiently effective; therefore, it is required to improve process flows with the use of new advanced technological methods.

The long-term development of ore deposits associated with mining, concentration and smelting results in the accumulation of large amounts of waste in the form of stockpiled tailings and metallurgical slags, waste dumps of substandard ores and host rocks, industrial effluents, forming large-scale waste dumps and water settling ponds, i.e. technogenic mineral formations (TMF) [1-4].

Donskoy MPP (Kazchrome JSC, Aktobe region) has tailings mineral resources accumulated during its operation and subject to re-processing in the amount of about 0.4 million tonnes per year at the slurry tailings processing sites of Kazchrome JSC. Calculation of tailing mineral resources of the Donskoy MPP as of January 1, 2018, 2.2 million tons were considered with a content of 27.65% Cr₂O₃, which in terms of Cr₂O₃ is 0.6 million tons [5].

These reserves of technogenic mineral formations are comparable with natural deposits under the content of valuable components and represent an additional source of useful components, giving an increase in technical and economic parameters.

The main methods used to process chromite ores are gravity concentration processes. The Donskoy MPP uses settling and heavy medium ore minerals concentration processes to produce lumpy concentrate and beneficiation of fine grades in screw separators with the concentrate transferred to pelletizers to produce pellets [6-10].

Currently, poor chromite ores from different parts of the deposit and technogenic waste dumps are involved in processing; these ores can serve as additional sources of raw materials. The processing of slurry tailings from the Dubersay and Akzhar tailings storage facility is not sufficiently efficient, since the processing scheme includes a sequential classification scheme and beneficiation on screw separators, slurry concentration tables are used in the end of the scheme, and the flotation method of beneficiation is also experienced. The existing tailings concentration scheme is complex and does not consider the main principles of gravity concentration [11-19].

The main area of chromium and ferrochromium application is the smelting of alloyed steels, chromium bronzes and cast irons of special alloys. Corrosion-resistant steels and alloys can contain up to 30-40% Cr. The addition of up to 3% Cr to conventional carbon steels significantly improves their mechanical properties [20-22]. Steels containing 5-6% Cr are characterized by increased corrosion resistance. Steels undertake high corrosion resistance at 10% chromium content. According to a report from the U.S. Geological Survey, the world's chromium resources are concentrated in Kazakhstan, South Africa and India, which produce the bulk of the world's ferrochromium. The analysis of prices for ferrochrome suggests that all grades of ferrochromium are in demand and their prices are growing at a fairly high rate.

In this regard, it became necessary to perform study on the physical and chemical properties of fine sludge tailings for more efficient concentration and recovery of chromium oxide Cr_2O_3 .

2. Materials and methods

2.1 Materials

Three process samples of slurry tailings from the Donskoy MPP were tested to study the chemical composition:

- Dubersai slurry tailings (big bag 1);
- Dubersai slurry tailings (big bag 2)
- Akzhar slurry tailings (big bag 3)

Samples No. 1 and No. 2 were represented by fine material in the form of slurry sands with a maximum particle size of 2 mm; Sample No. 3 included several pieces of 10 mm in the slurry material scooped up with the soil during sampling from the tailing's storage facility. Therefore, large grades of +1 mm were discarded prior to study as their presence reduced the Cr_2O_3 content in the original sample. The weight of each sample was 500 kg.

2.2 Methods of analysis

Methods of analysis: X-ray experimental data were obtained on a BRUKER D8 ADVANCE of BRUKER AXS GmbH (Germany) with the use of Cu-K radiation PDF2 International Center for Diffraction Data ICDD (USA) at an accelerating voltage of 36 kV, current of 25 mA. X-ray fluorescence analysis was performed on an AxiosPANalytical wave dispersion spectrometer (Holland).

Chemical analysis of the samples was performed on an Optima 8300 DV inductively coupled plasma optical emission spectrometer (USA, Perkin Elmer Inc.). Mineralogical analysis was performed with a Leica DM-2500M polarization microscope in reflected light and a binocular magnifying glass with photography. Infrared spectroscopy was performed on an Avatar 370 Csi FTIR spectrometer.

3. Results and discussion

3.1 Chemical composition of sludge tailings from the Donskoy MPP

Three process samples of slurry tailings from the Donskoy MPP were studied. The samples were represented by fine material in the form of sludge with a maximum particle size of several pieces of 10 mm. The chemical composition of the sludge tailings was studied in the course of research.

The results of passport data of chemical analysis of samples of sludge tailings of the tailings of Dubersay and Akzhar of the Donskoy MPP are presented in Table 1.

Table 1. Chemical composition of original tailings according to Data Sheet for Samples

Sample	Mass fraction of elements, %						
	Cr_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	S_{total}
Data Sheet for Sample No. 413 Dubersai	32.34	18.20	5.07	0.52	27.17	9.11	0.042
Data Sheet for Sample No. 414 Akzhar	29.26	18.98	5.69	0.47	28.17	9.69	0.031

The results of X-ray fluorescence analysis (elemental composition, semi-quantitative) are given for three samples in Table 2.

Table 2. Results of X-ray fluorescence analysis

Element	Content, %		
	Sample No. 1	Sample No. 2	Sample No. 3
O	41.576	45.872	46.996
Na	0.105	0.078	0.094
Mg	17.898	17.182	18.222
Al	1.450	1.379	1.112
Si	11.576	10.879	12.317
P	0.008	0.012	0.005
S	0.054	0.045	0.060
Cl	0.113	0.059	0.071
Ca	0.448	0.380	0.227
Ti	0.096	0.066	0.070
V	0.020	0.018	0.010
Cr	18.544	17.145	12.613
Fe	6.101	5.425	4.789
Co	0.020	0.014	0.012
Ni	0.241	0.218	0.194
Zn	0.014	0.016	0.009
Cr_2O_3	27.859	27.108	20.189

The chemical analysis showed chromium oxide content in original tailings from Dubersai tailings storage facility (samples No.1 and No.2) at the rate of 29-35%, and chromium oxide content in original tailings from Akzhar tailings storage facility - 20-23% that is connected with Kempirsai deposit development year and beneficiation technology of the Donskoy GOK and as consequence the stockpiling location in Dubersai or Akzhar tailings storage facilities.

The average chromium oxide content based on chemical analysis of accumulated sludge tailings at tailings storage facilities ranges from 20% to 35%.

According to the chemical composition in the sludge tailings of the Donskoy GOK, waste rock is represented mainly by silicon oxide 18.20-18.98% and magnesium oxides 27.17-28.17%. In a smaller amount, iron oxides 9.11-9.69% and aluminum oxides 5.09-5.69%. The total sulfur content is negligible.

According to the chemical analysis, it follows that it is necessary to direct research on the removal of magnesium and silicon oxides, thereby increasing the content of chromium oxide to a standard chromium concentrate.

3.2 X-ray phase analysis of slurry tailings

The results of the X-ray phase analysis are shown in Table 3, the diffractogram is shown in Figure 1.

Table 3. Results of semi-quantitative X-ray diffraction analysis

Name of the mineral	The formula	Concentration, %
Lisardite	$Mg_3(Si_2O_5(OH)_4$	57.4
Magnesiochromite	$(Mg,Fe)(Cr,Al)_2O_4$	33.2
Apophyllite	$KFCa_4Si_8O_{20}(H_2O)_8$	7.1
Chlorite	$(Mg,Fe)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	2.3

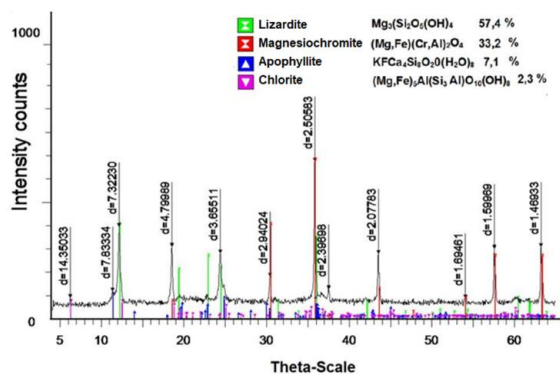


Figure 1. Diffractogram of slurry tailings

3.3 Mineralogical studies

The material composition of the tailings was studied with a Leica DM-2500M polarisation microscope in indirect light and with a binocular magnifier and photography. Polished sections were made by sealing the slurries in epoxy resin and then by their polishing in order to study the mineral composition of the ore under the microscope.

The mineralogical composition was studied at two size classes +0.071 mm and - 0.071+0.0 mm.

Mineralogical description of slurry tailings from Dubersai tailings storage facilities. Sample 1 (polished section 1/17, press.) of -0.071+0.0 mm fraction. When it was studied with a binocular magnifier, it can be seen that the ore is represented with a fine-grained aggregate consisting of a dusty grayish-brown mass and resin- black grains (probably chromspinelides) with the size of 0.025-0.071 mm (Figure 2).

Chromspinelide shots of about 10-20% were observed in the reflected light under a microscope (in the profile of the polished section, Sample 1). The shape of the grains was irregular, sharp, sometimes elongated, needle-shaped, with 0.035 to 0.07 mm grain size, in rare cases up to 0.21 mm. The colour in reflected light was greyish-white, isotropic (Figure 3).

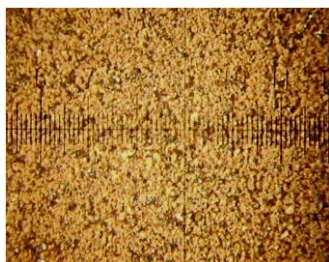


Figure 2. Micrograph of -0.071 mm chromite ore: -0.071+0.0 fraction; bin. magnifier, 1 div. = 0.025 mm; polished section 1/17 (press.)

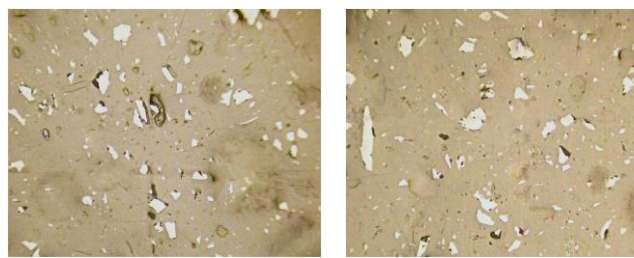


Figure 3. Micrograph of -0.071 mm chromite ore (Sample No. 1). Chromspinelide grain shots (white) in amorphous non-metallic mass (polished section 1/17 (press.), magn. 72)

A few grains up to 0.007 mm in size, light yellow, highly reflective, oval in shape with jagged edges (possibly sulphides) were found.

When Sample 2 with +0.071 mm fraction (polished section 2/17, press.) was studied under a binocular magnifier, a non-uniform composition of the sample, along with the main grain mass of relatively the same size, lumpy formations of larger size could be observed after sifting from dust particles. The main ore mass consists of lisardite grains, a layered silicate of serpentine group, greenish-gray in color, in the form of hidden crystalline mass or fine-grained aggregates.

The main ore mineral was chrompicotite, a magnesian variety of chromspinelides, observed as irregular, sharp-angled grains in the form of spherical segregations - modules (Figure 4b).

Octahedral crystals were rare. The colour was black to brownish black. The luster was metallic to greasy. Grains of apophyllite, a mineral from the group of hydromicas, pale green to yellowish-brown, were not uncommon. There were single flake-shrouded grains of yellowish-green chlorite, calcite, and fluorite (Figure 4a).

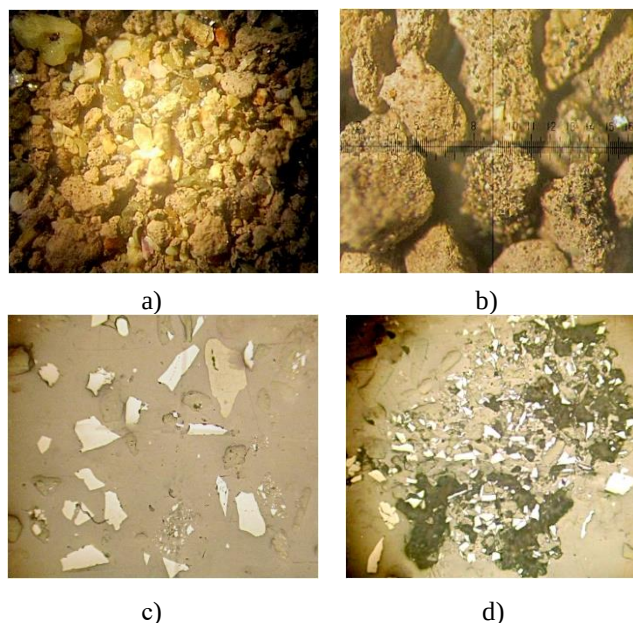


Figure 4. Micrograph of +0.071mm chromite ore (Sample No. 2): a - chromite ore of +0.071 fraction; b - hedgehog-like lumps with inclusions of chrompicotite grains (b) (bin. magnifier, 1 div. = 0.025mm) c - grains of chrompicotite (white) and chlorite (brownish-grey); d - hedgehog-like formations of lisardite with chrompicotite inclusions (white), polished section 2/17 (press.), magn.72

Besides the grains of relatively equal size, the ore contains hedgehog-like, semi-oval, greenish-grey formations, probably composed of a dense, fine-grained lisardite aggregate with brownish-grey chrompicotite inclusions. The size of these formations ranges from 0.25 to 1.0 mm, sometimes up to 2.0 mm. Chrompicotite inclusions range from 0.025 to 0.12 mm.

Irregularly shaped chrompicotite grains ranging in size from 0.07 to 0.24 mm, and chlorite grains, leaf-shaped, brownish-gray in colour with whitish-green internal reflexes were observed under the microscope in reflected light. Hedgehog-like, elongated lysardite formations with 0.2 mm chromspinelite inclusions were in the lower part of the polished section. Figure 5b shows a dense lysardite aggregate, 1.6 mm in size, with inclusions of chrompicotite grains, elongated, rectangular in shape, 0.05 mm in size.

The following conclusions were made based on the analysis of the original chromite tailings. The mineral composition of the slurry tailings, according to X-ray diffraction analysis and mineralogical studies, was represented by the following minerals: lisardite - 57.4%, magnesiochromite or chrompicotite - 33.2%, apophyllite - 7.1%, chlorite - 2.3%, olivine, fluorite.

A very thin dissemination of chrompicotite with minerals of host rocks necessitates additional grinding of intermediate products, which are intergrowths of chromite with waste rock. The regrinding process in the enrichment scheme is the most energy-consuming and leads to an increase in the cost of chromium concentrate.

3.4 Fractional analysis of slurry tailings

Fractional analysis by specific gravity was performed according to the method specified in paper [23]. Theoretically possible parameters of gravitational concentration of different size classes were determined by their stratification in «M-45» heavy liquid solutions into fractions with the density of more than 3.000 kg/m³, less than 3.000 kg/m³ and more than 2.850 kg/m³, less than 2.850 kg/m³. The resulting density fractions were washed from heavy liquid solutions, dried, weighed, and abraded for chemical analysis sampling. Fractional analysis was performed for particle size classes above 0.071 mm and below 0.071 mm. The coarseness class greater than 0.071 mm was stratified by a density of 3.000 kg/m³. The results of the fractional analysis are shown in Table 4.

Table 4. Fractional composition and distribution of chromium oxide content

Density fractions, kg/m ³	Output, % of		Cr ₂ O ₃ content, %	Extract from ore, %	Extract from class, %	Size class
	classes	ores				
+3.000	14.38	3.49	46.26	5.84	34.72	+0.071 mm class
-3.000	85.62	20.76	14.61	11.00	65.28	
Total	100.0	24.25	19.16	16.84	100.0	
+2.850	10.55	7.99	47.18	13.66	16.43	-0.071 mm class
-2.850	89.45	67.76	28.31	69.50	83.57	
Total	100.0	75.75	30.30	83.16	100.0	
Slurry tailings	-	100.0	27.60	100.0	-	+0.071-0.0 mm class

It follows from results of fractional analysis (Table 4) that it is possible to obtain heavy concentrate fraction in 3.49% of original raw material with chrome oxide content of 46.26% at

5.84% of original raw material recovery from +0.071 mm size class.

The heavy concentrate fraction with a chrome oxide content of 47.18% and recovery of 13.66% of the original raw material can be obtained from the -0.071 mm coarseness grade.

The poor technological results of the fractional analysis can be explained as follows:

- The large amount of flocculation agents in the sludge studied, i.e. the presence of cohesive chromium minerals and waste rock particles;

- The large number of particles below 20 µm suspended in heavy liquid solutions due to their small size and not stratified.

In practice, slurry parts of tailings in gravity concentration create a turbid environment and prevent the separation of coarse particles, so such feedstock must be divided into narrow size classes and further concentrated separately in each class.

3.5 Granulometric composition of slurry tailings

The granulometric analysis of DMPP slurry tailings based on sample data is shown in Table 5. The granulometric composition of slurry tailings was studied according to the methods [24-26] before the studies intended to determine their beneficiation. Due to the fact that the tailings were represented by fine slurry particles, the particle size distribution of tailings must be determined by sedimentation analysis (weeding method based on particles falling velocity in aqueous medium into the following size classes 0.071-0.041 mm, 0.041-0.020 mm, 0.020-0.010 mm and less than 0.010 mm).

The chrome slurries received for testing were subject to wet sieving (washing) on a 0.071 mm (71 micron) sieve. Table 6 shows the results of washing on a 0.071 mm sieve.

Table 5. Granulometric composition of slurry tailings according to Data Sheet for Sample

Size class, mm	Sample No. 413 Dubersai		Sample No. 414 Akzhar	
	Yield, %	Cr ₂ O ₃ content, %	Yield, %	Cr ₂ O ₃ content, %
+20	0.1	1.2	-	-
-20+16	0.1	1.2	-	-
-16+13	0.3	2.1	-	-
-13+10	0.3	4.9	-	-
-10+5	2.0	2.0	1.0	3.8
-5+3	1.1	6.3	0.6	3.8
-3+2	0.9	10.1	14.2	10.4
-2+1	0.9	10.1	5.4	16.7
-1+0.5	0.6	5.3	10.5	13.7
-0.5+0.2	1.8	17.4		
-0.2+0.071	9.0	35.7	24.3	29.6
-0.071+0.040	14.3	43.4	22.2	41.0
-0.040+0.026	10.8	45.5	9.8	43.0
-0.026	57.5	30.1	21.9	27.0
Total	100.0	32.34	100.0	29.26

Table 6. Results of wet sieving of slurry tailings

Name	Yield, %	Cr ₂ O ₃ content, %	Cr ₂ O ₃ distribution, %
Class + 0.071 mm	24.25	19.10	16.77
Class - 0.071 mm	75.75	30.55	83.23
Total	100.0	27.77	100.0

The results of the slurry tailings classification showed that the main amount of chromium oxide was concentrated in the particle size class less than 0.071 mm. The yield of this particle size class -0.071 mm was 75.75%, with a chromium

oxide content of 30.55% with a distribution of Cr_2O_3 83.23%.

According to the granulometric composition, it is clear that the sludge minus 0.071 mm must also be classified into 0.04 and 0.02 mm and enriched each class separately. In production, it is very difficult to carry out such a fine classification of sludge. This means that the enrichment of sludge by standard gravity processes is difficult.

3.6 Flocculation agent disintegration study

When sedimentation analysis was performed for the tailing's samples, it was determined that the Donskoy MPP tailings received for research are treated with large amounts of organic flocculation agents which are very strongly adsorbed on the surface of mineral particles.

Flopam FW 926 flocculation agent which has high settling properties for thickening, is used at the DMPP. This agent is characterized in Table 7.

A flocculation agent is used for rapid thickening of the fine chromium slurry fractions in the tailings feeding process to tailing storage facility [27]. The approved flocculation agent consumption rate at Donskoy MPP is 0.07 kg per ton of slurry tailings. But a turbid discharge is formed due to poor operation of thickeners at slurry tailings and discrepancy between the volume of tailings and the thickening area. Such discharge is clarified by increased flocculation agent consumption at the plant. It was adversely affected by the tests, as the flocculus formed from the chromite grains and the waste rock prevented their separation.

Three samples were analyzed with IRS for polymers and organics.

Table 7. Flopam FW 926 flocculation agent characteristic

Name	Parameters
Chemical compound	Acrylamide and sodium acrylate copolymer
Appearance	White powder
Ionicity	Anionic
Molecular weight	Medium
Brookfield viscosity, cP	
5.0 g/dm ²	1,600
2.5 g/dm ²	600
1.0 g/dm ²	200
Granulometry	
% of particles > 10mesh (2mm)	No more than 2
% of particles > 100mesh (0.15mm)	No more than 6
Recommended working concentration, g/dm ² , %	0.05
Maximum concentration, g/dm ² , %	0.5
Dissolution time in distilled water at a concentration of 5g/dm ² and t=25°C, min	90
Solution stability in distilled water, days	1

The results of the IRS analysis of the samples:

IR method: Spectra were obtained on an Avatar 370 CsI FT-IR spectrometer in the spectral range 4.000-400 cm^{-1} from tablet preparations obtained by pressing 2 mg of sample with 200 mg of KBr. Experiment attachment: Transmission E.S.P

Sample 1, (Figure 5).

The sample contained a Brugnatellite type compound - $\text{Mg}_6\text{Fe}(\text{CO}_3)(\text{OH})_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 3.687, 3.650, 1.429, 1.077, 1.015, 956, 551, 439 cm^{-1} .

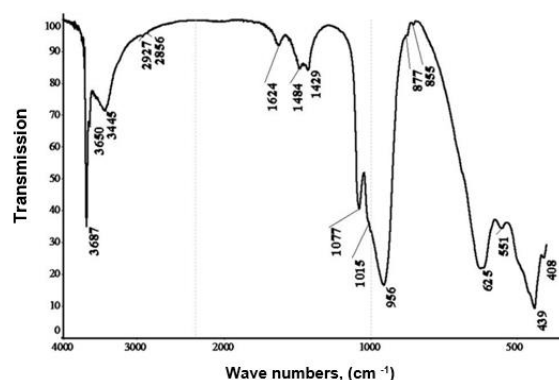


Figure 5. Infrared spectrum of sample 1

Group $[\text{CO}_3]_2$ - 1.484, 1.429, 877, 855 cm^{-1} .

The band with a maximum at wave number 625 cm^{-1} fell into the region of Fe^{3+} - O bonding in silicates and carbonates.

Valence vibrations $\nu(\text{OH})$ – 3.445 cm^{-1} and strain vibrations δHOH -1.624 cm^{-1} of water molecules.

The absorption bands of the valence vibrations of the methylene groups νCH_2 – 2.927, 2.856 cm^{-1} .

Sample 2, (Figure 6).

The sample contained Brugnatellite type compound - $\text{Mg}_6\text{Fe}(\text{CO}_3)(\text{OH})_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 3.684, 3.646, 1.431, 1.078, 1.015, 957, 551, 440 cm^{-1} .

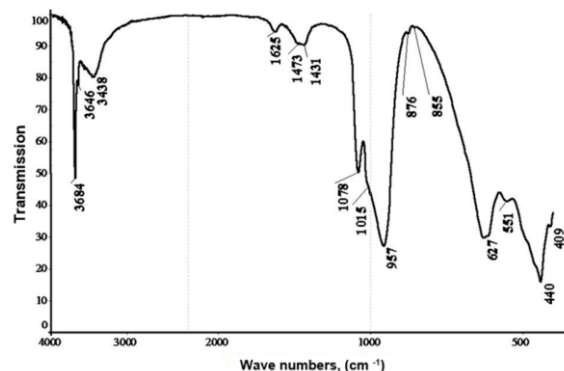


Figure 6. Infrared spectrum of sample 2

Group $[\text{CO}_3]_2$ - 1.473, 1.431, 876, 855 cm^{-1} .

The band with a maximum at wave number 627 cm^{-1} fell into the region of Fe^{3+} - O bonding in silicates and carbonates.

Valence vibrations $\nu(\text{OH})$ – 3.438 cm^{-1} and strain vibrations δHOH -1.625 cm^{-1} of water molecules.

Sample 3, (Figure 7).

The sample contains BRUGNATELLITE type compound - $\text{Mg}_6\text{Fe}(\text{CO}_3)(\text{OH})_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 3.687, 3.650, 1.430, 1076, 1016, 955, 557, 440 cm^{-1} .

Group $[\text{CO}_3]_2$ - 1.489, 1.430, 876, 855 cm^{-1} .

The band with a maximum at wave number 614 cm^{-1} fell into the region of Fe^{3+} - O bonding in silicates and carbonates.

Valence vibrations $\nu(\text{OH})$ – 3.437 cm^{-1} and strain vibrations δHOH -1.624 cm^{-1} of water molecules [27, 28].

Figure 8 compares the spectra which show the varying content of carbonate, oxide and possibly silicate phases in Samples 2, 3 and 4.

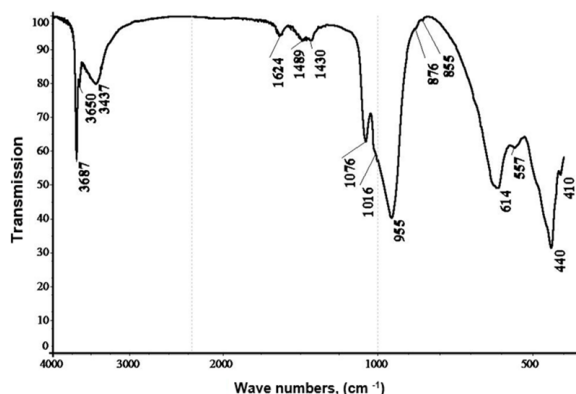


Figure 7. Infrared spectrum of Sample 3

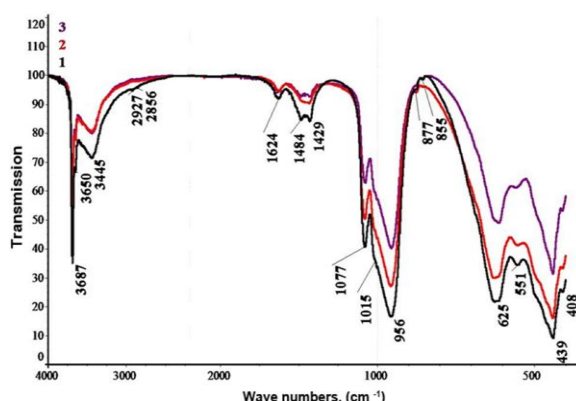


Figure 8. Infrared spectra in Samples 1, 2 and 3

According to IR spectroscopy, the organic part of the flocculants is identified by absorption bands of stretching vibrations of methylene groups ν CH_2 - 2927, 2856 cm^{-1} , which indicates the adsorption of flocculants on the surface of fine particles of tailings. In this regard, tests were performed on various options to repulp slurry tailings in order to remove flocculation agents from the surface of the test material or to destroy existing flocs. The following tests, shown in Figure 9, were performed.

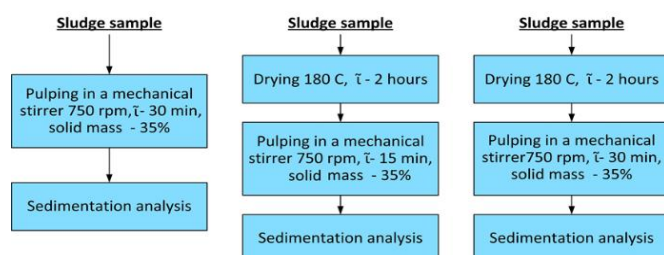


Figure 9. Preparation of slurry tailings for sedimentation analysis

Sedimentation analysis was performed after the above-mentioned repulping types. The results of all tests showed rapid and simultaneous settling of all solids. Sedimentation took place within 5-6 seconds with the formation of a clear drain.

All tests effectively remove the flocculation agent from the surface of the slurry particles. It is economical to use the mechanical method in agitator vats or scrubber drums in production.

4. Conclusions

Physical and chemical studies of the finely-dispersed slurry tailings of the Dubersai and Akzhar tailings storage facility of the Donskoy MPP showed:

1. The mineral composition of the slurry tailings, according to X-ray diffraction analysis and mineralogical studies, is represented by the following minerals: lizardite - 57.4%, magnesiochromite or chrompicotite - 33.2%, apophyllite - 7.1%, chlorite - 2.3%, olivine, fluorite. Waste rock minerals have many minerals containing magnesium which can be isolated by chemical concentration methods.

2. A very thin dissemination of chrompicotite with minerals of host rocks necessitates additional grinding of intermediate products, which are intergrowths of chromite with waste rock. The regrinding process in the enrichment scheme is the most energy-consuming and leads to an increase in the cost of chromium concentrate.

3. According to the fractional analysis the gravity extraction of chromium oxide from the fine particle size classes is difficult.

4. Based on the particle size distribution it was found that chromium oxides are concentrated mainly in the fine particle size classes. Of the very fine particle classes of slurry tailings, gravity concentration is not effective on screw separators and concentration tables without prior classification of the tailings.

5. Waste rock minerals (magnesium, aluminium, silicon, etc.) are effectively leached from the finely-dispersed slurry tailings to produce a rich chrome product.

6. Chemical concentration eliminates the operations of flocculation agent disintegration, the classification of original tailings into size classes and the grinding of intermediate products. These operations increase the complexity of the apparatus chain and lead to an increase in operating and capital costs.

7. Based on the above studies of chrome slurry tailings from the Donskoy MPP, the conclusion is that it is necessary to conduct concentration studies with the use of combined concentration methods: chemical concentration that leaches out the waste rock minerals and gravity concentration to bring the chrome product to conditioned chrome concentrate.

Conflict of interest

The corresponding author declares that there is no conflict of interest on the part of all authors.

Funding

The research was conducted with the financial support of the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under grant №. AP09259594.

References

- [1] The Republic of Kazakhstan's Mining and Metallurgy Master Plan until 2030. Astana. Retrieved from: <https://kapital.kz/economic/4765/v-rk-razrabotayut-master-plan-razvitiya-gorno-metallurgicheskogo-kompleksa.html>
- [2] Bespaev, H.A., Kayupov, S.K. & Parilov, Yu.S. (2000). Technogenic mineral raw materials of ore deposits of Kazakhstan: the reference book. Almaty: Information and Analytical Center of Geology and Mineral Resources of the Republic of Kazakhstan

- [3] Code of the Republic of Kazakhstan. (2017). Law of the Republic of Kazakhstan No. 125-VI «On Subsoil and Subsoil Use». Retrieved from: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1700000125>
- [4] Competent Person's Report (2017). RK Consulting (UK) Limited - Kazchrome JSC. Retrieved from: https://kase.kz/files/emitters/KZCR/kzcr_subsoil_user_report.pdf
- [5] Rama Murthy, Y., Sunil Kumar Tripathy, Raghu Kumar, C. (2011). Chrome ore beneficiation challenges & opportunities - A review. *Minerals Engineering*, 24(5), 375-380. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.12.001>
- [6] Kuldeyev, E.I., Bondarenko, I.V. & Temirova, S.S. (2020). Promising ways to increase raw material base of the chrome industry of the metallurgical industry of the Kazakhstan. *Complex Use of Mineral Resources*, 2(313), 64-70. <https://doi.org/10.31643/2020/6445.19>
- [7] Bondarenko, I.V., Tastanov, Y.A., Sadykov, N.M. & Ismagulova, M.S. (2018). Processing of mineral part of refined ferrochrome slags to obtain pelleted porous heat insulator. *Complex Use of Mineral Resources*, (4), 158-164. <https://doi.org/10.31643/2018/6445.42>
- [8] Bondarenko, I.V. & Tastanov, Ye.A. (2018). Obtaining complex pellets from fine chrome concentrates, refined ferrochrome slag and diatomite raw materials of Kazakhstan. *Metallurg*, (12), 20-23
- [9] Bondarenko, I.V. & Tastanov, Ye.A. (2019). Obtaining Multi-Component Pellets from Finely Dispersed Chromium Concentrates Refined Ferrochrome Slags and Diatomite Raw Materials of Kazakhstan. *Metallurgist*, 1213-1218
- [10] Bondarenko, I.V., Tastanov, Ye.A. & Sadykov, N.M.-K. (2019). Preparation of complex pellets from fine chrome concentrates, refined ferrochrome slag and diatomite raw materials of Kazakhstan. *Proceedings of the XII Congress of the CIS Beneficiators, Moscow*
- [11] Yedilbayev, A.I. (2012). Rationale for the concept of development of substandard ores and technogenic deposits in Kazakhstan on the basis of modern efficient concentration technologies, *Almaty*
- [12] Ultarakova, A.A., Karshigina, Z.B., Lokhova, N.G., Yessengaziyev, A.M., Kassymzhanov, K.K. & Tolegenova S.S. (2022). Extraction of amorphous silica from waste dust of electrowinning of ilmenite concentrate. *Metallurgija*, 61(2), 377-380
- [13] Abdykairova, G., Temirova, S., Kuldeyev, E., Tastanova, A., Bondarenko, I., Semushkina, L. (2022). A study on the beneficiation ability of manganese-containing technogenic raw materials. *Metallurgija*, 61(1), 265-268
- [14] Koyzhanova, A.K., Kenzhaliev, B.K., Magomedov, D.R. & Abdylbaev, N.N. (2021). Development of a combined processing technology for low-sulfide gold-bearing ores. *Obogashchenie Rud*, (2), 3-8. <https://doi.org/10.17580/or.2021.02.01>
- [15] Leonov, S.B., Belkova, O.N. (2001). Investigation of minerals for concentrability. *Moscow: Irkredmet Engineering*
- [16] Ultarakova, A.A., Yessengaziyev, A.M., Kuldeyev, E.I., Kassymzhanov, K.K. & Uldakhanov, O.K. (2021). Processing of titanium production sludge with the extraction of titanium dioxide. *Metallurgija*, 60 (2021) 3-4, 411-414
- [17] Abdulvaliyev, R.A., Abdykairova, G.Zh., Dyussenova, S.B. & Imangaliyeva, L.M. (2017). Concentration of chromite-containing slurries. *Obogashchenie rud*, (6), 15-19. <https://doi.org/10.17580/or.2017.06.03>
- [18] Gazaleyeva, G.I., Shikhov, N.V., Vlasov, I.A. & Shigayeva, V.N. (2017). Development of a technology for additional concentration of chromite tailings of the Donskoy GOK. *Obogashchenie rud*, (2), 16-20. <https://doi.org/10.17580/or.2017.02.03>
- [19] Yangitilavova, B.N., Agibayeva, D.N., Imekeshova, M.A. & Tusbayev, B.N. (2021). Development of flotation technology for additional extraction of chrome from buried tailings. *Problems of subsoil development in XXI century through the eyes of young 15 international Scientific School of Young Scientists and Specialists*
- [20] Eric, R.H. (2014). Chapter 1.10 - Production of Ferroalloys. *Treatise on Process Metallurgy*, (3), 477-532. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00005-5>
- [21] Panichkin, A.V., Korotenko, R.Yu., Kenzhegulov, A.K., Kshibekova, B.B. & Alibekov, Zh.Zh. (2022). Porosity and non-metallic inclusions in cast irons produced using a high proportion of scrap. *Complex Use of Mineral Resources*, 323 (4), 68-76. <https://doi.org/10.31643/2022/6445.42>
- [22] Mihail, I. Gasik. (2013). Chapter 8 - Technology of Chromium and Its Ferroalloys. *Handbook of Ferroalloys. Theory and Technology*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097753-9.00008-3>
- [23] Shokhin, V.N., Lopatin, A.G. (1980). Gravitational enrichment methods. *M.: Nedra*
- [24] Temirova, S., Abdykairova, G., Kuldeyev, E., Tastanov, E., Bondarenko, I. & Motovilov, I. (2022). On the possibility to obtain manganese concentrate from manganese-containing tailings. *Metallurgija*, 61(2), 321-324
- [25] Leonov, S.B., Belkova, O.N. (2001). Investigation of minerals for concentrability. *Moscow: Irkredmet Engineering*
- [26] Lavrinenko, A.A., Kunilova, I.V., Golberg, G.Yu., Rezchikova, P.S. & Komarova, S.G. (2021). Theoretical substantiation of measuring the concentration of flocculation agents in process water of concentration plants. *Problems of subsoil development in XXI century through the eyes of young 15 International Scientific School of Young Scientists and Specialists*
- [27] Averko-Antonovich, I.Yu., Bikhmullin, R.T. (2002). Methods of investigation of polymer structure and properties. *Kazan National Research Technological University, Kazan*
- [28] Tarashevich, B.N. (2012). IR spectra of the main classes of organic compounds. Reference materials. *Moscow*

Дөң КБК-ның ұсақ дисперсті шлам қалдықтарының байыту шарттарын анықтау үшін физикалық-химиялық зерттеулері

Е.А. Тастанов¹, Н.Х. Сержанова¹, Н.М.-К. Садықов¹, Ж.А. Ержанова¹, А.Е. Тастанова^{1,2*}

¹Металлургия және кен байыту институты, Алматы, Қазақстан

²Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: tastanova.aisha.27.02@gmail.com

Аңдатпа. Хром кендері нөңдеу кезінде феррохромды өндіру үшін хромит концентраты алынады, сонымен қатар байыту қалдықтары пайда болады. Байыту технологиясына байланысты кесек және шламды қалдықтар пайда болады.

АҚ "Қазхром" Дөң КБК-нің жұқа дисперсті шламды қалдықтары техногендік кен орындары (ТКО) немесе техногендік минералды түзілімдер (ТМТ) болып табылатын Дуберсай және Ақжарқалдық қоймаларында жиналады. Құрамында 30%-ға дейін хром оксиді бар шламды қалдықтарды өңдеу технологиясын әзірлеу үшін олардың физика-

химиялық зерттеулері жүргізілді. Суспензия қалдықтарын химиялық талдауға сәйкес, зерттеулерді магний мен кремний оксидтерін жоюға бағыттау керек, осылайша хром оксидінің құрамын кондициялық хром концентратына дейін арттыру керек. Хромпикотиттің тау жыныстарының минералдары өте ұсақ бос тау жыныстары өсінділерімен байланысқандықтан, аралық өнімдерді қосымша ұнтақтауды қажет етеді. Фракциялықталдау және Х-спектроскопия нәтижелері бойынша зерттелетін шламды құйрықтардағы флокулянттардың көпмөлшері және көлемі 20 мкм-ден аз бөлшектердің көпмөлшері анықталды, ол ауырсуықтықтың ерітінділерінде өзінің шамалы мөлшеріне байланысты суспензияда болады және қабыршақтанбайды. Гранулометриялық құрамы бойынша минус 0.071 мм шламдарды 0.04 және 0.02 мм-ге жіктеп, әр сыныпты бөлек байыту керек екендігі анықталды.

Жоғары технологиялық көрсеткіштерді алу үшін ДӨҢ КБК -та қолданылатын дәстүрлі гравитациялық байыту схемасы технологиялық тұрғыда науырекендігі анықталды, өйткені ол флокулянтты ыдырату, жіктеу, ұнтақтау, әр класс концентрациялық үстелдерінде байыту, аралық өнімдерді ұнтақтау операцияларын қамтиды. Шламды хром қалдықтарын физика-химиялық зерттеу нәтижелері хром концентратын гравитациялық байыту мен жақсартып отырып, химиялық байытуды қамтитын аралас байыту схемасын қолдану қажеттілігін көрсетті.

Негізгі сөздер: мембрана, ниобий, сутегі өткізгіштігі, Сивертс заңы, дилатация, термиялық кеңею коэффициенті, фазалық ауысулар.

Физико-химические исследования тонкодисперсных шламовых хвостов Донского ГОКа для определения условий их обогатимости

Е.А. Тастанов¹, Н.Х. Сержанова¹, Н.М.-К. Садыков¹, Ж.А. Ержанова¹, А.Е. Тастанова^{1,2*}

¹Институт металлургии и обогащения, Алматы, Казахстан

²Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: tastanova.aisha.27.02@gmail.com

Аннотация. При переработке хромовых руд получают хромитовый концентрат для производства феррохрома, а также образуются отходы – хвосты обогащения. В зависимости от технологии обогащения образуются кусковые и шламовые хвосты.

Тонкодисперсные шламовые хвосты Донского ГОКа АО «Казхрома» складываются на хвостохранилищах Дуберсай и Акжар, которые являются техногенными месторождениями (ТМ) или техногенными минеральными образованиями (ТМО). Для разработки технологии переработки шламовых хвостов, в которых содержится до 30% оксида хрома, проведены их физико-химические исследования. По данным химического анализа шламовых хвостов следует, что исследования необходимо направить по удалению оксидов магния и кремния, тем самым повышая содержание оксида хрома до кондиционного хромового концентрата. Весьма тонкая вкрапленность хромпикотита с минералами вмещающих пород обуславливает необходимость доизмельчения промежуточных продуктов, которые являются смесями хромита с пустой породой. По результатам фракционного анализа и ИКС-спектроскопии было выявлено содержание большого количества флокулянтов в исследуемых шламовых хвостах и большое количество частиц крупностью менее 20 мкм, который в растворах тяжелой жидкости в виду своего незначительного размера находится во взвешенном состоянии и не расслаивается. По гранулометрическому составу определено, что шламы минус 0.071 мм необходимо еще классифицировать на 0.04 и 0.02 мм и обогащать каждый класс отдельно.

Установлено, что для получения высоких технологических показателей используемая на ДГОКе традиционная гравитационная схема обогащения является технологически громоздкой, т.к. включает операции дезинтеграции флокулянта, классификации, измельчения, обогащения на концентрационных столах каждого класса крупности, доизмельчения промежуточных продуктов. Полученные результаты физико-химического исследования шламовых хромовых хвостов показали о необходимости применения комбинированной схемы обогащения, включающей химическое обогащение с доводкой хромового концентрата гравитационным обогащением.

Ключевые слова: шламовые хвосты, минералогический анализ, гранулометрический анализ, фракционный анализ, оксид хрома.

Received: 22 December 2022

Accepted: 14 April 2023

Available online: 30 April 2023

Selection and justification of charge preparation based on manganese waste from ore dressing

Ye.Ye. Zholdasbay¹, Ye.B. Tazhiev^{1*}, A.A. Argyn¹, A.V. Kaplan², G.M. Koishina¹, N.K. Dosmukhamedov¹

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Arvak LLC, Rehovot, Israel

*Corresponding author: eleusiz_t1990@mail.ru

Abstract. Large amounts of waste from the enrichment of manganese ores, dispersed iron- and carbon-containing slurries accumulate at large processing plants, metallurgical plants, plants. Millions of tons of manganese waste have been accumulated at the Dzhezdinsky GOK. Processing of small and dispersed metal-containing industrial waste cannot be carried out by traditional technology. The development and implementation of a new technology for processing these wastes into valuable metal alloys is a very urgent problem.

In this paper, based on a comparative analysis of the theoretical approaches to the production of steel and ferroalloys of traditional technology and new ideas, the selection and justification of the preparation of the charge is carried out. It is shown that the theoretical foundations of the adsorption-autocatalytic mechanism can be revised from the point of view of the organization of metal production from the point of view of solid-phase reactions.

The theoretical foundations of the «Dissociation-adsorption mechanism» are given, where the phenomenological phenomenon is focused on the fact that the dissociation of chemical compounds, including metal oxides, is inherent in them as well as their formation from individual elements regardless of external conditions. The influence of external factors, for example, energy (temperature rise), causes thermal dissociation, which does not so much prove whether dissociation exists or not at all, as it shows a specific degree of dissociation of the compound for the purposeful restoration of the element or the formation of a new compound.

It is shown that the dissociation of metal oxides intensifies proportionally to a decrease in particle size and an increase in temperature. It is established that dispersed oxide materials can be metallized with solid carbon due to the reduction of iron within the temperature range of 950-1100°C.

Keywords: iron oxide, manganese oxide, hot reducing gases, carbon, solid-phase reactions, dissociation of oxides, temperature, charge, small waste.

1. Введение

Технология производства ферромарганца и феррохрома базируется на использовании кусковых марганцевых и хромовых руд, составляющих основу шихты для восстановительной плавки. В качестве восстановительного реагента в состав шихты вводится металлургический кокс и флюсующие добавки для формирования оптимального состава шлака.

Высокотемпературный процесс восстановительной плавки подготовленной шихты обычно реализуется на рудно-термических электроплавильных печах. Подготовленная шихта, состоящая из кусковых рудных материалов, флюса и кокса загружается в печь слоями. Нагрев и плавление шихты осуществляется за счет расхода электроэнергии путем опускания электродов в слой шихты. Поскольку основные компоненты шихты – руда и кокс, представляют окискованные материалы, процессы восстановления металлов углеродом кокса начинаются в топохимическом режиме через контактные поверхности соприкосновения. Ввиду того, что контактные поверхности весьма ограничены, процессы восстановления металлов в твердофазном состоянии из

окискованной руды практически не протекают. Реальное восстановление металлов начинается при расплавлении рудной части шихты. Химическое взаимодействие между оксидами железа, марганца и хрома и углеродом кокса происходит при высокой температуре и исключительно в жидкой фазе оксидов. Такая схема технологического процесса производства ферросплавов распространена во всем мире, и представляет традиционную технологию.

Основные статьи расхода электроэнергии на ферросплавное производство по традиционной технологии складываются из нагрева шихты, расплавления рудной части шихты, эндотермических тепловых эффектов восстановления железа, марганца, хрома и кремния твердым углеродом, и перегрева расплавов шлака и ферросплавов. По данным промышленной практики суммарный расход электроэнергии на производство ферромарганца колеблется в пределах 5000-6000 кВт·ч/т, а феррохрома 9000-9500 кВт·ч/т. Расход загружаемого кокса в печь варьируется в пределах 500-600 кг/т ферросплава. Довольно высокие перечисленные расходы определяют себестоимость и рыночную стоимость ферросплавной продукции. Кроме того, при таких высоких затратах

энергии и кокса на электротермических процессах плавки, обычно получают высокоуглеродистые ферросплавы. Это влечет за собой необходимость проведения вторичного передела по рафинированию ферросплавов с целью снижения содержания углерода в нем. Такой двухступенчатый передел связан с заведомо заложенным избыточным расходом кокса в первичном производстве ферросплава. На практике отсутствует механизм регулирования стехиометрическим расходом кокса, необходимым для восстановления металлов. Это связано с тем, что кокс в традиционной технологии одновременно используют, как в качестве восстановителя, так и в виде насадки для дренажа расплавленного материала.

В марганцевых и хромовых рудах марганец и хром представлены в виде оксидов, с которыми всегда сопутствует определенное содержание оксида железа. Это определяет подход к организации процесса извлечения металлов из руд на основе восстановительных реакций. Для реализации такого процесса, прежде всего, необходима подготовка шихты и восстановительных реагентов.

При массовом производстве металла по традиционной технологии выбор восстановительных реагентов падает на газообразные реагенты CO , H_2 и твердый углерод. Для восполнения потребностей в этих реагентах используется природное углеводородное сырьё – природный газ и уголь [1, 2, 3]. Указанные восстановительные реагенты обладают различными восстановительными потенциалами, соответственно, имеют различные возможности их практического использования. Газообразные восстановители – CO и H_2 , являясь двухатомными газами, обладают восстановительными потенциалами одного порядка [4, 5]. При их взаимодействии с оксидами металлов образуются трёхатомные газы – CO_2 и H_2O . В количественном отношении полного превращения двухатомных газов в трёхатомные не приходится ожидать. Степень взаимодействия двухатомного газа с оксидами металлов на практике колеблется в пределах 0.4-0.5.

Отдельная проблема – изыскание способов переработки мелкодисперсных отходов от обогащения марганцевых руд, накопленные объёмы которых определяют критический уровень их влияния на грунтовые воды, водную флору и окружающую среду [6, 7, 8].

Мелкодисперсные отходы, образующиеся при подготовке сырья, содержат повышенные содержания железа и марганца, сопоставимые с их содержанием в кондиционном сырье. Широкомасштабное использование их в традиционной технологии практически невозможно и ограничено техническими условиями их использования. Сегодня накопленные объёмы указанных отходов достигли таких масштабов, что вполне могут рассматриваться как вторичные сырьевые ресурсы для довольно крупного металлургического производства.

Мелкие отходы, образующиеся при сортировке исходного окучкованного сырья, не могут быть возвращены к переработке традиционными технологическими процессами. Подготовка к окучкованию мелких отходов сопровождается определенными издержками. Возвращение их в традиционный технологический цикл возможно постольку, поскольку они поддаются окучкованию с максимально низкими издержками подготовки.

Наиболее распространенный способ окучкования мелких рудных материалов, концентратов, а также мелкодисперсных отходов от обогащения руд – агломерация, кото-

рая реализуется при температуре 1450°C . Мелкие частицы при такой температуре даже близко не подходят к состоянию размягчения, так как процесс обеспечивается при высоких температурах – $1600-1700^\circ\text{C}$ [9, 10]. Обычные агломерационные машины такие температуры не выдерживают. Сегодня агломерация не представляется эффективным, как с точки зрения технологии, так и с экологической стороны. Второй широко используемый способ подготовки мелкодисперсного материала к переработке – окучкование путем организации производства окатышей. Процесс требует значительных издержек: измельчения мелких отходов до дисперсного состояния, расход связующих материалов, использование дополнительного оборудования [11].

В настоящее время на близлежащих территориях крупного металлургического комбината «Арселор-Миттал» накоплены миллионы тонн железосодержащих шламов и шлаков. На территории Донского ГОКа и Джездинского ГОКа накоплены ~ 15 млн. тонн мелких отходов от обогащения хромовых и марганцевых руд [12]. Ввиду отсутствия рациональной технологии их переработки, они продолжают накапливаться в геометрической прогрессии. Это представляет уже критическую экологическую проблему.

Проблема переработки мелких и дисперсных отходов остается актуальной и требует разработки альтернативных новых технологий, которые обеспечивали бы комплексное решение проблемы их переработки как с технологической, так и экологической точки зрения. В этом отношении сам механизм образования мелких и дисперсных отходов, можно сказать, подготовил часть решения проблемы. Так, на практике используется возможность приготовления рудоугольных окатышей и брикетов на основе дисперсных материалов с дальнейшей их восстановительной плавкой в шахтных и электротермических печах. Это свидетельствует о том, что технологии производства ферросплавов могут базироваться не на окучковании сырья, а наоборот на их измельчении. В данном случае мелкие отходы марганцевых и хромовых руд могут приобрести широкое применение и позволяют решить проблему их металлургической переработки.

Нельзя обойти вниманием и попытки использования рудоугольной смеси для извлечения металлов из руд и концентратов. Однако, при таком подходе восстановительная плавка смеси привела к получению науглероженного металла. Получение кондиционного металла по содержанию углерода при использовании углеродсодержащего восстановителя также оказалась проблемной задачей.

За последнее десятилетие опубликованы новые теоретические положения [13, 14, 15], которые могли бы быть положены в основу разработки новой технологии переработки мелкодисперсных отходов, содержащих оксиды марганца. Известно, что низшие оксиды марганца, обладая высокой химической прочностью, восстанавливаются твердым углеродом при высоких температурах $1200-1400^\circ\text{C}$. Согласно представлениям авторов работы [15] оксиды железа, марганца и хрома в дисперсном состоянии приобретают высокую активность взаимодействия с твердым углеродом при низких температурах, чем в жидкофазной системе, используемой в традиционной технологии.

В настоящей работе на основании сравнительного анализа теории и практики осуществления традиционной технологии получения металлов из железосодержащих руд и новых представлений обосновывается выбор методики подготовки шихты, применительно к мелкодисперсным отходам от обогащения марганцевых и хромовых руд, обеспечивающей получение соответствующих металлов (сплавов) высокого качества.

2. Анализ теоретических основ восстановления оксидов металлов

Как известно, методика восстановления железа основана на плавке окискованного железорудного сырья в шахтной печи и продувке через плотные слои шихты горячего восстановительного газа (ГВГ). Компоненты ГВГ – CO и H₂, имеют ограниченный восстановительный потенциал. При температуре ведения процесса механизм их взаимодействия с оксидами железа, согласно представлениям А.А. Байкова описывается протеканием реакций:



В соответствии с выдвинутым механизмом, протеканию химической реакции предшествует диссоциация оксидов и газов. Реакции (1) и (2) начинаются в области температуры 800-900°C. Нагрев системы действует на диссоциацию оксидов железа и CO₂, и H₂O. Если при одинаковой температуре степень диссоциации FeO, оцениваемая упругостью диссоциации (lgP_{о2}), значительно превышает степень диссоциации CO₂ и H₂O, то реакция протекает слева направо. Если же степень диссоциации их по величине приближаются или становятся сопоставимым, то реакция замедляется и, в конечном счете, устанавливается равновесное состояние между прямой и обратной реакцией.

В области 900-1000°C реакции (1) и (2) достигают равновесия, при котором для реакции (1) степень использования газа CO составляет 0.25-0.3, а для реакции (2) – степень использования H₂ достигает значения 0.28-0.32. Это означает, что для протекания реакций (1) и (2) в сторону образования металлического железа, необходим определенный избыток CO и H₂. Тем не менее, допуская высокий расход ГВГ на единицу восстанавливаемого железа, получают металлизированный продукт со степенью восстановления железа 0.95-0.98.

Восстановление оксидов марганца и хрома с использованием ГВГ, аналогично железу, невозможно, в силу низких значений упругости диссоциаций MnO и Cr₂O₃, по сравнению с упругостью диссоциации газов CO₂ и H₂O. Диссоциация газов CO₂ и H₂O при повышении температуры происходит раньше, чем диссоциация оксидов MnO и Cr₂O₃. При этом газовая фаза по отношению к оксидам марганца и хрома создает не восстановительную, а окислительную атмосферу в системе. Поэтому ГВГ по отношению к оксидам марганца и хрома не обладает достаточным восстановительным потенциалом, для их восстановления до металла. Это требует использования другого, более сильного восстановительного реагента с высоким реакционным потенциалом. Из природно-распространенных восстановителей к такому реагенту можно отнести твердый углерод, который обладает высоким восстановительным потенциалом. В рассматриваемом

ракурсе выбор углерода в качестве основного восстановительного реагента вполне оправдан.

Широкое использование углерода в твердофазных системах сдерживается устоявшимся теоретическим положением об «Адсорбционно-автокаталитическом механизме» (ААКМ) восстановительных процессов. Согласно данной теории твердофазные реакции взаимодействия углерода с оксидами металлов протекают по так называемому контактно-диффузионному механизму. По положениям выдвинутой теории газообразным реагентам был приписан приоритет в восстановительном процессе не столько с научных позиций, сколько с логических представлений рассматриваемых явлений. Всеобщее признание этих «научных положений» в дальнейшем определило техническую политику в области металлургии, которая заключалась в следующем.

Железо, которое представляет собой основу стали, и основные легирующие металлы – марганец, хром, ванадий, кремний в исходном сырье – руде и концентратах находятся в виде высших и низших оксидов. Структура и размеры кристаллических решеток оксидов различаются не только по роду металлов, но и по атомному отношению кислорода к металлу: O/Me. Железо, марганец и хром в зависимости от отношения O/Me, присутствуют в исходной шихте в виде высших и низших оксидов. Для железа, значения отношения O/Me могут составлять: 1.5; 1.33; 1.0; для марганца – 2.0; 1.5; 1.33; 1.0; для хрома – 1.5; 1.33; 1.0. Прочность химической связи атома кислорода с металлом возрастает с уменьшением их атомного отношения.

Восстановление металла из его высшего оксида протекает последовательно, согласно фазовым превращениям: от высшего оксида к низшему. В этом ряду наиболее энергозатратной является последняя стадия – восстановление низшего оксида металлов до металла по схеме: MeO→Me. Именно исходя из этих положений традиционная технология производства легированных конструкционных сталей базируется, прежде всего, на восстановительном и восстановительно-плавильном процессах. Реализация этих процессов на практике осуществляется по следующей схеме: 1) восстановление и плавление в доменных печах железа из руды; 2) окисление в сталеплавильных агрегатах углерода, кремния, марганца, фосфора, удаление серы с получением из чугуна металла заданного состава; 3) выплавка ферросплавов; 4) легирование металла ферросплавами для получения стали заданного химического состава.

Высокопроизводительные агрегаты известных конструкций, такие как доменные печи, объемом 4-5 тыс.м³, конвертеры емкостью 300-350 т, 200-300 тонные дуговые электропечи, имеют настолько высокую производительность на существующем рудном сырье, что другие агрегаты и способы сталеплавильного процесса не могут с ними конкурировать. Однако, если учесть, что качество первичного сырья с каждым годом снижается, то нетрудно видеть определённые проблемы, стоящие перед существующим традиционным сталеплавильным производством.

Поскольку при массовом производстве металла по традиционной технологии выбор восстановительных реагентов падает на газообразные реагенты CO, H₂ и твёрдый углерод, природное углеводородное сырьё – природный газ и уголь, используются как раз для восполнения потребностей в этих реагентах. При этом необходимо иметь ввиду, что перечисленные выше восстановители обладают

различными восстановительными потенциалами, соответственно, имеют различные возможности для их практического использования. Газообразные восстановители – CO и H₂, обладают восстановительными потенциалами одного порядка. Они, прежде всего, двухатомные газы и при восстановительных процессах, в результате взаимодействия с оксидами, могут образовывать трёхатомные газы – CO₂ и H₂O. В количественном отношении полного превращения двухатомных газов в трёхатомные не приходится ожидать. Степень взаимодействия двухатомного газа с оксидами металлов в трёхатомные на практике колеблется в пределах 0.4-0.5. Несмотря на это, благодаря физической подвижности и адсорбируемости газообразных реагентов в своё время была выдвинута теория, основанная на «адсорбционно-автокаталитическом механизме» (ААКМ).

Не останавливаясь на технических недостатках традиционной технологии, можно отметить следующие критические недостатки, касательно теоретической основы «адсорбционно-автокаталитического механизма», который, на наш взгляд требует серьезного его пересмотра и расширения границ его использования:

- порядок протекания реакций восстановления оксидов металлов углеродом с образованием CO, не имеет под собой фундаментальной основы, подтверждённой результатами прямых экспериментов. Приведенные доводы вытекают из механического представления взаимодействующих частиц на уровне молекул, порядок взаимодействия которых не подтвержден ни визуально, ни с использованием современной аппаратурой;

- при раскрытии механизма процесса восстановления металлов из их оксидов соотношение химической прочности, как оксидов металлов, так и производственных газообразных оксидов, не рассматривается;

- позиция об обязательности непосредственного взаимодействия адсорбированных молекул газа (CO и H₂) с оксидами MeO не подкреплена термодинамическим анализом. Если учесть, что прочность химической связи в MeO может быть больше, чем в CO-CO₂ или H₂-H₂O, то протекание реакции между ними может стать в принципе невозможным. В этом случае теоретические принципы ААКМ можно представлять как частный случай, относящийся только к высшим оксидам;

- твёрдый углерод рассматривается механически с точки зрения «шарика», способного только диффундировать. Во внимание не принимаются его структура и свойства, способствующие взаимодействию с оксидами не только в контакте, но и в пространственно разобщённом состоянии;

- не принят во внимание всеобщий механизм взаимодействия между атомами и молекулами через электронный обмен и взаимодействие электронных орбиталей, т.е. через донорно-акцепторный механизм, согласно которому восстановительные реагенты вообще, и углерод, в частности, является всегда донором, а кислород оксидов – акцептором;

- не рассматривается механизм взаимодействия между оксидами металлов и адсорбированными молекулами газов, который происходит на уровне электронного обмена. Преимущество адсорбированных газов перед твёрдым углеродом, в данном случае, заключается лишь в более близком их расположении к кристаллической структуре оксидов. Однако атомы углерода могут компенсировать этот недостаток контакта с оксидами более мощным элек-

тронным потоком, направляемым к кристаллической решетке оксидов.

Практика использования газового потока привела к противоречию теоретических положений ААКМ с ожидаемым результатом. Необходимость окускования сырья по условиям реализации ААКМ практически сводит на нет ожидаемый эффект адсорбции газа. Адсорбированный на поверхности кусков рудного сырья газ реально взаимодействует только с первым молекулярным слоем оксидов. Далее образованный тонкий слой твёрдофазного продукта реакции, например, слой металла, практически ограничивает доступ газового потока вглубь куска и исключает дальнейшую адсорбцию газа на реакционной поверхности. Процесс в объёме куска реализуется исключительно топомеханическим характером реакций, т.е. протекает в диффузионной области. При этом, диффузионный механизм, от которого отказались сторонники ААКМ, на примере использования углерода, обернулся его же лимитирующей стадией в процессе. Практика работы доменных и шахтных печей показывает продолжительность металлургической агломерата и окатышей фракции 10-20 мм на уровне 5-6 часов, т.е. весьма низкую скорость протекания реакции. Как видно, ожидаемые кинетические результаты ААКМ здесь не достигаются.

Сегодня гигантские размеры массового производства металлов по традиционной технологии, наряду с её техническими недостатками, уже демонстрирует большую угрозу ухудшения экологического баланса. Это порождает необходимость разработки энергосберегающих, экологически чистых технологий, основанных на новых теоретических представлениях.

3. Новые подходы к подготовке шихты для получения металлов

Условия организации движения газового потока в традиционной металлургии определяют подготовку шихты и дальнейшую металлургическую ее переработку по схеме: окускование концентратов и мелкой руды – производство агломерата, окатышей и кокса; доменный процесс – производство чугуна; кислородно-конвертерный процесс – производство стали. Такое представление привело к организации и развитию теории восстановительно-плавильных процессов производства ферромарганца и феррохрома, которые осуществляются исключительно в жидкофазной системе.

В руднотермических печах расплавленная оксидная руда обтекает слой металлургического кокса при высокой температуре (1500-2000°C). При этом развивается реакционная поверхность и происходит восстановление оксидов твёрдым углеродом. При всём этом, роль твёрдого углерода в восстановительном процессе, несмотря на его высокий потенциал, сильно ограничена за счет применения так называемого двухстадийного механизма восстановления оксидов металлов:



Представление механизма взаимодействия твёрдого углерода с оксидами металлов по контактно-диффузионному механизму сужает границы теоретиче-

ских положений, что связано с недооценкой структурных и физико-химических превращений в частицах твердого углерода по мере нагрева системы.

Суммирование реакций (3) и (4) создаёт лишь видимость прямого восстановления металла, непосредственно углеродом. Такое теоретическое представление господствует в научной и практической среде уже более века, в соответствии с которой металлургические процессы организованы на использовании газовых потоков на всех подразделениях, как мы уже называем, традиционной металлургией.

Механизм восстановления оксидов металлов по схеме (3)-(5) в научной среде породила представление, что в пирометаллургии восстановительных процессов твёрдый углерод взаимодействует с оксидами металлов только с образованием СО. Однако, данный закон или закономерность не диктует, а лишь отображает феноменологические параметры конкретного процесса и не отрицает возможность взаимодействия твёрдого углерода с оксидами металлов с образованием как СО, так и СО₂. Как видно, расход углерода на газификацию кислорода шихты с образованием СО₂ кратно меньше, чем с образованием СО. При использовании схемы (3)-(5) естественно допускаются большие ошибки в результатах баланса. Кроме того, такие прочные оксиды как MnO, Cr₂O₃, SiO₂ не могут быть восстановлены рекламируемыми газовыми реагентами СО и Н₂ из-за недостаточности их восстановительного потенциала к этим оксидам.

Интересным представляются теоретические основы «Диссоциационно-адсорбционного механизма» (ДАМ), предложенные в работе [15]. Авторы исходят из феноменологического явления о том, что диссоциация химических соединений, в том числе и оксидов металлов, присуща им так же, как образование их из отдельных элементов независимо от внешних условий. Воздействие внешних факторов, например, энергии (повышение температуры), вызывает термическую диссоциацию, которая не столько доказывает, существует или нет диссоциация вообще, сколько показывает конкретную степень диссоциации соединения для целенаправленного восстановления элемента или образования нового соединения.

Диссоциация оксидов металлов интенсифицируется пропорционально уменьшению размеров частиц и повышению температуры. Дисперсные оксидные материалы могут быть металлизированы твёрдым углеродом за счет восстановления железа в пределах температуры 950-1100°C за несколько десятков минут.

Взаимодействие оксида металла с восстановительным реагентом сопровождается образованием металла или его низшего оксида и газообразных продуктов реакций. Массовое соотношение их зависит от химической прочности тех или иных оксидов или, иначе говоря, упругостей их диссоциации при данной температуре, типа атмосферы и давления системы.

Особенность ДАМ заключается в том, что он учитывает именно это соотношение во всём интервале фазовых превращений оксидов металлов и образования производных оксидов. Образование последних в ходе восстановительных реакций может превосходить постольку, поскольку упругость их диссоциации меньше упругости диссоциации оксидов металлов. Этой закономерности подчиняется и соотношение образующихся газообразных оксидов – СО₂ и СО, которые имеют разные химические

прочности. Энергия диссоциации СО кратно больше, чем энергия диссоциации СО₂. По мере понижения упругости диссоциации

металла (MeO₂→Me₂O₃→Me₃O₄→MeO→Me) концентрация СО в продуктах реакции повышается за счёт понижения концентрации менее прочного производного оксида СО₂.

Установленная закономерность по ДАМ распространяется не только к последовательно фазовому, но и превращению внутри одной фазы. Например, в гематите массовая доля газифицируемого кислорода на единицу железа составляет 0.4285, которая по фазам Fe₂O₃→Fe₃O₄→FeO→Fe распределяется, соответственно, как: 0.111; 0.222; 0.667 (доли единицы). Максимальная упругость диссоциации гематита соответствует начальному периоду газификации кислорода, равной доле 0.111 от общей доли количества кислорода (0.4285), т.е. при значении на уровне 0.001-0.01. По мере приближения доли газифицированного кислорода к 0.111 упругость диссоциации гематита снижается до уровня упругости диссоциации магнетита. Соответственно, концентрация газа СО₂ в газовой фазе снижается. Аналогичным путём происходит изменения упругостей диссоциации оксидов Fe₃O₄ и FeO, и уменьшение концентрации СО₂ в газовой фазе за счёт увеличения доли СО, который является наиболее прочным оксидом.

Твёрдый углерод, который непосредственно взаимодействует с оксидами металлов, не подвергается диссоциации, поэтому большинство металлов из самых прочных оксидов будут восстанавливаться исключительно им.

Выбор твёрдого углерода как универсального восстановительного реагента основан на повышении его активности по отношению к оксидам металлов с повышением температуры. Это свойство углерода, как одноатомного реагента, отличает его от двухатомных восстановительных реагентов, которые в соответствии с фундаментальным законом, подвержены диссоциации. Углерод лишен возможности диссоциации.

Комплексные исследования по изучению изменения структуры и состояния твердых частиц углерода показали, что при нагреве в частицах твердого углерода наблюдается процесс электронной эмиссии: расщепление кристаллической решетки, как в плоскости, так и в межплоскостных расстояниях с сильным выделением потоков электронов. При взаимодействии с оксидами металлов выделяемый поток электронов охватывает не точку, а всю поверхность смежно-расположенных твердых частиц оксидов и отрицательно заряжает газифицируемый кислород оксидов, который при нагреве также находится в возбужденном состоянии. Это является началом необратимых химических реакций. Такое представление тесно связано с фундаментальной основой всех массообменных процессов – донорно-акцепторным механизмом. Молекулы горячего восстановительного газа – СО и Н₂, являются слабым электронным донором, поэтому обладают ограниченным восстановительным потенциалом. Твёрдый углерод, обладая сильным электронным потенциалом, является активным электронным донором, следовательно, он обладает более высоким восстановительным потенциалом. С повышением температуры углерод может только увеличивать эмиссию электронов, что весьма полезно ускоряет взаимодействие его с оксидами металлов.

Принимая во внимание перечисленные выше уникальные свойства твердого углерода, для последующей орга-

низации и проведения экспериментальных исследований по переработке марганцевых отходов от обогащения марганцевых руд Джездинского ГОКа нами выбрана новая методика предварительного приготовления шихты с использованием твердого углерода в качестве восстановительного реагента.

Финансирование

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2023-2025 годы по приоритетному направлению «Геология, добыча и переработка минерального и углеводородного сырья, новые материалы, технологии, безопасные изделия и конструкции» проекта AP19576391 «Разработка инновационной технологии получения новых сплавов из накопленных некондиционных многокомпонентных хром-, марганец содержащих отходов с применением Big Data».

Литература / References

- [1] Toulouevski, Yu.N., Zinurov, I.Y. (2013). *Innovation in Electric Arc Furnaces*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [2] Verhoeven, J.D. (2007). *Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist*. ASM International
- [3] Dyudkin, D.A., Kisilenko, V.V. (2007). Modern technology of steel production. *Moscow*
- [4] Gelmanova, Z.S., Zhaksybaev, D.M. (2016). Features of the formation and use of secondary resources in metallurgical production. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. (7), 749-75
- [5] Voskoboynikov, V.G. (2002). *Metallurgy of ferrous metals*. Moscow: Metallurgy
- [6] Matveeva, V.A., Alekseenko, A.V., Karthe, D. & Puzanov, A.V. (2022). Manganese Pollution in Mining-Influenced Rivers and

- Lakes: Current State and Forecast under Climate Change in the Russian Arctic. *Water*, 14(1091). <https://doi.org/10.3390/w14071091>
- [7] Monaci, F., Ancora, S., Bianchi, N., Paoli, L. & Loppi, S. (2021). Combined use of native and transplanted moss for post-mining characterization of metal(loid) river contamination. *Sci. Total Environ*, (750), №141669. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141669>
- [8] Kim, Y. (2020). Geochemical Behavior of Potentially Toxic Elements in Riverbank-Deposited Weathered Tailings and Their Environmental Effects: Weathering of Pyrite and Manganese Pyroxene. *Minerals*, 10(413). <https://doi.org/10.3390/min10050413>
- [9] Kozlov, G.S., Khisamutdinov, N. E. & Shatalov, S.V. (2007). Method of smelting carbonaceous ferromanganese. *Patent RU No. 2298046, C22C33/04*
- [10] Vdovin, D.K., Vdovin, K.N., Bigeev, A.M. & Tanklevskaya, N.M. (2001). A method for producing ferrochrome from poor iron-containing chromium ores. *Patent RU 2167952, IPC C22C33/04, C22B5/10*
- [11] Kaliakparov, A.G., Suslov, A.V., Bilyalov, K.S. & Kulandin, M.P. (2015). Utilization of ferroalloy production waste. *Ecology and industry of Russia*, (2), 4-7
- [12] Nasyrov, R.Sh., Sapunov, V.M. & Gusarov, V.V. (2018). Improving the technology of tunneling operations at the Don GOK. *Mining magazine*, (5), 21-26. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.05.02>
- [13] Yesengaliev, D.A., Isagulov, A.Z. & Baisanov, S.O. (2019). Thermographic studies of manganese raw materials and charges based on it. *Proceedings of the University of Moscow*, (3), 23-26
- [14] Baisanov, S.O., Baisanov, A.S. & Esengaliev, D.A. (2018). Development of technology for smelting refined ferromanganese using special complex reducing agents. *News of universities. Ferrous metallurgy*, 61(9), 689-694
- [15] Tleugabulov, S.M. (2003). Theoretical provisions of direct production of steel by reducing melting. *Steel*, (8), 18-21

Кенді байытудан марганец қалдықтары негізінде шихта дайындауды таңдау және негіздеу

Е.Е. Жолдасбай¹, Е.Б. Тажиев^{1*}, А.Ә. Арғын¹, А.В. Каплан², Г.М. Қойшина¹, Н.К. Досмухамедов¹

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Arvak ЖШҚ, Реховот, Израиль

*Корреспонденция үшін автор: eleusiz_t1990@mail.ru

Андатпа. Металлургиялық комбинаттардың ірі байыту фабрикаларында, зауыттарда марганец кендерін байытудан алынған үлкен көлемдегі қалдықтар, дисперсті темір-, көміртегі бар шламдар жинақталуда. Джездин КБК-тында миллиондаған тонна марганец қалдықтары жинақталған. Құрамында металл бар ұсақ және дисперсті өнеркәсіптік қалдықтарды өңдеу дәстүрлі технологиямен жүзеге асырыла алмайды. Аталған қалдықтарды бағалы металл қорытпаларына қайта өңдеудің жаңа технологиясын әзірлеу және ендіру өте өзекті мәселе болып табылады.

Бұл жұмыста болат пен феррокорытпаларды өндірудің теориялық тәсілдеріне салыстырмалы талдау негізінде дәстүрлі технология мен жаңа идеялар негізінде шихта дайындауды таңдау және негіздеу жүргізілді. Адсорбциялық-автокатализтикалық механизмнің теориялық негіздерін қатты фазалық реакциялар тұрғысынан металл өндірісін ұйымдастыру тұрғысынан қайта қарауға болатындығы көрсетілген.

«Диссоциациялық-адсорбциялық механизмнің» теориялық негіздері келтірілген, мұнда феноменологиялық құбылыс химиялық қосылыстардың, соның ішінде металл оксидтерінің диссоциациялануы сыртқы жағдайларға қарамастан олардың жеке элементтерден түзілуі сияқты оларға тән екендігіне бағытталған. Сыртқы факторлардың әсері, мысалы, энергия (температураның жоғарылауы) термиялық диссоциацияны тудырады, бұл диссоциацияның бар-жоғын дәлелдемейді, өйткені ол элементтің мақсатты түрде тотықсыздануы немесе жаңа қосылыстың пайда болуы үшін қосылыстың диссоциациялануының белгілі бір дәрежесін көрсетеді.

Металл оксидтерінің диссоциациясы бөлшектердің кішіреюіне және температураның жоғарылауына пропорционалды түрде қарқындылығы көрсетілген. Дисперсті оксидті материалдар 950-1100°C температурада темірді тотықсыздандыру арқылы қатты көміртегімен металдандырылуы мүмкін екендігі анықталды.

Негізгі сөздер: темір оксиді, марганец оксиді, ыстық тотықсыздандырғыш газдар, көміртек, қатты фазалық реакциялар, оксидтердің диссоциациясы, температура, шихта, ұсақ қалдықтар.

Выбор и обоснование подготовки шихты на основе марганцевых отходов от обогащения руд

Е.Е. Жолдасбай¹, Е.Б. Тажиев^{1*}, А.Ә. Арғын¹, А.В. Каплан², Г.М. Қойшина¹, Н.К. Досмухамедов¹

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²ООО Arvak, Реховот, Израиль

*Автор для корреспонденции: eleusiz_t1990@mail.ru

Аннотация. На крупных обогатительных фабриках металлургических комбинатах, заводах накапливаются большие объемы отходов от обогащения марганцевых руд, дисперсные железо-, углеродсодержащие шламы. На Джездинском ГОКе накоплены миллионы тонн марганцевых отходов. Переработка мелких и дисперсных металлосодержащих промышленных отходов не может быть осуществлена традиционной технологией. Разработка и реализация новой технологии по переработке перечисленных отходов в ценные металлические сплавы представляют весьма актуальную проблему.

В настоящей работе на основании сравнительного анализа к теоретическим подходам производства стали и ферросплавов традиционной технологии и новых представлений проведен выбор и обоснование подготовки шихты. Показано, что теоретические основы адсорбционно-автокаталитического механизма могут быть пересмотрены с точки зрения организации производства металлов с точки зрения твердофазных реакций.

Приведены теоретические основы «Диссоциационно-адсорбционного механизма», где феноменологическое явление сфокусировано на том, что диссоциация химических соединений, в том числе и оксидов металлов, присуща им так же, как образование их из отдельных элементов независимо от внешних условий. Воздействие внешних факторов, например, энергии (повышение температуры), вызывает термическую диссоциацию, которая не столько доказывает, существует или нет диссоциация вообще, сколько показывает конкретную степень диссоциации соединения для целенаправленного восстановления элемента или образования нового соединения.

Показано, что диссоциация оксидов металлов интенсифицируется пропорционально уменьшению размеров частиц и повышению температуры. Установлено, что дисперсные оксидные материалы могут быть металлизированы твердым углеродом за счет восстановления железа в пределах температуры 950-1100°C.

Ключевые слова: оксид железа, оксид марганца, горячие восстановительные газы, углерод, твердофазные реакции, диссоциация оксидов, температура, шихта, мелкие отходы.

Received: 05 January 2023

Accepted: 14 April 2023

Available online: 30 April 2023

Study of the Fe-Si-Al-Ba system using the thermodynamic-diagrammatic analyses method

B.S. Kelamanov^{1*}, O.V. Zayakin², D.A. Yessengaliev¹, Ye. Kobegen¹, R.A. Adaybayeva¹, A.Zh. Temirbekov¹

¹Aktobe regional university named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

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

*Corresponding author: Kelamanov-b@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study of the thermodynamic-diagram analysis of the Fe-Si-Al-Ba multicomponent system, where, on the basis of thermodynamic data, the boundary ternary systems of the basic four-component Fe-Si-Al-Ba system are constructed. As a result, it was determined that the system consists of 12 elementary tetrahedra. For each of the tetrahedra, analytical equations are determined, with the help of which it is possible to establish the location in the factor space of the general system of the compositions of various metal melts with the calculation of their normative phase compositions. The correctness of the breakdown into elementary tetrahedra can be seen due to the volumes of the same tetrahedra, where the sum of these volumes is equal to one (1.00000). The quasi-volumes in the system Fe-Si-Al-Ba, simulating the compositions of the resulting metal products during the smelting of an alloy of ferrosilicoaluminum with barium in the process of reduction, have been established. As a result, it turned out that the Fe-Si-Al-Ba system does not include ternary and quaternary compounds, with the exception of interstitial solid solutions containing Fe-Si and Fe-Al phases doped with barium, as well as silicon-barium-aluminum containing eutectic. In this case, the region of the composition of the alloy with a barium content of 8-10% will be the most optimal. Further, with an increase in the concentration of barium in the alloy above 10%, it leads to the loss of barium with atmospheric oxygen, and also leads to a violation of the melting process.

Keywords: barium, ferrosilicoaluminum, four-component system, thermodynamic-diagram analysis, quasi-volume, tetrahedra.

1. Introduction

The state diagrams of various systems contain valuable information about the composition and structure of the proposed smelting products and serve to obtain melts as close as possible to the specified compositions and a certain temperature zone of the process, thereby predicting their properties and methods of technological modes of production.

In modern scientific and applied metallurgy, an important place is occupied by the study of the structure of liquid melts obtained by pyrometallurgical processing of various raw materials. As a rule, the initial raw material, whether it is an ore or a concentrate, contains in its composition compounds that are not stable in a liquid state, i.e. decaying into stable constituent parts after overcoming their liquidus temperature. The generally accepted thermodynamic studies of processes in multicomponent systems are quite complex and require the use of extensive mathematical calculations and are directly related to the need to determine the thermodynamic functions of a large number of independent reactions. In many ways, some data on the properties of substances necessary to determine the Gibbs free energy of reactions are limited or absent, which in such cases excludes the applicability of thermodynamic analysis to study multicomponent systems.

Designed and developed in KhMI im. Zh. Abisheva, thermodynamic diagram analysis (TDA) of complex systems, has established itself as the simplest and at the same time accurate method for studying phase patterns in compari-

son with classical thermodynamic studies of metallurgy processes. The effectiveness of the method, as an application to metallurgical technology, is the ability to reveal the features of the phase structure of the resulting melts in the process of metallurgical processing of various raw materials. Based on the results of such studies, phase composition diagrams are constructed that allow one to trace phase metamorphism and predict the final state of a single system that simulates the composition of the melt under study.

2. Materials and methods

To study the production technology of ferrosilicoaluminum with barium, as well as during deoxidation and partial alloying of steel, it is necessary to know the thermodynamic parameters of the components and the properties of the Fe-Si-Al-Ba system.

This article discusses the possibility of constructing a phase structure diagram for the Ba-Fe-Al-Si system, simulating the compositions of barium-based alloys using thermodynamic diagram analysis. To carry out triangulation or breakdown of a metallic system into phase triangles of coexisting phases, it is necessary to determine the values of the Gibbs energy (ΔG_{298}) of all compounds formed between the components of the system. Reference data on ΔG_{298} for some compounds of the system are taken from [1-3]. However, ΔG_{298} values are not available for almost many compounds. The value of the standard Gibbs energy of any compound at any temperature can be determined

using the well-known Gibbs-Helmholtz equation with known and (the index T indicates the temperature dependence) [5]:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0 \quad (1)$$

Since for many compounds of the system not only the values are not available, but also information about their heat capacity in both solid and liquid states, the article posed the problem of constructing a diagram of the phase structure of the Fe-Si-Al-Ba system only at standard temperature (298 TO). This also makes it possible to simulate the direction of reactions for various combinations of components and compounds in the Fe-Si-Al-Ba system.

The Hertz method was used to determine the S_{298}^0 values for compounds for which there are no data in reference books [5, 6]. This method is based on the empirical formula established by Hertz for elements and inorganic compounds:

$$S_{298}^0 = K_g \cdot (M/C_{p,298})^{1/3} \cdot m \quad (2)$$

where, K_g - Hertz constant (20.5); M - molecular weight; $C_{p,298}$ - molar heat capacity at 298 K; m is the number of atoms in the compound.

Due to the fact that the Hertz method with a fixed value of $K_g = 20.5$ does not allow obtaining high accuracy, the authors of [5] improved it and found that there is a good relationship between the average values of the Hertz constant (K_g) and the molar mass (Ma) of the element, which is the role of the anion in the compound:

$$K_g = 33,5 \cdot \frac{x^2 \cdot e^x}{(e^x - 1)^2} \quad (3)$$

where, $x = 42,4 / Ma$.

The calculation of the heat capacity of solids was carried out according to the Debye theory. The method is based on quantum

concepts of atomic vibrations in the crystal lattice of a solid. The method provides a fairly accurate calculation of the heat capacity of simple solids. Its capabilities as applied to solid compounds have hardly been studied, although the method for calculating C_p of complex substances is well known [7].

The initial calculation data are the characteristic (Debye) temperatures of the elements forming the compounds, as well as the melting temperatures of the elements and compounds (Table 1). The characteristic temperatures of the QD elements are currently determined experimentally, so there is no need to calculate them using the Lindemann formula. It is only necessary to correct them for the test compound using the Koref formula:

$$Q_D' = Q_D \sqrt{T_{\text{mel}}' / T_{\text{mel}}} \quad (4)$$

where, T_{mel}' and T_{mel} are the melting points of the compound and the element, respectively.

Table 1. Melting points (T_m) and characteristic temperatures (QD) of substances in the crystalline state

№ n/e	Element	T_m , K	Q_D , K
1.	Ba	1000	424
2.	Fe	1808	373
3.	Al	933	390
4.	Si	1700	689

Next, we calculate the argument of the Debye function using the following formula:

$$C_v = Q_D' / T \quad (5)$$

After that, using the Debye function table, we find the isobaric heat capacity of the elements (Table 2) and summing them up according to the Neumann-Kop rule, determining the isochoric heat capacity of the compound.

Table 2. Values of the Debye heat capacity, J/mol K

№ n/e	Q_D/T	C_v	№ n/e	Q_D/T	C_v	№ n/e	Q_D/T	C_v
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	24.94	26	2.5	18.58	51	5,0	9.20
2	0.1	24.94	27	2.6	18.16	52	5,2	8.62
3	0.2	24.89	28	2.7	17.74	53	5,4	8.12
4	0.3	24.85	29	2.8	17.32	54	5,6	7.61
5	0.4	24.77	30	2.9	16.90	55	5,8	7.11
6	0.5	24.64	31	3.0	16.51	56	6,0	6.61
7	0.6	24.52	32	3.1	16.07	57	6,2	6.19
8	0.7	24.35	33	3.2	15.65	58	6,4	5.77
9	0.8	24.18	34	3.3	15.27	59	6,6	5.44
10	0.9	24.02	35	3.4	14.85	60	6,8	5.10
11	1.0	23.76	36	3.5	14.43	61	7,0	4.761
12	1.1	23.51	37	3.6	14.06	62	7,5	4.05
13	1.2	23.22	38	3.7	13.68	63	8,0	3.477
14	1.3	22.97	39	3.8	13.30	64	9,0	2.665
15	1.4	22.68	40	3.9	12.93	65	10	1.887
16	1.5	22.38	41	4.0	12.56	66	12	1.117
17	1.6	22.05	42	4.1	12.18	67	14	0.703
18	1.7	21.71	43	4.2	11.84	68	16	0.473
19	1.8	21.34	44	4.3	11.51	69	18	0.330
20	1.9	20.96	45	4.4	11.17	70	20	0.243
21	2.0	20.58	46	4.5	10.84	71	22	0.181
22	2.1	20.21	47	4.6	10.50	72	24	0.140
23	2.2	19.83	48	4.7	10.17	73	26	0.1096
24	2.3	19.46	49	4.8	9.83	74	28	0.0883
25	2.4	19.04	50	4.9	9.50	75	30	0.0720

The next step is to convert the isochoric to isobaric heat capacity, which can be done using the semi-empirical Nernst-Lindemann formula:

$$C_p = C_v + 0,0051 \cdot T \cdot C_p^2 / T_{\text{mel}} \quad (6)$$

All the thermodynamic parameters of the compounds in the Fe-Si-Al-Ba system obtained as a result of the calculation are shown in Table 3.

Table 3. Results of calculation of thermodynamic parameters

№ n/e	Connections	ΔG_{298}	ΔS_{298}	C_{p298}
		kJ/mol	J/mol	
1	FeAl	-53.333	65.98	47.41
2	Fe ₂ Al ₅	-203.912	206.37	197.76
3	FeAl ₃	-114.51	121.57	100.14
4	FeAl ₂	-78.2408	-	-
5	Fe ₃ Al	-98.7	-	-
6	FeSi	-76.5798	46.024	48.53
7	Fe ₃ Si	-84.59	-	-
8	Fe ₅ Si ₃	-197.6396	209.62	199.6
9	FeSi ₂	-73.2911	55.23	66.11
10	Fe ₂ Si	-82.887	104.01	72.06
11	BaSi	-242.38	-	-
12	BaSi ₂	-258.68	-	-
13	BaAl	-62.7	-	-

3. Results and discussion

Diagram of the phase structure of the Fe-Si-Al system. The Fe-Si-Al system (Figure 1) consists of three binary systems Fe-Al, Fe-Si and Si-Al. There are 5 double compounds in the Fe-Al system - Fe₃Al, Fe₂Al₅, FeAl, FeAl₂, FeAl₃. The Fe-Si system also contains 5 binary compounds - Fe₃Si, Fe₂Si, Fe₅Si₃, FeSi, FeSi₂, of which only FeSi is stable in the liquid state. There are no double compounds in the Si-Al system.

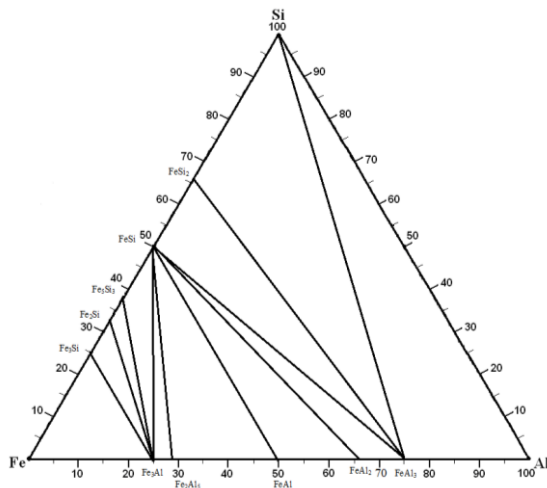


Figure 1. Fe-Si-Al system

In general, the Fe-Si-Al ternary system consists of three simple elements and 10 double compounds. Triangulation of the Fe-Si-Al system was carried out using the Hess law:

$$\Delta G_p = \sum \text{con} - \sum \text{sou}, \quad (7)$$

At a positive value of the Gibbs energy of the reaction, the points corresponding to the initial compounds were connected on the state diagram. At a negative value of the Gibbs energy of the reaction, the reaction products were combined. In this way, the triple system is divided into stable triangles

of coexisting phases. Using this method, the Fe-Si-Al system was divided into 11 stable triangles. Moreover, all components of a single stable triangle do not interact with each other. The areas of interest to us for the composition of the FSA alloy with barium in relation to the Fe-Si-Al system will be in the Si-FeAl₃-FeSi₂ and FeSi₂-FeAl₃-FeSi phase regions. This indicates that when the composition of the alloy falls into the range of these compositions, the alloy will contain free silicon.

Diagram of the phase structure of the Ba-Fe-Si system. When triangulating the Ba-Fe-Si subsystem, 8 thermodynamically stable triangles of coexisting phases were formed (Figure 2). In the Ba-Si binary system, the most stable compound is BaSi₂ with a melting point of 1180°C. It is reported in [8, 9, 10] that the BaSi₂ compound has a rhombic lattice with the following parameters: a = 8.92 Å; b = 6.80 Å; c = 11.58 Å.

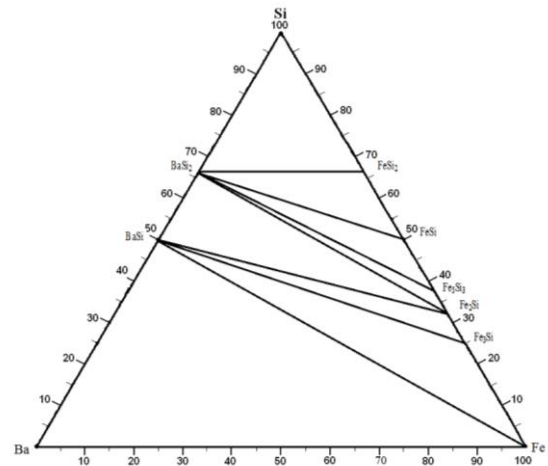


Figure 2. Ba-Fe-Si system

Thus, the Ba-Si system undoubtedly contains BaSi₂ compounds (congruent melting $T_m = 1180^\circ\text{C}$ - barium disilicide and BaSi (incongruent melting $T_m = 840^\circ\text{C}$ - barium silicide. The melting point of barium, according to sources [4] is 710°C , and sources - 725°C . The melting point of silicon (α - quartz) $T_{\text{melt}} = 1690\text{K}$, 1688K and 1685K .

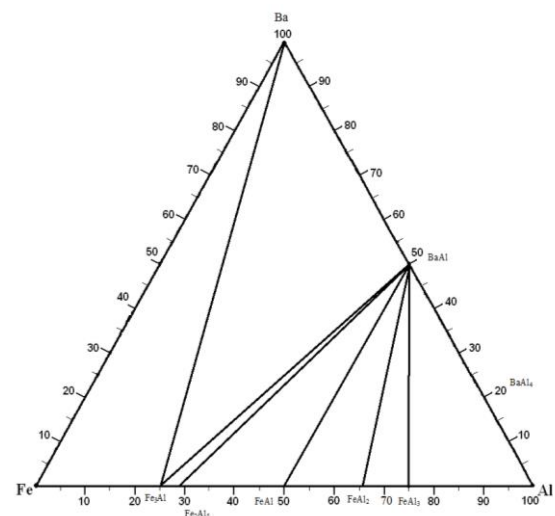


Figure 3. Fe-Al-Ba system

Phase structure diagram of the Fe-Al-Ba system (Figure 3). This system contains three elements and 7 binary compounds, and in the Fe-Al binary system, 5 double compounds are known - Fe_3Al , Fe_2Al_5 , FeAl , FeAl_2 and FeAl_3 , and in the Ba-Al binary system there are two compounds BaAl and BaAl_4 .

As a result of triangulation, the Fe-Al-Ba system was divided into 8 stable coexisting phase triangles. On the Al-Ba side, the most stable compound is BaAl_4 .

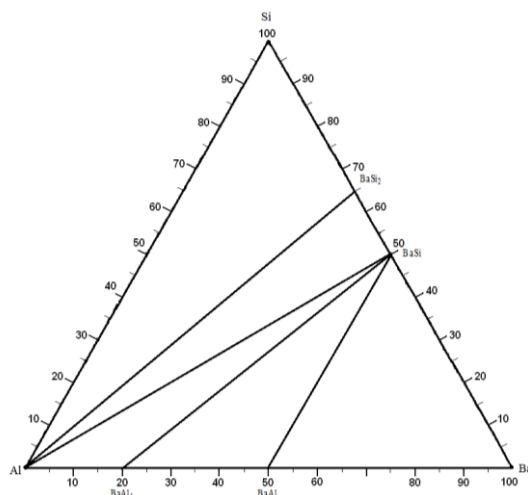


Figure 4. Al-Si-Ba system

Diagram of the phase structure of the Al-Si-Ba system (Figure 4). The system contains four double compounds - BaSi , BaSi_2 , BaAl , BaAl_4 , there are no ternary compounds in the system. This system is interesting from the standpoint of determining the composition of the alloy at a constant iron content of around 20%. Then, in the section at 20% iron, when converted to the content of barium, aluminum and silicon, an alloy with a content of 68% Si, 22% Al and 10% Ba will be formed. This composition is in the Al-Si- BaSi_2 region, which implies the precipitation of a free silicon phase during crystallization. Aluminum will be in the composition of the alloy in the form of a free phase, but possibly alloyed with iron. This assumption was refined during the study of the microcomponent composition of FSA and FSA alloys with barium by the method of imprinting with a diamond pyramid.

4. Conclusions

Thus, no ternary and quaternary compounds were found in the Fe-Si-Al-Ba system, with the exception of interstitial solid

solutions containing Fe-Si and Fe-Al phases doped with barium, as well as silicon-barium-aluminum containing eutectic.

In general, the macrostructure of the FSA alloy with barium is represented by a highly porous surface. The main matrix of the alloy is silicon, which is released in free form during crystallization.

The most optimal is the region of the composition of the alloy with a content of 8-10% barium. Exceeding the content of barium over 10% will lead to its increased losses in the form of oxidation by atmospheric oxygen - the pyroelectric effect increases. In addition, the technological parameters of the smelting of the FSA alloy with barium, when 10% of barium in the alloy is exceeded, somewhat decrease. This is due to an increase in the number of slag-forming compounds coming together with barite ore and the possible transition of the smelting process to the so-called slag mode, which disrupts the normal operation of the furnace.

References

- [1] Akberdin, A.A. (1995). Balansovyy metod rascheta ravnovesnogo fazovogo sostava mnogokomponentnykh system. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'a*, 5(3), 92-93
- [2] Kasenov, B.K., Aldabergenov, M.K., Pashinkin, A.S., Kasenova, Sh.B., Balakeeva, G.T. & Adekenov, S.M. (2008). Metody prikladnoy termodinamiki v himii i metallurgii. *Karaganda: Glasir*
- [3] Nurumgaliev, A.H. (2007). Modelirovanie i analiz v sisteme Al-O-C. *Tekhnologiya proizvodstva metallov i vtorichnykh materialov*, 2 (12), 67-72
- [4] Glushko, V.P. (1971). Termodinamicheskie konstanty veshchestv. *M.: Akademiya Nauk SSSR*
- [5] Morachevskij, A.S., Sladkov, I.V. (1985). Termodinamicheskie raschety v metal-lurgii. *M.: Metallurgiya*
- [6] Berezhnoj, A.S. (1970). Mnogokomponentnye sistemy okislov. *Kiev: Naukova dumka*
- [7] Akberdin, A.A., Kim, A.S., Sultangaziev, R.B. (2018). Experiment Planning in the Simulation of Industrial Processes. *Steel in Translation*, 48(9), 573-577. <https://doi.org/10.3103/S0967091218090024>
- [8] Akberdin, A., Kim, A., Sultangaziyev, R. & Karbayev, M. (2020). Thermodynamic modeling of the borbarium ferroalloy smelting technological process. *Metallurgiya*, 59(3), 333-336
- [9] Baisanov, S. (2020). Phase equilibrium thermodynamics in binary systems. *Proceedings of INFACON XIII - 13th International Ferroalloys Congress: Efficient Technologies in Ferroalloy Industry*
- [10] Zhumagaliev, Ye., Baisanov, S., Chekimbaev, A. & Nurgali, N. (2010). Phase diagram of Ti-Fe-Al system. *Proceedings of the 12th International Ferroalloys Congress: Sustainable Future*

Термодинамикалық-диаграммалық талдау арқылы Fe-Si-Al-Ba жүйесін зерттеу

Б.С. Келаманов^{1*}, О.В. Заякин², Д.А. Есенғалиев¹, Е. Көбеген¹, Р.А. Адайбаева¹, Ә.Ж. Темірбеков¹

¹Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан

²Ресей ғылым академиясы Орал бөлімшесінің Металлургия институты, Екатеринбург, Ресей

*Корреспонденция үшін автор: Kelamanov-b@mail.ru

Аңдатпа. Мақалада Fe-Si-Al-Ba көп компонентті жүйесінің термодинамикалық-диаграммалық талдауын зерттеу нәтижелері келтірілген, мұнда термодинамикалық мәліметтер негізінде Fe-Si-Al-Ba базалық төрт компонентті

жүйесінің шекаралық үштік жүйелері салынған. Нәтижесінде жүйе 12 қарапайым тетраэдрден тұратындығы анықталды. Тетраэдрлердің әрқайсысы үшін аналитикалық теңдеулер анықталады, олардың көмегімен әртүрлі металл балқымаларының құрамдарының жалпы жүйесінің факторлық кеңістікте орналасуын, олардың нормативтік фазалық құрамдарын есептеу арқылы орнатуға болады.

Қарапайым тетраэдрлерге бөлудің дұрыстығын сол тетраэдрлердің көлеміне байланысты көруге болады, мұнда осы көлемдердің қосындысы (1.00000) бірлікке тең.

Тотықсыздану үрдісінде ферросиликоалюминий қорытпасын бариймен балқыту кезінде түзілетін металл өнімдерінің құрамын модельдейтін Fe-Si-Al-Ba жүйесінде квази көлемдер орнатылған. Нәтижесінде Fe-Si-Al-Ba жүйесі бариймен легірілген Fe-Si және Fe-Al фазалары бар қатты енгізу ерітінділерін, сондай-ақ құрамында эвтектика бар кремний-барий-алюминийді қоспағанда, үш және төрт қосылыстарды қамтымайтыны анықталды. Бұл жағдайда барий мөлшері 8-10% болатын қорытпаның құрамы ең оңтайлы болады. Әрі қарай, қорытпадағы барий концентрациясының 10%-ға жоғарылауымен ауаның оттегімен барийдің жоғалуына, сонымен қатар балқытудың технологиялық үрдісінің бұзылуына әкеледі.

Негізгі сөздер: барий, ферросиликоалюминий, төрт компонентті жүйе, термодинамикалық-диаграммалық талдау, квазиөем, тетраэдрация.

Изучение системы Fe-Si-Al-Ba методом термодинамического- диаграммного анализа

Б.С. Келаманов^{1*}, О.В. Заякин², Д.А. Есенғалиев¹, Е. Кобеген¹, Р.А. Адайбаева¹, А.Ж. Темірбеков¹

¹Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актобе, Казахстан

²Институт металлургии Уральского отделения Российской Академии Наук, Екатеринбург, Россия

*Автор для корреспонденции: Kelamanov-b@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты исследования термодинамически-диаграммного анализа многокомпонентной системы Fe-Si-Al-Ba, где на основе термодинамических данных построены граничные тройные системы базовой четырехкомпонентной системы Fe-Si-Al-Ba. В результате определили, что система состоит из 12 элементарных тетраэдров. Для каждого из тетраэдров определены аналитические уравнения, с помощью которых можно установить месторасположение в факторном пространстве общей системы составы различных металлических расплавов с вычислением их нормативных фазовых составов.

Правильность разбивки на элементарные тетраэдры, можно увидеть за счет объемов этих же тетраэдров, где сумма этих объемов равна единице (1.00000).

Установлены квазиобъемы в системе Fe-Si-Al-Ba, моделирующие составы образующихся металлических продуктов при выплавке сплава ферросиликоалюминия с барием в процессе восстановления. В результате выяснилось, что система Fe-Si-Al-Ba не включает тройные и четверные соединения, за исключением твердых растворов внедрения, содержащих фазы Fe-Si и Fe-Al легированных барием, а также кремний-барий-алюминий содержащую эвтектику. При этом наиболее оптимальным будет являться область состава сплава с содержанием бария 8-10%. Далее с увеличением концентрации бария в сплаве свыше 10% приводит к потере бария с кислородом воздуха, а также приводит нарушению технологического процесса плавки.

Ключевые слова: барий, ферросиликоалюминий, четырехкомпонентная система, термодинамический-диаграммный анализ, квазиобъем, тетраэдрация.

Received: 29 December 2022

Accepted: 14 April 2023

Available online: 30 April 2023

Study of the hydrogeological, engineering-geological and hydrological regime of the Kaiyndy Lake basin for an emergency spillway from Kaiyndy Lake

M.M. Zapparov¹, M.K. Kasenov², E.S. Auelkhan¹, M.M. Alzhigitova^{1*}, D.T. Turapbai¹

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²"Kazselezashchita" of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: m.alzhigitova@satbayev.university

Abstract. This article provides information on the stability of the natural dam of Lake Kaiyndy in the study area. Lake Kaiyndy is located in the middle part of the basin and is fed by melted snow and rainwater. The flow of water from the lake is carried out by the surface. The lake belongs to the high category of mudflow hazard. During the technogenic development of this territory, one should consider the negative impact of the additional load on the stability of the sides of the canyon and not expand the development of the territory towards the river. In the event of a lake outburst, the road bridge of the village of Zhalanash - the village of Saty, residential buildings and farmland of the village of Algabas and Zhanatalap of the Kegen district, the village of Shelek, the village of Masak, the village of Baiseit, the village of Malybay, with. Zhanasharua of the Enbekshikazakh district and the Bartogay reservoir of the Almaty region, road bridges, power lines. The total number of people in the risk zone is more than 2-3 thousand people. Also, the Kuldzhinsky Trakt highways, the Western China-Western Europe auto-ban, irrigation systems, the waterworks of the Kunaev BAC and other linear communications fall into the zone of influence. Lake Kaiyndy is a place of mass visits by tourists and vacationers. In summer, the number of people at risk can reach several hundred.

Keywords: stability, dam, melt water, wedging out, mudflow, emptying, channel, landslide, dammed lake, alluvial mudflow, soils.

1. Введение

Озеро Кайынды расположен на правой стороне бассейна реки Шелек на высоте 1850 м (длина-420 м, ср. ширина-110 м). Озеро питается за счет таяния снегов и поступления талых снеговых вод. Сток воды производится по поверхностным путем. Фотографии озеро Кайынды показано на рисунках 1.

В 1983 г. в результате катастрофического опорожнения завального озера Кайынды прошёл наносоводный сель, которой нанес значительный ущерб хозяйственным объектам [14].

В случае прорыва озера в зону селевого риска попадают автодорожный мост с.Жаланааш - с.Саты, жилые дома и сельхозугодия села Алгабас и Жанаталап Кегенского района, с.Шелек, с.Масак, с. Байсеит, с.Малыбай, с.Жанашаруа Енбекшиказахского района и Бартогайское водохранилище Алматинской области, автодорожные мосты, линия электропередач. Общее количество населения в зоне риска более 2-3 тысяч человек. Также, в зону воздействия попадают автодороги «Кульджинский тракт», автобан западный Китай – Западная Европа, ирригационные системы, гидроузел БАКа им.Кунаева и другие линейные коммуникации.

Бассейн реки Шелек занимает юго-восточную часть хребта Иле Алатау и северо-восточную часть хребта Кунгей Алатау. Река имеет длину 245 км, площадь бассейна 4980 км². Климат здесь резко континентальный с

большими суточными и годовыми амплитудами температуры воздуха.

Река Шелек берет свое начало у ледника Жангарык в пределах абсолютной отметки 4300 м. Вниз по течению принимает ряд притоков. Русло реки умеренно извилистое, сложено валунными и галечниковыми грунтами с песчано-гравийным заполнителем. Здесь наблюдаются самые значительные опасные геологические процессы в сравнении с близ расположенными бассейнами рек.

Катастрофические землетрясения 1887, 1 июля 1889 (10 баллов, Чиликское) и 1911 годов оставили свои грандиозные следы в виде громадных оползней и обвалов. Которые создали красивейшие завальные озера, преградив горные реки. На территории исследуемого участка в конце XIX века произошли ряд крупных землетрясений, после которых на данной территории появились опасные зоны с потенциальным риском развития оползневых процессов.

Основные параметры землетрясения: эпицентральная зона землетрясения охватывает восточные части хребтов Иле и Кунгей Алатау и простирается от реки Или до северо-восточного побережья озера Иссык-Куль. После землетрясения образовались трещины, много громадных осыпей и обвалов в горах и ущельях. 21 июня 1938 г. на устье реки Большой Кемин произошло Кеминско-Чуйское катастрофическое землетрясение в юго-западных районах области оно проявлялась с силой 7-8 баллов (в Алматы 6 баллов).



I



II

Рисунок 1. Фотоматериалы завального озера «Кайынды» Государственного Национального природного парка «Кольсайские озёра» Алматинской области (I, II)

В период до 1970 года после этого землетрясения в Алматинской зоне наступило сейсмическое затишье, и с 1970 г. вновь активизировалась Алматинская зона: Сарыкамышское 5 июня 1970 г. (в Кегенском районе — до 6 баллов), Торайгырское 12 февраля 1975 г. (в Чиликском районе - до 6 баллов) и ряд других ощутимых подземных толчков. 25 марта 1978 г. с эпицентром в районе восточного погружения хребта Кунгей Алатау произошло Жаланашское землетрясение. После Кеминской катастрофы 1911 г. это крупнейшее в этой зоне. Сила сотрясения в Кегенском районе достигала 8 баллов, принесший огромный материальный ущерб.

12 ноября 1990 г. зафиксировано очередное сильное землетрясение в Алматинской зоне - Байсорунское землетрясение. Его сила в Кегенском районе достигла 8 баллов. Этим землетрясением завершился очередной этап активизации сейсмической деятельности на территории Алматинской зоны. Зоны распространения землетрясения показана на рисунке 2. На указанной карте можно заметить, что в период вышеуказанной времени сейсмическая активность близ озера Кольсай составляла 8-9 баллов. В связи с этим, образовались оползни и потенциальные участки обвалов и оползневых процессов.

Озеро Кайынды является местом массового посещения туристов и отдыхающих. В летнее время число людей в зоне риска может достигать несколько сотен.

Река Кайынды является правым притоком реки Шелек. Длина реки составляет 21 км. Площадь бассейна ориентировочно 55 км². Ледников в бассейне реки Кайынды нет.

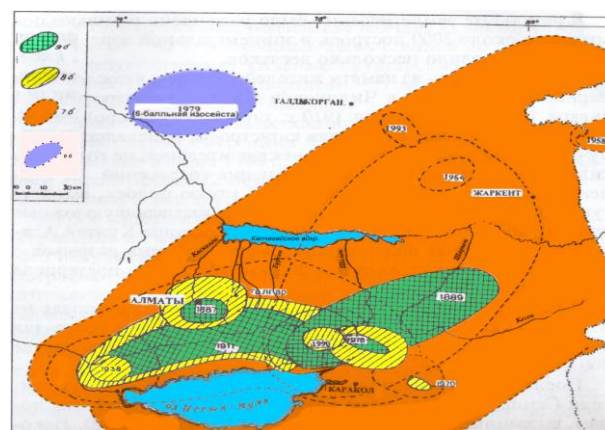


Рисунок 2. Карта-схема сильных землетрясений в Алматинской области

Озеро Кайынды расположено в средней части бассейна и в 12 км от места впадения в реку Шелек. До прорыва озера 1983 года параметры озера составляли: длина 720 метров, ширина 150 метров, максимальная глубина 31.6 метра. Озеро питается за счет поступления талых снеговых и дождевых вод. Сток воды из озера осуществляется поверхностным путем. Расход воды на момент обследования составлял ориентировочно 0.5-0.6 м³/с. Температура воздуха составляла 12°C [5].

По результатам изучения фондовой литературы и дешифрирования современных космоснимков установлено, что дамба, сформировавшая озеро, имеет завально-тектоническое происхождение.

Русло реки было завалено грунтами тела оползня-потока (оползня течения), активизацию которого спровоцировало Кеминское землетрясение силой 10...11 баллов, произошедшее 11 января 1911 г. Магнитуда землетрясения составила ≈ 8 .

Оползневые массы сорвались с при водораздельной линии правобережного притока реки Кайынды, перегородили не только русло реки Кайынды, но и своим фронтальным валом закрыли устьевую часть русла левобережного притока реки Кайынды. В пределах зоны перекрытия в приточном ущелье сформировалось ещё два озера (Малые Кайынды) меньшего масштаба (рисунки 3-4).

Поверхностного стока из нижележащего озера нет. Вода фильтруется через грунты естественного завала и подземный сток формируется в долину реки Кайынды. Отмечен факт, что вдоль левого борта долины реки Кайынды, в пределах продолжения осевой линии тальвега этого притока, зон выклинивания родников не выявлено, то есть фильтрующаяся вода питает подрусловый поток.

Современные гравитационные образования (grQIV), сформировавшие дамбу озера Кайынды, литологически представлены преимущественно щебенистыми грунтами с песчано-супесчаным, реже, суглинистым заполнителем в пределах от 3.5 до 35.6%, при среднем значении 15.9%. Содержание глыб (фракции > 200 мм) изменяется в пределах 0.6...28.9%, при среднем значении 9.4%, при этом, содержание глыб размером 300...500 мм изменяется в пределах 0.6...15.2%, при среднем значении 3.8%. Размещение глыб в общей массе грунтов хаотическое, закономерного распределения не выявлено.



Рисунок 3. Оползень-поток по правому борту р. Кайынды на участке работ



Рисунок 4. Озёра Малые Кайынды по левому борту реки Кайынды на участке работ

Грунты плотины обводнены с глубины 11 м. Коэффициенты фильтрации грунтов (по данным нескольких наливов и откачки) изменяются в пределах 101...243 м/сутки, при среднем значении 147.7 м/сутки.

Водный поток реки Кайынды при вытекании из озера имеет довольно спокойный характер. Уклон русла здесь, на протяжении первых десятков метров, составляет не более 2...3° (или 0.039). В нижнем бьефе (за пешеходным мостом) уклон возрастает до 5...7° и водный поток приобретает турбулентный характер.

Русло реки в пределах первых десятков метров от озера имеет ширину около 5...6 м, при глубине водного потока в пределах 0.1...0.3 м. В русле реки сложилась самоотмостка (выстилка русла реки наиболее крупными фракциями донных отложений под воздействием течения), состоящая из слабоокатанных глыб, щебня, дресвы и крупного песка.

Борта ущелья ниже дамбы сложены щебенистыми и дресвяными грунтами с включением глыб до 25% и супесчано-суглинистым заполнителем в пределах 5...35% (тело оползня-потока, grQIV). Крутизна откосов изменяется в пределах 20...75°, при этом правый борт ущелья на 2/3 высоты перекрыт осыпями, литологически представленными также преимущественно щебенистыми грунтами с включением глыб и с супесчаным заполнителем (рисунки 5-6). Большая часть осыпей находится в активной фазе формирования и лишь отдельные фрагменты поверхности осыпей покрыты травянистой растительностью и мелким кустарником.

Организация туристического кластера ведется без учета оползневой опасности и риска схода оползней и обвалов, с подрезкой склонов, а также без учета значительной нагрузки и перегрузки склонов.

Озеро является точечным туристическим объектом весьма уязвимого характера для которых необходима рассчитанная и дозированная нагрузка.

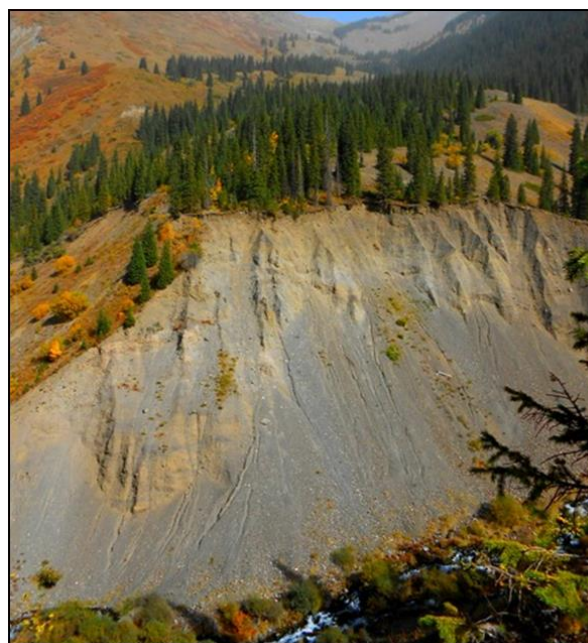


Рисунок 5. Правый борт ущелья в нижнем бьефе дамбы



Рисунок 6. Левый борт ущелья в нижнем бьефе дамбы

Территория застраивается хаотично, наплыв туристов огромен, особенно в летний период здесь сооружаются сотни юрт и шатров, не считая уже возведенных капитальных сооружений, что негативно сказывается на экологическое состояние объектов.

Для правильного экологического безопасного функционирования объекта озера Кайынды необходимо разработка детальной программы функционирования этих объектов с привлечением широкого круга специалистов по геологии, гидрогеологии, экологии, биологии, климатологии и др.

2. Методы и материалы

Озеро относится к высокой категории селевой опасности. Первый прорыв озера произошел в год образования озера сформировав грязекаменный селевой поток. Уровень озера понизился на 28-30 метров, объем селя составлял около 2.5 млн.м³.

16 июня 1983 года в результате катастрофического опорожнения завального озера Кайынды сформировался наносоводный сел, который нанес значительный ущерб хозяйственным объектам [14].

Уровень воды в озере понизился на 9.8 метров, было сработано ориентировочно 640 тыс.м³ воды.

После 1983 года уровень максимального наполнения составил отметку 1855.40 м. Линия максимального наполнения отчетливо зафиксирована на скальных обнажениях левого берега озера в верхней (южной) его части и на стволах затопленных деревьев. Отметка этой линии была определена в процессе топографических изысканий в ноябре 2021 года.

Согласно данным Географического Общества РК по реке Кайынды в 2015 году прошли наносоводные сели, в результате которых была частично разрушена завальная перемычка озера, и его уровень понизился примерно на 2 метра.

По результатам батиметрической и топографической съемки на ноябрь месяц 2021 года озеро Кайынды имеет следующие параметры:

- отметка уровня воды – 1853.40 м БС;
- площадь зеркала – 46.6 тыс.м²;
- объем озера – 496.0 тыс.м³;
- длина (с юга на север) – 400 м;
- максимальная ширина – 115 м;
- максимальная глубина – 20.5 м.

Согласно данным ГНПП «Көлсай көлдері» колебания уровня озера в последние годы очень незначительны и не превышают 32 см.

Повторные разрушения завальной перемычки с формированием селевого потока или паводка возможны в случаях сильного землетрясения, обвала грунта с бортов вреза, суффозионных процессов, а также в результате прохождения высоких паводков, по руслу с отсутствующей естественной самоотмостки для пропуска повышенных расходов воды с попятной эрозией.

Учитывая высокую сейсмическую и селевую опасность территории озера Кайынды и для обеспечения безопасности населения, отдыхающих и туристов, хозяйствующих объектов и жилых домов, считаем необходимым строительство защитного сооружения в озере Кайынды от прорыва и перелива воды из озера.

Необходимо провести инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания для разработки проекта восстановления озера до естественных отметок, существовавших после прохождения селя и паводков 1983 года.

Строительство на завальные перемычке дамбы (плотины) из грунтовых материалов с необходимым комплексом сооружений и мероприятий, обеспечивающих современные нормативные технические, эксплуатационные и природоохранные характеристики объекта. После строительства проектируемой дамбы на завальном перемычке по нашим расчетам будет иметь следующие основные параметры:

- НПУ – 1855.40 м БС;
- площадь зеркала озера – 55.82 тыс.м²
- объем воды в озере – 600 03 тыс.м³;
- длина озера (с юга на север) – 495 м;
- максимальная ширина – 122 м;
- максимальная глубина – 22.5 м;

3. Результаты и обсуждение

Собственно тело дамбы находится в устойчивом состоянии. Предварительные расчёты по нескольким характерным поперечникам (в нижнем и верхнем бьефе дамбы) показали, что коэффициент устойчивости изменяется в пределах 1.16...1.65 (даже для грунтов в водонасыщенном состоянии). Только на одном поперечнике (левый борт вреза русла реки выше створа проектируемой плотины на 12 м, исток) коэффициент устойчивости оказался 0.78 (и только для грунта в водонасыщенном состоянии).

Учитывая высоту откосов на этом поперечнике (3...7 м) и уровень подземных вод (вода из реки фильтруется круто вниз по разрезу на глубину до 11 м), реальной опасности водонасыщения грунта не предполагается, а в природном сложении откос имеет коэффициент устойчивости 1.55.

Выклинивания подземного потока в нижнем бьефе не выявлено ни в низовом откосе, ни в русле реки. Очевидно, подземный поток сформировал фильтрационный путь ниже русла реки – подрусловой поток.

Поверхность дамбы задернована и покрыта кустарниковой и древесной растительностью, что благоприятно сказывается на её устойчивости в настоящий момент.

Попытной донной эрозии по руслу реки не выявлено. Уклоны по руслу реки даже на перегибе его ниже дамбы не превышают 5...7°. Само русло сложено валунными грунтами с песчаным заполнителем, то есть достаточно устойчиво к размыву обычным потоком.

Выводы по устойчивости левого борта долины реки Кайынды ниже озера.

1. Высота откосов значительна – 50 и более метров.

2. Борта долины реки сложены щебенистыми и, реже, глыбовыми и дресвяными грунтами с супесчаносуглинистым заполнителем. Отложения выше эрозионного вреза реки Кайынды, не обводнены по обоим бортам. Однако учитывая крутизну поверхности и высоту откосов, склоны считаются неустойчивыми. Коэффициент устойчивости в среднем составляет 0.805 в нижней части бортов.

3. Поверхность тела древнего оползня интенсивно залесена по обоим бортам долины реки с развитым почвенно-растительным слоем.

4. Постоянная техногенная нагрузка выявлена только в районе озёр Малые Кайынды (преимущественно автотранспорт), но проявляется она на значительном расстоянии от участка исследований (и от плотины, и от бровки борта ущелья, выработанного в теле оползня реки Кайынды – более 100 м). Однако, в перспективе, при техногенном освоении этой территории следует учесть негативное влияние дополнительной нагрузки на устойчивость бортов каньона и не расширять обустройство территории в сторону реки.

Рекомендации:

1. Необходимо проведение инженерно-геологических и гидрогеологических, геофизических съемки с применением георадаров для определения устойчивости озерной перемычки;

2. Проводить регулярные обследования состояния озерной перемычки, в том числе и комиссионные с привлечением специалистов и исполнительных органов.

3. Организовать тропы для пеших и конных маршрутов с указателями. Недопускать хождение и езду на лоша-

дах вне установленных мест и троп. Для соблюдения санитарных норм и правил, вместо уборных и септиков организовать водопроводные и водосточные сети;

4. Провести научно-исследовательские работы по предупреждению прорыва озера и определению степени воздействия человеческой деятельности на экосистему озера Кайынды и мониторинговые работы для составления генерального плана развития туристического кластера;

5. Организовывать сезонные лагерные тимбилдинги только в весенне-летний период ниже озера Кайынды в районе березовой рощи.

7. Выставить информационные щиты по соблюдению требований по технике безопасности и о мерах поведения в горной местности и на акватории озера;

8. Выставить предупреждающие щиты на опасных участках.

4. Выводы

Озеро Кайынды является местом массового посещения местных и зарубежных туристов и отдыхающих. В летнее время число людей в зоне риска может достигать нескольких тысяч человек.

Для правильного экологического безопасного функционирования объекта озеро «Кайынды» необходимо разработка детальной программы функционирования этих объектов с привлечением широкого круга специалистов по геологии, гидрогеологии, экологии, биологии, климатологии и др.

После разработки детальной программы необходимо предложить рациональный график посещения объектов туристическими группами и отдельными туристами в экологически дозированной форме.

Доставку на озеро специальным транспортом для проведения экскурсии рекомендуемая дневная нагрузка на посещение озер не должна превышать 250-300 человек в сутки.

В случае прорыва озера в зону селевого риска попадают автодорожный мост с.Жаланап - с.Саты, жилые дома и сельхозугодья, села Алгабас и Жанаталап Кегенского района, с.Шелек, с.Масак, с.Байсеит, с.Малыбай, с.Жанашаруа Енбекшиказахского района, а также Бартогайское водохранилище Алматинской области, автодорожные мосты, линии электропередач. Общее количе-

ство населения в зоне риска более 2-3 тысяч человек. Также, в зону воздействия попадают автодороги «Кульджинский тракт», автобан «Западный Китай – Западная Европа», ирригационные системы, гидроузел БаКа им.Кунаева и другие линейные коммуникации.

Литература / References

- [1] Kajsl, Ch. (1972). Analiz vremennyh rjadov gidrologicheskikh dannyh. L.: Gidrometizdat
- [2] Gosudarstvennyj gidrologicheskij institute. (1984). Mezhdunarodnoe rukovodstvo po metodam rascheta osnovnyh gidrologicheskikh harakteristik. L.: Gidrometizdat
- [3] SP 33-101-2003. Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik. M.: Strojizdat
- [4] Posobie po opredeleniju raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik. (1984). L.: Gidrometeoizdat.
- [5] Nacional'nyj nauchno-tehnicheskij holding Parasat-Institut geografii. (2012). Vodnye resursy kazahstana: ocenka, prognoz, upravlenie. Almaty
- [6] Zaurbek, A.K., Narbaev, T.I. & Kalybekova, E.M. (2010). Metodicheskoe posobie po opredeleniju raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik. Almaty
- [7] Bondar', F.I., Eresnov, N.V., Semenov, S.I. & Surov, I.E. (1963). Special'nye vodozabornye sooruzhenija. M.: Gosstrojizdat
- [8] Frolov, N.N. (1983). Proektirovanie osnovanij i fundamentov sooruzhenij gidromeliorativnyh sistem. M.: Kolos
- [9] Kiseleva, P.G. (1975). Spravochnik po gidravlicheskim raschetam. M.: Jenergija
- [10] Ivanov, P.L. (1985). Grunty i osnovanija gidrotehnicheskikh sooruzhenij. M.: Vysshaja shkola
- [11] Himerik, Ju.A. (1961). Proektirovanie i raschet gidrotehnicheskikh sooruzhenij. K.: Vishha shk. Izdatel'stvo pri Kievskom universite
- [12] SNiP II-7-81. Stroitel'stvo v seismicheskikh rajonah. M.: Strojizdat
- [13] Chugaev, R.R. (1985). Gidrotehnicheskie sooruzhenija. M.: Agropromizdat
- [14] Medeu, A.R. (2011). Selevie yavleniya iugo-vostochnogo Kazahstana. Almaty
- [15] Zapparov, M.R., Kassenov, M.K., Raimbekova, Zh., Auelkhan, Y. & Abishev, B. (2021). Main criteria defining glof risk on the territory of Almaty region, Kazakhstan. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan: Series of geology and technical sciences*, 450(6), 77-84. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.122>

Қайыңды көлінен апатты су ағызуға арналған Қайыңды көлі бассейнінің гидрогеологиялық, инженерлік-геологиялық және гидрологиялық режимін зерттеу

М.М. Заппаров¹, М.К. Касенов², Е.С. Ауелхан¹, М.М. Альжигитова^{1*}, Д.Т. Тұрапбай¹

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Қазақстан Республикасы Төтенше жағдайлар министрлігінің «Қазселденқорғау» ММ, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: m.alzhigitova@satbayev.university

Андатпа. Бұл мақалада зерттелетін учаскедегі Қайыңды көлінің табиғи бөтетінің тұрақтылығы туралы мәліметтер келтірілген. Қайыңды көлі бассейнінің ортаңғы бөлігінде орналасқан және еріген қар мен жаңбыр суларының түсуіне байланысты қоректенеді. Көлден су ағыны жер үсті арқылы жүзеге асырылады. Көл сел қауіпті жоғары санатына жатады. Бұл аумақты техногендік игеру кезінде қосымша жүктеменің каньон бүйірлерінің тұрақтылығына теріс әсерін ескеріп, аумақты өзенге қарай жайластыруды кеңейтпеу керек. Көл ағылған жағдайда сел қаупі аймағына Жаланап-Саты ауылы арасындағы автожол көпірі, Кеген ауданы Алгабас және Жаңаталап ауылдарының, Шелек ауылының,

Масак ауылының, Байсейіт ауылының, Малыбай ауылының, Алматы облысы Еңбекшіқазақ ауданы Жаңашаруа ауылының тұрғын үйлері және ауыл шаруашылық алқаптары және Бартоғай су қоймасы, электр желілері түседі. Тәуекел аймағындағы халықтың жалпы саны 2-3 мыңнан асады. Сондай-ақ, қауіп аймағына «Құлжа трактісі» автожолдары, Батыс Қытай-Батыс Еуропа автобаны, суару жүйелері, Д.Қонаев атындағы БАК су торабы және басқа желілік коммуникациялар кіреді. Қайыңды көлі туристер мен демалушылардың жаппай баратын орны болып табылады. Жазда қауіпті аймақтағы адамдар саны бірнеше жүзге жетуі мүмкін.

Негізгі сөздер: тұрақтылық, бөгет, еріген су, шөгу, сел, ағызу, арна, көшкін, бөгеттелген көл, аллювиалды сел, топырақ.

Изучение гидрогеологического, инженерно-геологического и гидрологического режима бассейна озера Кайыңды для аварийного водосброса с озера Кайыңды

М.М. Заппаров¹, М.К. Касенов², Е.С. Ауелхан¹, М.М. Альжигитова^{1*}, Д.Т. Тұрапбай¹

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²ГУ «Казселесзащита» Министерства чрезвычайных ситуаций Республики Казахстан, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: m.alzhigitova@satbayev.university

Аннотация. В данной статье приводятся сведения по устойчивости естественной дамбы озера Кайыңды на исследуемом участке. Озеро Кайыңды расположено в средней части бассейна и питается за счет поступления талых снеговых и дождевых вод. Сток воды из озера осуществляется поверхностным путем. Озеро относится к высокой категории селевой опасности. При техногенном освоении этой территории следует учесть негативное влияние дополнительной нагрузки на устойчивость бортов каньона и не расширять обустройство территории в сторону реки. В случае прорыва озера в зону селевого риска попадают автодорожный мост с. Жаланап - с. Саты, жилые дома и сельхозугодия села Алгабас и Жанаталап Кегенского района, с.Шелек, с. Масак, с. Байсеит, с. Малыбай, с. Жаңашаруа Еңбекшіқазақского района и Бартоғайское водохранилище Алматинской области, автодорожные мосты, ЛЭП. Общее количество населения в зоне риска более 2-3 тысяч человек. Также, в зону воздействия попадают автодороги «Кульдзинский тракт», автобан западный Китай – Западная Европа, ирригационные системы, гидроузел БАКа им.Кунаева и другие линейные коммуникации. Озеро Кайыңды является местом массового посещения туристов и отдыхающих. В летнее время число людей в зоне риска может достигать несколько сотен.

Ключевые слова: устойчивость, плотина, талые воды, выклинивание, сел, опорожнение, русло, оползень, завальное озеро, наносоводный сел, грунты.

Received: 09 January 2023

Accepted: 14 April 2023

Available online: 30 April 2023

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i2.05>

On the use of the finite element method in the study of the stress-strain state of the contour of the Annie Cave on Mount Arsia

R.B. Baymakhan¹, A.N. Muta^{1*}, A. Tileikhan¹, K.C. Kozhogulov²¹Kazakh National Women's Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan²Institute of Geomechanics and Subsoil Development of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan*Corresponding author: mutita@mail.ru

Abstract. People who have visited the surface of Mars for the first time cannot survive in conditions of such dangers as radiation, micrometeorites and dust storms. But we offer the caves found on this Mars as a way to use them as a natural refuge from these environmental hazards. The gravitational field on the surface of Mars is about three times weaker than on Earth, and the magnetic field is too weak. Therefore, creatures that have left Earth, including humans, can live on the surface of Mars for only 30-40 seconds. Even the most powerful spacesuit can save a person's life for just a few hours. Martian caves weaken solar radiation almost three times and do not let it inside. Therefore, the study of Martian caves, conducting scientifically based research to make them the first habitat, is an urgent problem today. Therefore, it is advantageous to use the mountain caves of Mars as an underground habitat. Since atmospheric protection is minimal at high altitudes, scientific studies of the strength and stability of the inner edges to Martian gravity are carried out to turn these caves into living quarters, such as mines, tunnels. Under the influence of various forces (gravitational, temperature, low-current, tectonic, etc.) of such structures on Mars, a mechanical and mathematical model is being developed to study the strength of cave dwellings, habitats.

Keywords: Mars, rover, cave, soil, threshold element method, deformed state under stress.

1. Введение

Мы знаем, что наши первые предки появились на земле два миллиона лет назад. Исследование археологов показало, что древние люди укрывались в пещерах. Однако пещера использовалась не только для укрытия, но и для защиты от внешней среды, в частности, от ветра, дождя и снега, а также при необходимости для укрытия от хищников и врагов.

Политика освоения и прямой колонизации Марса насчитывает более 10 лет. Главой небольшой частной голландской организации Mars One, выступившей с идеей освоения Марса, взявшей на себя реализацию, стал Бас Ландсдорп. Согласно плану Mars One, дорожный билет для тех, кто собирается на Марс, будет продаваться только в одном направлении. Билет на возвращение на землю пока не предусмотрен. Тем не менее, количество посетителей превысило 2000 человек. Однако 15 января 2019 года этот проект был приостановлен в связи с принятием решения суда о банкротстве коммерческой компании.

В настоящее время над этим проектом работает руководитель частной космической компании SpaceX Илон Маск. Пообещав доставить первых жителей на Марс к 2030 году, он поделился планом строительства первого марсианского города. Количество первых посещений составляет 200 человек. Билет только в одну сторону.

На поверхности Марса невозможно выжить в условиях таких опасностей, как радиация, микрометеориты и пыльные бури. Но теперь пещеры, обнаруженные на Марсе, планируется использовать в качестве естественного убежища от этих экологических опасностей. Грави-

тационное поле на поверхности Марса примерно в три раза слабее, чем на Земле, а магнитное поле слишком слабое. Существа, покинувшие землю, в том числе люди, могут жить на поверхности Марса всего 30-40 секунд. Даже самый мощный скафандр может спасти жизнь человека всего на несколько часов. Марсианские пещеры почти втрое ослабляют солнечную радиацию и не пропускают ее внутрь. Изучение марсианских пещер, проведение научно обоснованных исследований, чтобы сделать их первой средой обитания, является актуальной проблемой сегодня [1].

2. Марсоходы и посадочные модули на Марсе

На Марсе в настоящее время работают 3 марсохода: Curiosity, Perseverance и Zhurong (рисунко 1а, в, г). Красная планета привлекательна по многим причинам: ее история похожа на историю Земли: гравитация на Марсе составляет 38% Земли, что достаточно для адаптации людей и имеет защитную атмосферу, даже если она тонкая.

Прежде чем отправиться на Марс, мы должны знать, что нужно, чтобы разбить лагерь и прожить там долгое время. Чтобы собрать эту информацию, астрономы отправили марсоходы, посадки и орбиты, которые сканируют атмосферу Марса. Они собирают и анализируют поверхностный материал Марса, чтобы объединить его прошлое, а также его потенциал для жизни и выживания.

Поскольку связь между Марсом и Землей занимает от 4 до 20 минут, ученым пришлось внедрить искусственный интеллект в этих роботов, чтобы чувствовать препятствия и плавно перемещаться по местности.

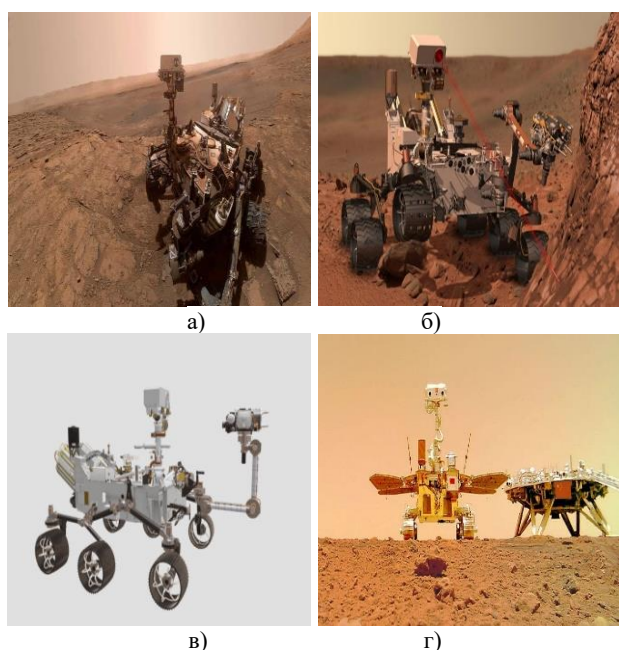


Рисунок 1. а) Марсоход НАСА Curiosity, б) Художественная концепция Curiosity, которая стреляет лазером в марсианский камень, в) Марсоход НАСА Perseverance, г) Марсоход Zhurong с посадочным модулем. Источник: https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/images/index.html

Давайте углубимся в текущие миссии по исследованию Марса, а также в предыдущие марсоходы, которые приземлились на Красной планете.

Curiosity - это марсоход размером с автомобиль, который был запущен со станции ВВС на мысе Канаверал 26 ноября 2011 года и приземлился на Марсе 6 августа 2012 года.

Основной причиной отправки Curiosity на Марс было понимание потенциала микробной жизни Марса. С поверхности Марса были отправлены рыхлые почвы и бури, марсианские породы, для анализа их структуры и состава. Прямоугольная «голова» Curiosity-это лазер Curiosity, который он научился использовать автономно. Сам выбирает камень, стреляет острым лазером и анализирует полученный пар (рисунок 1б).

Curiosity обнаружил, что 3.5 миллиарда лет назад в кратере Гейла могла существовать жизнь, когда на Красной планете была более плотная атмосфера, чем сегодня. Марсоход также обнаружил, что остатки древнего озера, известного как Йеллоунайф-Бэй, не были слишком кислыми или слишком солеными [2].

Что Curiosity еще не обнаружил, так это обилие метана. Но марсоход пережил пыльную бурю, которая охватила всю планету и уменьшила количество солнечного света на 97%, поэтому есть еще большие надежды на множество открытий.

Последним марсоходом НАСА в марсианском мире является марсоход Perseverance, запущенный 30 июля 2020 года и приземлившийся на Марс 18 февраля 2021 года.

Поиск признаков прошлой жизни на Марсе, а также сканирование Красной планеты на предмет пригодности для жизни людей были основной целью миссии марсохода. Для достижения этой цели Perseverance тестирует свою способность добывать кислород из марсианской

атмосферы и находить потенциальные области подземных вод для будущих человеческих экспедиций.

Хотя важных научных открытий марсохода Perseverance еще нет, марсоход записал 16-минутный звук движения Марса.

22 мая 2021 года марсоход «Zhurong» приземлился на поверхности Марса (равнина Утопия). Это первая успешная миссия Китая на Марс. Марсоход оснащен комплектом оборудования для изучения состава поверхности Красной планеты, ее магнитного поля, геологических особенностей, а также распределения ледяной воды. Короче говоря, марсоход Zhurong пытается узнать больше о том, как Марс выглядел раньше. Zhurong оснащен лазером, который сжигает близлежащие камни для оценки химического состава.

В то время как предыдущие миссии на Марс изучали особенности поверхности Марса, посадочный модуль НАСА InSight провел «первое тщательное обследование» с момента его появления на планете (рисунок 2). Запущенный 5 мая 2018 года и приземлившийся на Марсе 26 ноября того же года, InSight не проанализировал образцы грунта, а внимательно посмотрел на Марс — его кору, ядро и мантию.

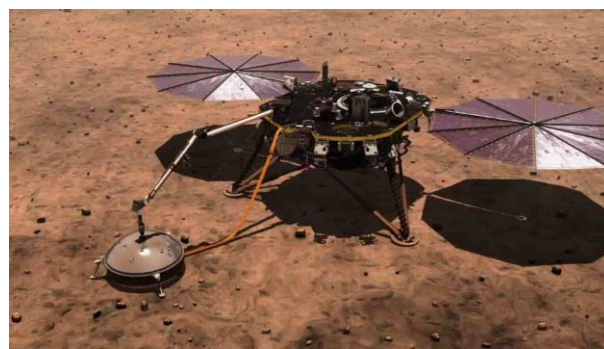


Рисунок 2. Посадочный модуль НАСА InSight на поверхности Марса. Источник: <https://mars.nasa.gov/insight/>

InSight также отслеживал тектоническую активность на Марсе, чтобы обнаружить «марсианские землетрясения» и удары метеоритов.

Цель InSight состояла в том, чтобы понять, как скалистые небесные тела, такие как 4 внутренние планеты нашей Солнечной системы, эволюционировали с момента их образования, изучая "жизненные признаки" планеты, такие как сейсмология и температура.

В первый год InSight обнаружил около 450 марсианских землетрясений. Поскольку на Красной планете нет тектонических плит, как на Земле, ученые считали, что они вызваны вулканически активными регионами.

Хотя магнитное поле Марса, которое когда-то было сильным, сегодня не существует, InSight обнаружил, что магнитное поле в 10 раз сильнее, чем ожидалось, в намагниченных поверхностных породах с момента ранней истории Марса.

3. Характер марсианских горных пещер и подземных местобитаний

На Красной планете самый высокий вулкан Солнечной системы - Вулкан Олимп (рисунок 3а). Его высота составляет 26 км. Начиная с миссии космического корабля «Маринер-9» в 1972 году, ученые знали, что вулканические

частицы рельефа покрывают значительную часть поверхности Марса. Эти частицы включают крупномасштабные потоки лавы, обширные лавовые равнины и самые большие из всех известных вулканов Солнечной системы. Вулканическому возрасту Марса около 3.7 миллиарда лет. Кроме того, в вулканических земных районах часто встречаются подземные полости — купола и трубки, выходящие из лавы. В отличие от карстовых пещер, которым тысячи или миллионы лет, вулканические пещеры образовались очень быстро во время извержений и активных разливов лавы [3].

Группа ученых, изучающих фотографии космических кораблей, обнаружила на Марсе пещеры вулканического происхождения, лавовые трубки, которые также встречаются на Земле. Ученые НАСА изучили изображения, сделанные аппаратом Марс Одиссей, и выделили семь структур, которые могут быть пещерами по бокам вулкана Арсия. Ширина входа составляет от 100 до 250 метров; считалось, что глубина достигает не менее 73-96 м (рисунок 3б, в, г, д, е). Неофициально были обнаружены Дена, Хлоя, Венди, Энни, Эбби и Никки, Жанна. Поскольку свет не достигает дна большинства пещер, их глубина может превышать приведенные выше оценки. Дно тела было отмечено глубиной около 130 м. В результате повторного изучения изображений были обнаружены новые «колодцы» [4].

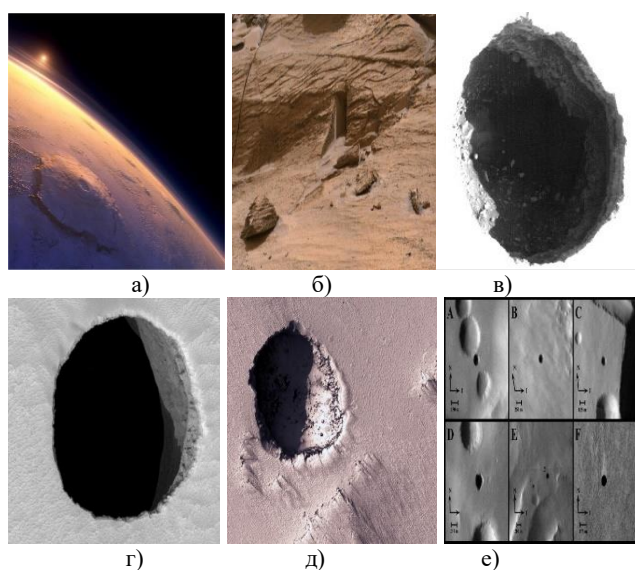


Рисунок 3. а - вулкан Олимп; б, в, г, д, е - горные пещеры Марса, найденные в вулкане Олимп и других сверхвысоких горах Арсия к югу от экватора. Источник: <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia09930-temperature-behavior-of-possible-cave-skylight-on-mars>

Поскольку наши планеты похожи, жизнь на Земле и Марсе также возникла в одном сценарии, а это означает, что живые организмы на Земле и Марсе также должны быть похожи друг на друга и иметь одинаковые условия жизни. Если бы Земля потеряла магнитное поле, как Марс, никто не выжил бы, а это означает, что космические радиоактивные лучи уничтожили бы все. Горные пещеры Марса-последняя надежда на настоящий момент. Тонкая атмосфера Красной планеты не может защитить от излучения. Поверхность Марса подвергается воздействию ультрафиолетового излучения Солнца и бомбардируется космическими заряженными частицами, поэтому малове-

роятно, что в верхних слоях грунта есть микробная жизнь или даже сложные органические соединения. Горные пещеры Марса защищают от таких пагубных воздействий, поэтому шансы найти здесь хотя бы живого человека резко возрастут [5].

Марсианская пыль облучалась тысячи лет, и даже в бункере от нее будет трудно спрятаться, потому что ее мельчайшие частицы легко проникают в любую трещину. Во время пылевых бурь он попадает в пещеры и уносит с собой радиоактивные частицы в подземный мир [6].

Итак, на Марсе есть несколько рекомендуемых типов строительных технологий, которые подходят для долгосрочной жизни. Рассматриваются два основных типа: подземная среда обитания Марса и поверхностная среда обитания Марса (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение понятий среды обитания

Преимущества	Недостаток
Природные пещеры	
доступные радиационные защита	определенное место
раскопки не нужны	ограничение по площади посадки
легкий, быстрый дизайн	ограничение мобильности и доступа к наземным ресурсам
структурная стабильность	фиксированный вход
научный труд	требуется предварительная миссия
расширяется в сети пещер	
доступ к подземным ресурсам	
возможность глубокого бурения	
постоянная температура окружающей среды	
Бункеры ручной работы	
гибкость позиционирования	потребность в толстом реголите/бериллии, который трудно защитить от радиации
легко расширяется	трудоемкость
легкая конструкция	операции высокого риска
модульные секции	угроза разрушения среды обитания из-за снижения давления
	высокие затраты из-за большой массы

Для сравнения здесь рассматриваются бункеры, изготовленные из бериллея для радиационной защиты наземных местообитаний. Но это требует больших средств. Очевидно, что из-за дорогостоящего проекта это займет годы. Поэтому выгодно использовать горные пещеры Марса в качестве подземной среды обитания. Из-за низкой атмосферной защиты на больших высотах ведутся научные исследования прочности и устойчивости внутренних краев этих пещер к марсианской гравитации, чтобы превратить их в жилую среду, такую как шахта, туннель. Будет разработана механико - математическая модель исследования прочности пещерных жилищ, местообитаний под влиянием различных сил (гравитационных, температурных, хотя и слабых тектонических и др.) таких сооружений [7].

Это исследование показывает, что вполне возможно использовать естественные пещеры для первого марсианского поселения. Исследования Марса людьми и роботами, как для жилых, так и для научных целей, играют большую роль в пещерах. Несколько типов горных пещер Марса, большинство из которых являются доступ-

ным вариантом для жилых помещений. Он также обеспечивает достаточный объем для размещения среды обитания, известные свойства, понятные из исследования, простую структуру, термическую стабильность, доступность и предсказуемое местоположение.

Преимущества использования марсианских горных пещер включают защиту от радиации, пыльных бурь и поверхностных опасностей крошечных метеоритов при заселении первых людей. Следовательно, возможно использование тонкостенных и легких конструкций среды обитания, таких как надувные конструкции, а также более широкий доступ к системам, требующим дополнительной защиты на поверхности.

4. Об использовании метода конечных элементов при изучении напряженно-деформированного состояния контура пещеры Энни на горе Арсия

Рядом с горой Арсия, одним из самых больших вулканов на планете Марс, были обнаружены пещеры с отверстиями шириной от 100 до 250 метров. Эти горные пещеры на Марсе могут стать средой обитания для первых людей или могут быть единственной структурой, которая хранит свидетельства микробной жизни прошлого или настоящего.

Люди, впервые посещающие марс, приземляются возле экватора. Это потому, что температура там колеблется от +20 днем и до -60 ночью. В остальных местах от -100, а в окрестностях Южного и Северного полюсов до -180. Жить при такой температуре, фантазировать о работе-это само по себе излишне.

В то время как в северном полушарии вблизи экватора находятся горы Олимп, самая высокая гора во всей Солнечной системе, в Южном полушарии находятся горы Арсия и горные системы, которые в полтора раза выше Эверста Гималаев, совсем близко к экватору. У них уже было обнаружено около 10 естественных пещер, и даже 6 были названы.

Впервые изучение устойчивости и сплоченности пещеры Энни на этой горе Арсия с помощью современного математико-механического моделирования физики.

Методы и модели результатов научных исследований, получаемых на пути исследования прочности и устойчивости марсианских горных пещер, сравниваются с результатами, полученными методами механико-математических исследований изученных подземных сооружений на поверхности земли. Основные ключевые отличия заключаются в том, что на Марсе величина гравитации в 3.2 раза меньше, чем на Земле, тектонические силы также намного меньше. Алгоритмы, которые создаются компьютерные программы также доказываются путем многократного получения результатов, полученных на Земле в качестве тестов.

В модельном плане для изучения напряженных деформационных состояний марсианских пещер используются модели С.Г. Лехницкого, Ж.С. Жанова, Ш.М. Айталиева, Ж.К. Масанова и Р.Б. Баймаханова, которые усовершенствовали область их применения для других направлений. Внутренние поперечные изображения и порталные части марсианских пещер моделируются математически современным сверхмощным численным методом-методом конечных элементов.

Для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) из рисунка 3 выберем варианта пещеры 3г, где четко показаны порталная часть пещеры эллипсoidalного профиля (рисунок 4).

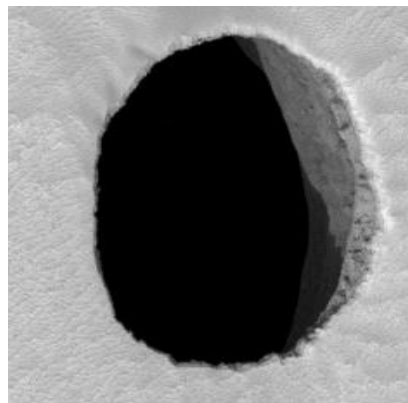


Рисунок 4. Контур марсианской пещеры

Глубина этой пещеры пока неизвестно. Но вдали от портала через несколько метров, можно предположить, что для такого плоского контура выполняется условие плоской деформации. Поэтому мы в первом приближении задачу определения НДС, можем решить, как плоской задачи.

Приведем в матричной форме из основного алгоритма конечноэлементного решения задачи по работе [8]. На контур относительно горизонтальной плоскости основания: будет действовать сила гравитационного веса $F^{гп}$, направленный вертикально вниз. Так как эти пещеры находятся в экваториальной области Марса, пока пренебрегаем температурными напряжениями.

Равновесное состояние контура и горный массив пещеры описывается системой линейных алгебраических уравнений в конечноэлементном представлении в виде

$$[R]\{U\} = \{F^{гп}\} \quad (1)$$

где $[R]$ – матрица жесткости системы; $\{U\}$ – вектор перемещений узловых точек; компоненты тензора деформации вычисляются внутри каждого изопараметрического элемента в гауссовых точках интегрирования i, j с помощью следующих выражений.

$$\{\varepsilon_{ij}\} = [B]_{i,j} \{U\}, \quad (2)$$

Где $\{\varepsilon_{ij}\}^T = \{\varepsilon_x, \varepsilon_z, \gamma_{xz}\}$, $\{U_{ij}\}^T = \{u_{ij}, v_{ij}, \dots\}$, $[B]$ – матрица базисных функций и $[D]$ – матрица упругих характеристик. $i=1,2,3$; $j=1,2,3$ – внутренние точки интегрирования.

$$\{\sigma_{ij}\}^T = [D]\{\varepsilon_{ij}\} \quad (3)$$

Здесь $[D]$ – является матрицей упругих характеристик.

Способы использования этих моделей алгоритмизированы, создаются компьютерные ориентиры.

Деформация $\varepsilon_n(\varepsilon_x, \varepsilon_z, \gamma_{xz})$ и напряжений в краях поперечного изображения (контура) пещеры Энни на горе Арсия Марса и в соединяющихся породах определяют величины $\sigma_n(\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz})$ закономерности образования Пучков опасных напряжений ($\sigma_{n\theta}, \tau_{n\theta}$, где θ – полярный угол), которые могут разрушаться. На следующем этапе исследования по приведенным выше алгоритмам (1) – (3) создаются компьютеризированные ориентиры и выпол-

няются обширные вычисления для определения контура пещеры и зон концентрации напряжений в массиве ближнего и дальнего зарубежья.

5. Заключение

В общей сложности 11 роботов (6 марсоходов и 5 посадок), отправленных на Марс, имеют разную продолжительность миссии и приземляются в разных регионах Марса, все они имеют общую цель: оценить пригодность Марса для жизни. Эти марсоходы сканируют, сверлят и путешествуют по марсианскому миру, чтобы собрать знания о Красной планете от нашего имени.

Преимущества использования марсианских горных пещер, обнаруженных с помощью этих марсоходов, защищают от радиации, пыльных бурь и поверхностных опасностей крошечных метеоритов при заселении первых людей. Следовательно, возможно использование тонкостенных и легких конструкций среды обитания, таких как надувные конструкции, а также более широкий доступ к системам, требующим дополнительной защиты на поверхности.

Это исследование показывает, что вполне возможно использовать естественные пещеры для первого марсианского поселения. Исследования Марса людьми и роботами, как для жилых, так и для научных целей, играют большую роль в пещерах. Несколько типов горных пещер Марса, большинство из которых являются доступным вариантом для жилых помещений. Он также обеспечивает достаточный объем для размещения среды обитания, известные свойства, понятные из исследова-

ния, простую структуру, термическую стабильность, доступность и предсказуемое местоположение.

Литература / References

- [1] Hussein, Al A., Apeldoorn, J., Ashford, K. Jr., Bennell, K.M., De Carufel, G., Haider, O., Hirmer, T., Jivănescu, E.I., Pegg, C.J., Shaghagh, Varzeghani A., Shimmin, R., Suresh, R., Mar Vaquero Escribano T., Vargas Muñoz M., Winetraub, Y., Gallardo, B., Fernández-Dávila, A., Zavaleta, J. & Laufer, R. (2009). The Role of Caves and Other Subsurface Habitats in The Future Exploration of Mars. *International Astronautical Congress, Daejeon, South Korea*
- [2] Urbain, T. (2023). How many rovers and landers are currently on Mars? Retrieved from: <https://starlust.org/how-many-rovers-are-on-mars/>
- [3] Baimahan, R.B., Muta, A.N. Mars turaly biz ne bilemiz? *Geomexanikalyk zhane komp'yuterlik matematikalyk model'deu okitudin zamanui maseleleri atty halykaralyk-praktikalyk konferenciya*
- [4] Seven Possible Cave Skylights on Mars. (2007). Retrieved from: <https://www.jpl.nasa.gov/images/pia09929-seven-possible-cave-skylights-on-mars>
- [5] Ksanfomaliti, L.V. (1997). *Parad planet. M.: Nauka. Fizmatlit*
- [6] Kuz'min, R.O., Galkin, I.N. (1989). *Kak ustroen Mars. M.: Znanie*
- [7] Demidov, N.Je., Bazilevskij, A.T., Kuz'min, R.O. (2015). Grunt Marsa: raznovidnosti, struktura, sostav, fizicheskie svoystva, burimost' i opasnosti dlja posadochnykh apparatov. *Astronomicheskij vestnik*, 49(4), 243-261
- [8] Baimahan, R.B. (2002). Raschet sejsmonaprazhennogo sostojaniya podzemnyh sooruzhenij v neodnorodnoj tolshhe metodom konechnykh jelementov. *Almaty*

Арсия тауындағы Энни үңгірі контурының кернеулі деформацияланған күйін зерттеуде шекті элементтер әдісін қолдану туралы

Р.Б. Баймахан¹, А.Н. Мүтә^{1*}, А. Тилейхан¹, К.Ч. Кожоголов²

¹Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

²ҚР ҰҒА Геомеханика және жер қойнауын игеру институты, Бішкек, Қырғызстан

*Корреспонденция үшін автор: mutita@mail.ru

Андатпа. Марс бетінде радиация, микрометеориттер және шанды дауылдар сияқты қауіптер жағдайында алғашқы барған адамдар өмір сүре алмайды. Бірақ біз осы Марста табылған үңгірлерді осы экологиялық қауіптерден табиғи баспана ретінде пайдалану жолы ретінде ұсынып отырмыз. Марс бетіндегі гравитациялық өріс Жерге қарағанда шамамен үш есе әлсіз, ал магнит өрісі тым әлсіз. Сондықтан жерден кеткен тіршілік иелері, соның ішінде адамдар Марс бетінде 30-40 секунд қана өмір сүре алады. Тіпті ең қуатты скафандр адамның өмірін бірнеше сағатқа ғана сақтай алады. Марс үңгірлері Күн радиациясын үш есе дерлік әлсіретеді және оны ішке кіргізбейді. Сондықтан Марс үңгірлерін зерттеу, оларды алғашқы тіршілік ету ортасына айналдыру үшін ғылыми негізделген зерттеулер жүргізу бүгінгі күнгі өзекті мәселе болып табылады. Сондықтан жер асты тіршілік ету ортасы ретінде Марстың тау үңгірлерін пайдалану тиімді. Жоғары биіктікте атмосфералық қорғаныс аз болатындықтан, осы үңгірлерді шахта, тоннель секілді тұрғын мекен жайға айналдыру үшін оның ішкі жиектерінің Марс гравитациясына шыдас беруі, беріктігі жайлы ғылыми зерттеу жұмыстары жүргізіледі. Марс астылық осындай құрылыстардың түрлі күштер (гравитациялық, температуралық, әлсіз болса да тектоникалық, т.б.) әсерінен үңгірлік тұрғын, мекен жайлардың беріктігін зерттеудің механика - математикалық моделі жасалынады.

Негізгі сөздер: Марс, ровер, үңгір, Олимп, Арсия таулары, тау жыныстары, шекті элементтер әдісі, кернеулі деформацияланған күй.

Об использовании метода конечных элементов при изучении напряженно-деформированного состояния контура пещеры Энни на горе Арсия

Р.Б. Баймахан¹, А.Н. Мута^{1*}, А. Тилейхан¹, К.Ч. Кожогулов²

¹Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан

²Институт геомеханики и освоения недр Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан

*Автор для корреспонденции: mutita@mail.ru

Аннотация. Люди, которые впервые побывали на поверхности Марса, не могут выжить в условиях таких опасностей, как радиация, микрометеориты и пыльные бури. Но мы предлагаем пещеры, найденные на этом Марсе, как способ использовать их в качестве естественного убежища от этих экологических опасностей. Гравитационное поле на поверхности Марса примерно в три раза слабее, чем на Земле, а магнитное поле слишком слабое. Поэтому существа, покинувшие землю, в том числе люди, могут жить на поверхности Марса всего 30-40 секунд. Даже самый мощный скафандр может спасти жизнь человека всего на несколько часов. Марсианские пещеры почти вдвое ослабляют солнечную радиацию и не пропускают ее внутрь. Поэтому изучение марсианских пещер, проведение научно обоснованных исследований, чтобы сделать их первой средой обитания, является актуальной проблемой на сегодняшний день. Поэтому выгодно использовать горные пещеры Марса в качестве подземной среды обитания. Поскольку на больших высотах атмосферная защита минимальна, для превращения этих пещер в жилые помещения, такие как шахты, туннели, проводятся научные исследования прочности и устойчивости внутренних краев к марсианской гравитации. Под влиянием различных сил (гравитационных, температурных, слабосточных, тектонических и т.д.) таких сооружений на Марсе разрабатывается механико - математическая модель исследования прочности пещерных жилищ, местообитаний.

Ключевые слова: Марс, марсоход, пещера, грунт, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

Received: 03 January 2023

Accepted: 14 April 2023

Available online: 30 April 2023

CONTENTS

<i>Tastanov Ye.A., Serzhanova N.Kh., Sadykov N.M.-K., Yerzhanova Zh.A., Tastanova A.Ye.</i> PHYSICAL AND CHEMICAL STUDIES OF FINELY-DISPERSED SLURRY TAILINGS OF THE DONSKOY ORE MINING AND PROCESSING PLANT (DMPP) FOR CHEMICAL BENEFICIATION TO PRODUCE CHROMIUM CONCENTRATE.....	5
<i>Zholdasbay Ye.Ye., Tazhiev Ye.B., Argyn A.A., Kaplan A.V., Koishina G.M., Dosmukhamedov N.K.</i> SELECTION AND JUSTIFICATION OF CHARGE PREPARATION BASED ON MANGANESE WASTE FROM ORE DRESSING.....	13
<i>Kelamanov B.S., Zayakin O.V., Yessengaliyev D.A., Kobegen Ye., Adaybayeva R.A., Temirbekov A.Zh.</i> STUDY OF THE Fe-Si-Al-Ba SYSTEM USING THE THERMODYNAMIC- DIAGRAMMATIC ANALYSES METHOD	20
<i>Zapparov M.M., Kasenov M.K., Auelkhan E.S., Alzhigitova M.M., Turapbai D.T.</i> STUDY OF THE HYDROGEOLOGICAL, ENGINEERING-GEOLOGICAL AND HYDROLOGICAL REGIME OF THE KAIYNDY LAKE BASIN FOR AN EMERGENCY SPILLWAY FROM KAIYNDY LAKE.....	25
<i>Baymakhan R.B., Muta A.N., Tileikhan A., Kozhogulov K.C.</i> ON THE USE OF THE FINITE ELEMENT METHOD IN THE STUDY OF THE STRESS- STRAIN STATE OF THE CONTOUR OF THE ANNIE CAVE ON MOUNT ARSIA.....	31

МАЗМҰНЫ

<i>Тастанов Е.А., Сержанова Н.Х., Садықов Н.М.-К., Ержанова Ж.А., Тастанова А.Е.</i> ДӨҢ КБК-НЫҢ ҰСАҚ ДИСПЕРСТІ ШЛАМ ҚАЛДЫҚТАРЫНЫҢ БАЙЫТУ ШАРТТАРЫН АНЫҚТАУ ҮШІН ФИЗИКАЛЫҚ-ХИМИЯЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕРІ.....	5
<i>Жолдасбай Е.Е., Тажиев Е.Б., Арғын А.Ә., Каплан А.В., Қойшина Г.М., Досмухамедов Н.К.</i> КЕНДІ БАЙЫТУДАН МАРГАНЕЦ ҚАЛДЫҚТАРЫ НЕГІЗІНДЕ ШИХТА ДАЙЫНДАУДЫ ТАҢДАУ ЖӘНЕ НЕГІЗДЕУ	13
<i>Келаманов Б.С., Заякин О.В., Есенғалиев Д.А., Көбеген Е., Адайбаева Р.А., Темірбеков Ә.Ж.</i> ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ-ДИАГРАММАЛЫҚ ТАЛДАУ АРҚЫЛЫ Fe-Si-Al-Ba ЖҮЙЕСІН ЗЕРТТЕУ	20
<i>Заппаров М.М., Касенов М.К., Ауелхан Е.С., Альжигитова М.М., Тұрапбай Д.Т.</i> ҚАЙЫҢДЫ КӨЛІНЕН АПАТТЫ СУ АҒЫЗУҒА АРНАЛҒАН ҚАЙЫҢДЫ КӨЛІ БАССЕЙІНІҢ ГИДРОГЕОЛОГИЯЛЫҚ, ИНЖЕНЕРЛІК-ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ РЕЖИМІН ЗЕРТТЕУ	25
<i>Баймахан Р.Б., Мұтә А.Н., Тилейхан А., Кожоголов К.Ч.</i> АРСИЯ ТАУЫНДАҒЫ ЭННИ ҮҢГІРІ КОНТУРЫНЫҢ КЕРНЕУЛІ ДЕФОРМАЦИЯЛАНҒАН КҮЙІН ЗЕРТТЕУДЕ ШЕКТІ ЭЛЕМЕНТТЕР ӘДІСІН ҚОЛДАНУ ТУРАЛЫ.....	31

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Тастанов Е.А., Сержанова Н.Х., Садыков Н.М.-К., Ержанова Ж.А., Тастанова А.Е.</i> ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ШЛАМОВЫХ ХВОСТОВ ДОНСКОГО ГОКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ИХ ОБОГАТИМОСТИ...	5
<i>Жолдасбай Е.Е., Тажиев Е.Б., Аргын А.Ә., Каплан А.В., Қойшина Г.М., Досмухамедов Н.К.</i> ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПОДГОТОВКИ ШИХТЫ НА ОСНОВЕ МАРГАНЦЕВЫХ ОТХОДОВ ОТ ОБОГАЩЕНИЯ РУД.....	13
<i>Келаманов Б.С., Заякин О.В., Есенгалиев Д.А., Кобеген Е., Адайбаева Р.А., Темірбеков А.Ж.</i> ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ Fe-Si-Al-Ba МЕТОДОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКО- ДИАГРАММНОГО АНАЛИЗА.....	20
<i>Заппаров М.М., Касенов М.К., Ауелхан Е.С., Альжигитова М.М., Тұрапбай Д.Т.</i> ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО, ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО И ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА БАССЕЙНА ОЗЕРО КАЙЫНДЫ ДЛЯ АВАРИЙНОГО ВОДОСБРОСА С ОЗЕРА КАЙЫНДЫ.....	25
<i>Баймахан Р.Б., Мута А.Н., Тилейхан А., Кожогулов К.Ч.</i> ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНТУРА ПЕЩЕРЫ ЭННИ НА ГОРЕ АРСИЯ.....	31

Учредитель: Satbayev University

Регистрация:

Министерство информации и общественного развития Республики Казахстан
№ KZ19VPY00056529 от 30.09.2022

Официальный сайт: <https://vestnik.satbayev.university/index.php/journal/>

Основан в августе 1994 г. Выходит 6 раз в год

Адрес редакции:

г. Алматы, ул. Сатпаева,
22 тел.: 292-63-46

© КазНИТУ имени К.И. Сатпаева, 2023